

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS QUEIMADAS DE
MINÉRIO DE FERRO NO MANUSEIO E DISPOSITIVO DE SUA
ANÁLISE EXPEDITA DE QUEBRA

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

2017

SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO DE
FERRO NO MANUSEIO E DISPOSITIVO DE SUA ANÁLISE EXPEDITA DE
QUEBRA

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

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

Orientadores:

Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Rio de Janeiro

Julho de 2017

**SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO DE
FERRO NO MANUSEIO E DISPOSITIVO DE SUA ANÁLISE EXPEDITA DE
QUEBRA**

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

**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 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.

Dr. Eng. Maurício Marcos Otaviano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2017

Bianchi, Maciel Rodrigues Rocha

Simulação da degradação de pelotas queimadas de minério de ferro no manuseio e dispositivo de sua análise expedita de quebra / Maciel Rodrigues Rocha Bianchi – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

VII, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luis Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 85-90.

1. Simulação 2. Degradação 3. Minério de Ferro. I. Tavares, Luis Marcelo Marques et al. 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.)

**SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO
DE FERRO NO MANUSEIO E DISPOSITIVO DE SUA ANÁLISE EXPEDITA
DE QUEBRA**

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

Julho/2017

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A degradação de pelotas de minério de ferro ocorre, principalmente, devido o processo de manuseio e transporte da planta de pelotização até o pátio dos clientes. O desenvolvimento e aplicação de modelos que preveem a degradação em diversos estágios de manuseio e para diferentes níveis de qualidade do produto proporciona melhores condições para adequar a qualidade das pelotas produzidas ao circuito de manuseio e transporte do cliente. O presente trabalho realizou um aprimoramento do modelo de previsibilidade com o desenvolvimento do modelamento da altura de queda durante o carregamento nos navios e o desenvolvimento e validação de um novo equipamento de análise de quebra superficial e volumétrica de pelotas. Após isso, foi feito uma análise de sensibilidade no modelo e um estudo de caso através de simulação de manuseio desde a unidade de pelotização até o pátio do cliente. Este trabalho mostrou o potencial da aplicação do modelo de previsibilidade da degradação em escala industrial.

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

**SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO
DE FERRO NO MANUSEIO E DISPOSITIVO DE SUA ANÁLISE EXPEDITA
DE QUEBRA**

Maciel Rodrigues Rocha Bianchi

Julho/2017

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Degradation of iron ore pellets occurs mainly due to the process of handling and transportation from the pelletizing plant until the customers. The development and application of mathematical models that predict for degradation at any stages of handling and for different levels of product quality contributes to better conditions to match the quality of the pellets produced to the customer handling and transportation circuit. The present work accomplished an improvement of the model of predictability with the development of the modeling of the height of fall during ship loading and the development and validation of a new equipment of analysis of surface breaking and volumetric of the pellets. After this, a sensitivity analysis was done on the mathematical model and a case study was performed through handling simulation from the pelletizing until the customer. This work showed the potential of the application of the degradation predictability model in industrial scale.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	1
II. OBJETIVOS.....	4
III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
III.1 PELOTIZAÇÃO	5
III.1.1 Minérios de ferro e minerais	5
III.1.2 Processo de produção da pelota de minério de ferro	6
III.1.2.1 Preparação da matéria-prima	7
III.1.2.2 Etapa da mistura	7
III.1.2.3 Processo de pelotamento	8
III.1.2.4 Processo de endurecimento	11
III.1.2.5 Estocagem e embarque de pelotas de minério e ferro	12
III.1.3 Controle de qualidade das pelotas.....	14
III.2 ESTUDO DA FRATURA DE PELOTAS.....	15
III.2.1 Mecanismos de fragmentação de partículas	16
III.2.2 Degradção de minério de ferro.....	17
III.2.2.1 Efeito do número de impactos e da altura total de queda.....	17
III.2.2.2 Efeito de amortecimento na presença de finos	17
III.2.2.3 Efeito da superfície de impacto.....	18
III.2.2.4 Efeito do tamanho de partícula	19
III.2.2.5 Efeito de estabilização e ordem dos eventos de impacto	19
III.2.2.6 Influência da composição mineralógica	20
III.2.2.7 Influência do tempo de envelhecimento.....	22
III.2.2.8 Influência do processo de produção das pelotas.....	22
III.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS NA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIOS DE FERRO.....	23
III.4 MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS	27
III.5 SIMULADOR DE DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DURANTE O MANUSEIO LTMPHS	33
IV. MODELAGEM DA ALTURA DE QUEDA EM NAVIOS	41
IV.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	41

IV.2 APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	48
V. NOVO EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE QUEBRA SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA DE PELOTAS	52
V.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	52
V.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PELOTAS.....	59
V.2.1 Energia de fratura por compressão	60
V.2.2 Caracterização por Auto-Fratura.....	62
V.2.3 Caracterização por Impactos Repetidos.....	64
V.2.4 Caracterização da Fragmentação Superficial.....	67
V.2.5 Distribuição granulométrica dos fragmentos	70
VI. ESTUDO DE CASO - SIMULAÇÃO DO MANUSEIO DESDE A UNIDADE DE PELOTIZAÇÃO ATÉ O PÁTIO DO CLIENTE	73
VII. SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE MANUSEIO USANDO SOFTWARE LTMPHS	83
VII.1 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS PELOTAS	83
VI.2 DEFINIÇÃO DOS CIRCUITOS DE MANUSEIO	84
VI. REFERÊNCIAS.....	85

I. INTRODUÇÃO

A elevada oferta de minério de ferro aliada a baixa demanda tem contribuído para queda significativa do preço do fino de minério de ferro nos últimos anos (Figura I.1). Apesar disso, a produção de pelotas de minério de ferro ainda ocupa uma posição de destaque econômico no cenário industrial siderúrgico brasileiro, tendo em vista o alto valor agregado que o produto tem quando comparado aos outros tipos de minério.



Figura I.1 – Histórico do preço do fino de minério de ferro no mercado spot (Platts IODEX 62%Fe CFR China)

O preço da pelota de minério de ferro é definido como um valor indexado somado a um prêmio referente ao valor em uso do produto, ou seja, é definido com base na valorização do produto no processo siderúrgico. Este prêmio se deve pelo fato da pelota apresentar vantagens sobre seus concorrentes no que diz respeito a alguns aspectos, tais como: maior regularidade na distribuição granulométrica, regularidade na qualidade química e redutibilidade (MEYER, 1980), justificando o seu maior valor agregado. Além disso, as pelotas de minério de ferro possuem elevada resistência à degradação mecânica, quando comparadas com seus concorrentes. Esta maior resistência se destaca tanto durante o manuseio e transporte, quanto durante a redução no interior dos fornos. Estas vantagens são importantes para a operacionalidade dos fornos siderúrgicos, pois favorecem 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).

Não se pode negar que a degradação da pelota de minério de ferro é um problema crítico que ocorre desde a usina de pelotização até as operações de redução das usinas siderúrgicas. Esta degradação é decorrente tanto das características intrínsecas das pelotas, tais como: granulometria e a composição mineralógica do *pellet feed*, das características dos aditivos empregados, do método usado na formação de pelotas, das condições de queima empregadas no forno de endurecimento, entre outras (WRIGHT, 1976; MEYER, 1980; FONSECA, 2003; COSTA, 2008), quanto das etapas de manuseio e transporte das mesmas, através de uma sequência de impactos resultantes de operações de manuseio e transporte por correias transportadoras, chutes de transferência e carregamento/descarregamento de navios.

Todos estes fatos acarretam na geração de grandes quantidades de finos de pelotas degradadas e, quando a usina siderúrgica não possui máquinas de sinterização, ela se vê obrigada a estocar este material fino em pilhas, acarretando num enorme passivo ambiental ou, por exemplo, acabam revendendo o material a um preço muito inferior comparado ao de pelotas, resultando em impactos negativos, financeiro e ambiental tanto para as indústrias pelotizadoras quanto para seus clientes.

Nas usinas de pelotização o controle de qualidade das pelotas produzidas é realizado por meio de procedimentos normativos. Entretanto, ensaios típicos que avaliam a qualidade física da pelota, tais como: resistência à compressão e à abrasão por tamboramento são úteis apenas para controle de processo, ou seja, não permitem prever como as pelotas se comportarão durante as operações de manuseio e transporte (SILVEIRA, 2012).

Tendo em vista este problema, diversos estudos foram e estão sendo realizados para o desenvolvimento de metodologias e modelos matemáticos para a previsão da degradação de minérios durante o manuseio. Além disso, novas técnicas de caracterização estão sendo desenvolvidas para a determinação de parâmetros importantes para o modelamento da degradação.

Vários pesquisadores, tais como Teo e Waters (1988), Weedon e Wilson (2000), Sahoo (2007), são citados neste trabalho, entretanto nenhuma das metodologias propostas por estes autores demonstrou ser capaz de fornecer previsões de degradação que atendesse a necessidade do processo produtivo. Com isso, com o intuito de preencher estas lacunas, foi desenvolvido um modelo matemático de degradação no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ (TAVARES e CARVALHO, 2008), o qual utiliza o modelo da mecânica do dano (TAVARES e KING, 2002) para determinar o enfraquecimento contínuo das partículas do minério e, assim, determinar a sua susceptibilidade à degradação durante o manuseio. Este modelo foi desenvolvido inicialmente para granulados de minério. Entretanto, 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. Mais recentemente, Cavalcanti (2015) implementou diversas melhorias no modelo, considerando parâmetros de quebra em função do tamanho da pelota, um modelo aprimorado para a fragmentação superficial, entre outras.

Para a aplicação do modelo desenvolvido por Tavares e Carvalho (2008) e modificado por Silveira (2012) e Cavalcanti (2015), para descrever a degradação de pelotas de minério de ferro, a equipe de pesquisa do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRJ desenvolveu, em parceria com a Samarco Mineração, um simulador capaz de prever a susceptibilidade da pelota em degradar simulando qualquer sistema de manuseio encontrado. O simulador foi chamado de LTM *Pellet Handling Simulator* ou LTMPHS (TAVARES e CARVALHO, 2011).

A utilização deste simulador proporciona à pelotizadora melhores condições de negociar contratos, pois poderia adequar a qualidade das pelotas produzidas ao circuito de manuseio e transporte do cliente. Além disso, poderia 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.

Entretanto, existe a necessidade de validação do LTMPHS, considerando os diversos fluxos de manuseio e tipos de pelotas existentes. Além disso, o simulador demandou um modelo genérico para estimar a altura de queda da pelota do carregador até o porão de diferentes tipos de embarcações em todo o período do carregamento. Para validação do LTMPHS, é necessário entender o comportamento da pelota durante o manuseio, principalmente dentro de chutes de transferência e sua queda dentro do porão do navio durante o carregamento e, para isso, alguns estudos de casos e diversas simulações deverão ser realizadas considerando diferentes sistemas de manuseio e diferentes tipos de pelotas.

Por fim, a aplicação desse simulador em ambiente industrial demanda a adoção de técnicas de caracterização mais convenientes à essa realidade que os ensaios originalmente empregados no desenvolvimento do modelo.

O presente trabalho está dividido em 7 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução e as justificativas, enquanto o capítulo 2 apresenta os objetivos do trabalho. O capítulo 3 revisa a literatura pertinente. O capítulo 4 apresenta o modelamento da altura de queda de pelotas em navio, enquanto o desenvolvimento de um novo equipamento de análise de quebra superficial e volumétrica das pelotas é apresentado no capítulo 5. Além disso, a realização de um estudo de caso da simulação do manuseio desde a unidade de pelotização até o pátio do cliente e uma análise de sensibilidade do modelo de previsibilidade da degradação durante o manuseio são apresentados nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

II. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento do modelo de degradação de Tavares e Carvalho (2008) e modificado por Silveira (2012) e Cavalcanti (2015) para descrever a degradação de pelotas queimadas de minério de ferro, demonstrando a sua capacidade de simular diversos sistemas de manuseio e diferentes tipos de pelotas de minério de ferro, por meio de estudos de caso.

Os objetivos específicos do trabalho são o desenvolvimento de modelos parametrizados para determinação de altura de queda das pelotas durante o carregamento nos porões dos navios, simular o comportamento das pelotas dentro de chutes de transferências e do próprio carregamento de navios por meio de simulações usando o método dos elementos discretos (DEM), bem como demonstrar a aplicação de um novo equipamento de ensaios que é uma alternativa muito mais conveniente para fornecer subsídios para a estimativa de parâmetros dos modelos de fragmentação superficial e volumétrica de pelotas.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

III.1 PELOTIZAÇÃO

III.1.1 Minérios de ferro e minerais

Na siderurgia dentre os principais minerais de ferro utilizados pode-se citar a hematita, a magnetita e a goethita. A hematita é o mineral de ferro mais comum e se encontra na forma de cristais usualmente tabulares entre espessos e delgados, denominados como minérios de hematita especular (Figura III.1a) e em fina estrutura cristalina, como hematita porosa (Figura III.1b). Sua composição química é Fe_2O_3 , com aproximadamente 70% de ferro (NUNES, 2007).

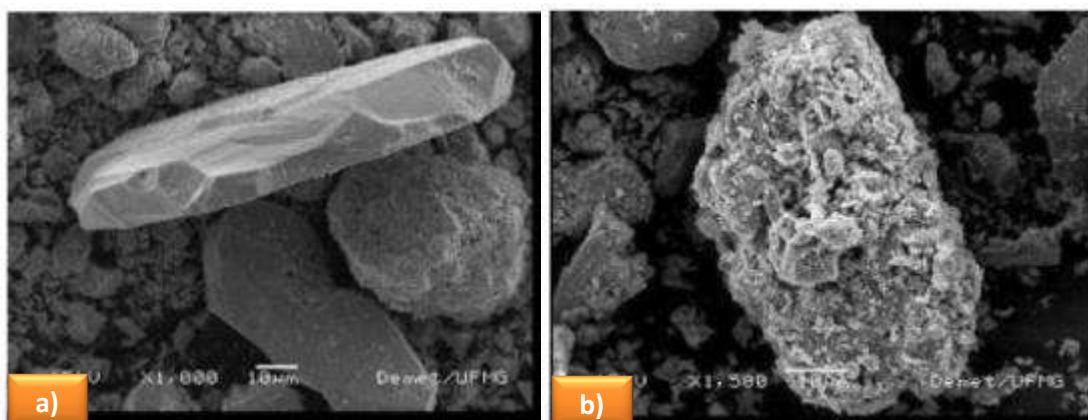


Figura III.1: Imagens no microscópio eletrônico de varredura, MEV, das partículas de (a) hematita especular e (b) hematita porosa presentes em concentrado (FONSECA, 2004).

A magnetita é constituinte comum de rochas magmáticas, podendo formar camadas devido a processos de diferenciação magmática. Encontra-se presente também em rochas metamórficas, de metamorfismo de contato ou regionais, formada, na maioria das vezes, pela alteração de minerais que contém óxido de ferro.

A composição química genérica da magnetita é Fe_3O_4 , ou $\text{FeO}\text{-}\text{Fe}_2\text{O}_3$, com o conteúdo teórico em ferro de 72,4% (31% FeO e 69% de Fe_2O_3). A magnetita é um material magnético, formada por dois íons metálicos distintos, o Fe^{+2} e Fe^{+3} . O arranjo formado por estes dois íons causa transferência de elétrons entre os diferentes ferros, gerando um campo magnético (FONSECA, 2004). A Figura III.2 apresenta uma micrografia da magnetita.

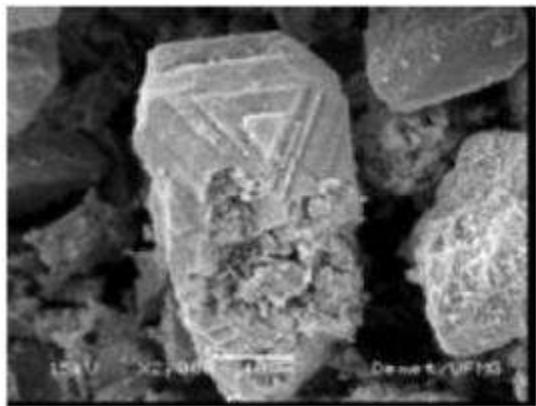


Figura III.2: Imagens no microscópio eletrônico de varredura, MEV, das partículas de magnetita presentes em concentrado (FONSECA, 2004).

A goethita (Figura III.3) ocorre associada ao quartzo, por alteração de sulfetos como pirita, em inclusões na hematita, limonita e micas. Durante o processo de queima da pelota, a goethita sofre alteração química, sendo convertida em hematita. Este processo é endotérmico e, portanto, aumenta o consumo de calor. Depois da secagem e pré-queima, a goethita deixa uma estrutura porosa, o que exige maiores tempos e temperaturas para o endurecimento (MEYER, 1980). A fórmula estrutural da goethita é FeO(OH) ou $\text{Fe}_{3+}\text{O(OH)}$, com 90,0% de Fe_2O_3 e 10,0% de H_2O (MEYER, 1980).

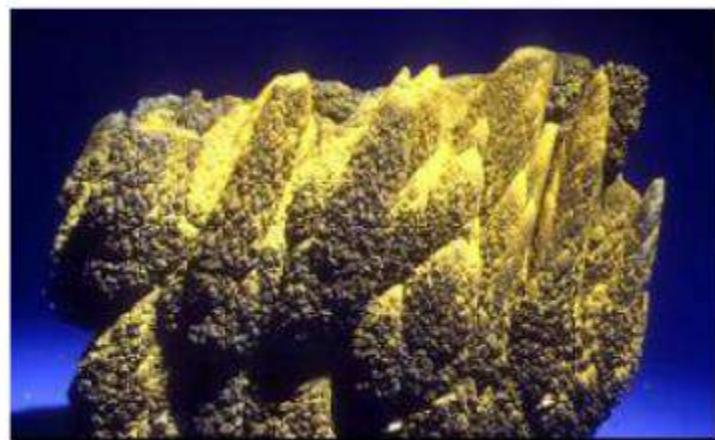


Figura III.3: Goethita em forma de agulha (NUNES, 2007).

III.1.2 Processo de produção da pelota de minério de ferro

O processo de pelotização (Figura III.4) inicia-se com a produção da matéria-prima, denominada *pellet feed*, subsequente tem-se a etapa de aglomeração deste material para formação da pelota crua e, finalmente, um processo térmico de endurecimento das

pelotas de minério de ferro, visando a obtenção de ferro gusa, na utilização em altos fornos e ferro esponja na utilização do processo de redução direta.

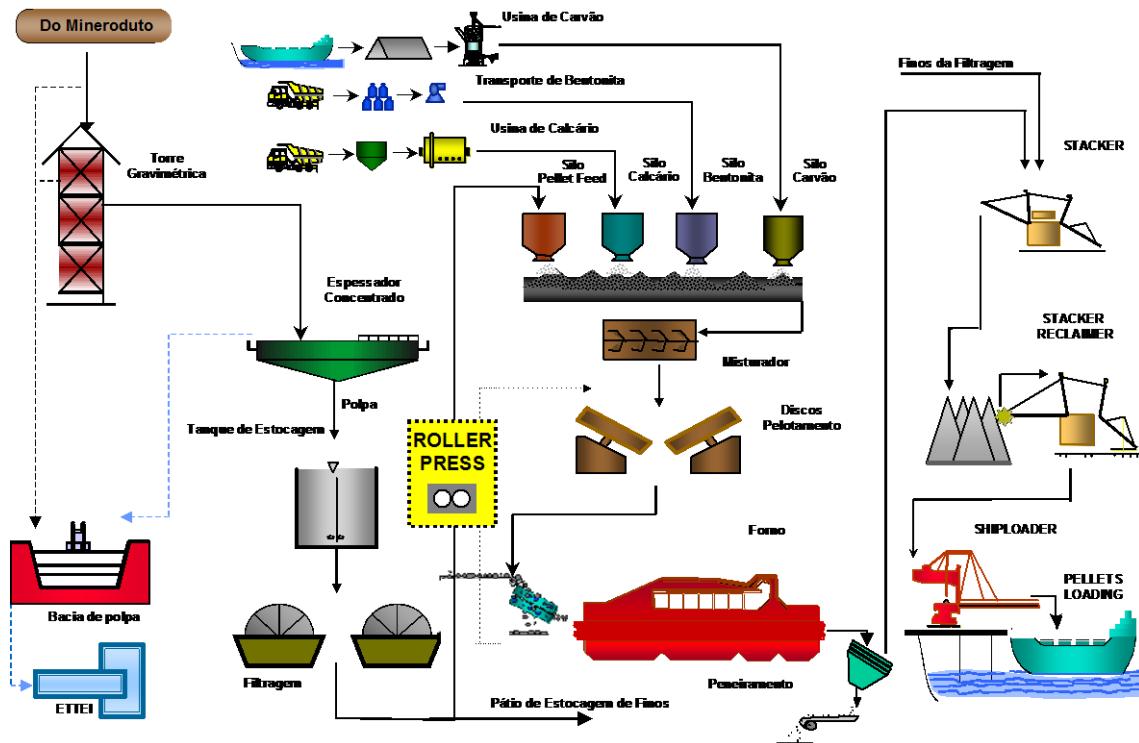


Figura III.4: Fluxograma Simplificado da Pelotização (SAMARCO MINERAÇÃO, 2011)

III.1.2.1 Preparação da matéria-prima

A principal matéria prima para a pelotização é o *pellet feed* que, neste caso, são concentrados de minério de ferro com qualidade química e granulométrica adequadas para a produção de pelotas de minério de ferro, trazendo eficiência da cadeia produtiva (FONSECA, 2004).

III.1.2.2 Etapa da mistura

Na área denominada de mistura, o pellet feed recebe a adição de insumos essenciais para que adquiram características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias para formação de pelotas cruas e, por fim, as pelotas queimadas que resistam a todo processo e atinjam a qualidade requerida (NUNES, 2007).

Os principais insumos utilizados são: coque ou carvão mineral, calcários e aglomerantes inorgânicos ou orgânicos. De acordo com Meyer (1996) os principais objetivos da utilização destes insumos são:

CARVÃO MINERAL: Introdução de energia térmica no processo de endurecimento da pelota, resultando em uma redução parcial do consumo de óleo combustível do forno. Além de ser um importante contribuinte energético, o carvão proporciona uma perfeita

distribuição de calor na pelota durante a etapa de queima, contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como em aumento de produtividade do processo.

CALCÁRIO: O calcário aumenta consideravelmente a resistência da pelota crua seca, prevenindo a sua degradação durante a etapa de secagem no forno de endurecimento. Este insumo é também responsável pelo fornecimento de monóxido de cálcio (CaO) e monóxido de magnésio (MgO), necessários ao processo de endurecimento da pelota. Este CaO é fundamental no processo físico-químico de formação dos compostos que irão favorecer a geração de uma ganga ácida a temperaturas mais baixas, fortalecendo a ligação entre os grãos de minério. O MgO atuará melhorando as propriedades das pelotas durante o processo de redução nos altos-fornos, pela formação de gangas com pontos de fusão mais elevados. Sua utilização é fundamental para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas aos processos posteriores.

BENTONITA: A bentonita é utilizada como aglomerante durante a etapa de formação das pelotas cruas nos discos de pelotização. Com a sua utilização, procura-se promover a aglomeração a frio das partículas de minério de ferro, facilitando o pelotamento, bem como otimizar a resistência a seco e a úmido da pelota crua. A sua origem é inorgânica e contém elevados teores de sílica, reduzindo o teor de ferro nas pelotas queimadas.

AGLOMERANTE ORGÂNICO: O aglomerante orgânico é muito atrativo para as pelotizações devido à ausência de sílica que contribui para o aumento do teor de ferro das pelotas. O aglomerante orgânico utilizado atualmente é uma mistura cuja base é a celulose, conhecido comercialmente como CMC (carboximetilcelulose). A formulação básica consiste de dois componentes básicos, um polímero que é um eficiente imobilizador de água, o qual fornece o mecanismo necessário para o controle da taxa de crescimento das pelotas e que trabalha sinergicamente com o ativador, que promove o uso eficiente do ligante, e melhora as propriedades físicas das pelotas cruas e queimadas. Em solução aquosa, o CMC forma uma solução altamente viscosa com o comportamento de filme líquido diluído. Este fator é importante para a formação de uma boa estrutura na pelota crua, para o controle da formação dos capilares e do tamanho das pelotas cruas.

A adição destes insumos é realizada em proporções adequadas e posteriormente homogeneizadas para alimentação do material nos discos pelotizadores.

III.1.2.3 Processo de pelotamento

A etapa de produção das pelotas cruas é realizada em discos (Figura III.5) ou tambores de pelotamento (NUNES, 2007). As pelotas cruas são produzidas com granulometria adequada, umidade e resistência mecânica a frio a e quente, suficientes para o seu

transporte até o forno de endurecimento e suportar intactas as pressões de gases quentes na etapa de secagem (NUNES, 2007).

A carga é alimentada numa determinada posição e as partículas finas alimentadas sofrem rolamentos sucessivos para formação da pelota crua e, consequentemente, seu aumento gradativo de tamanho (NUNES, 2007). Tal processo é realizado, devido à água que se encontra nos interstícios das partículas finas e se une ao aglomerante (mineral ou orgânico) promovendo a coesão das partículas finas de minério de ferro.

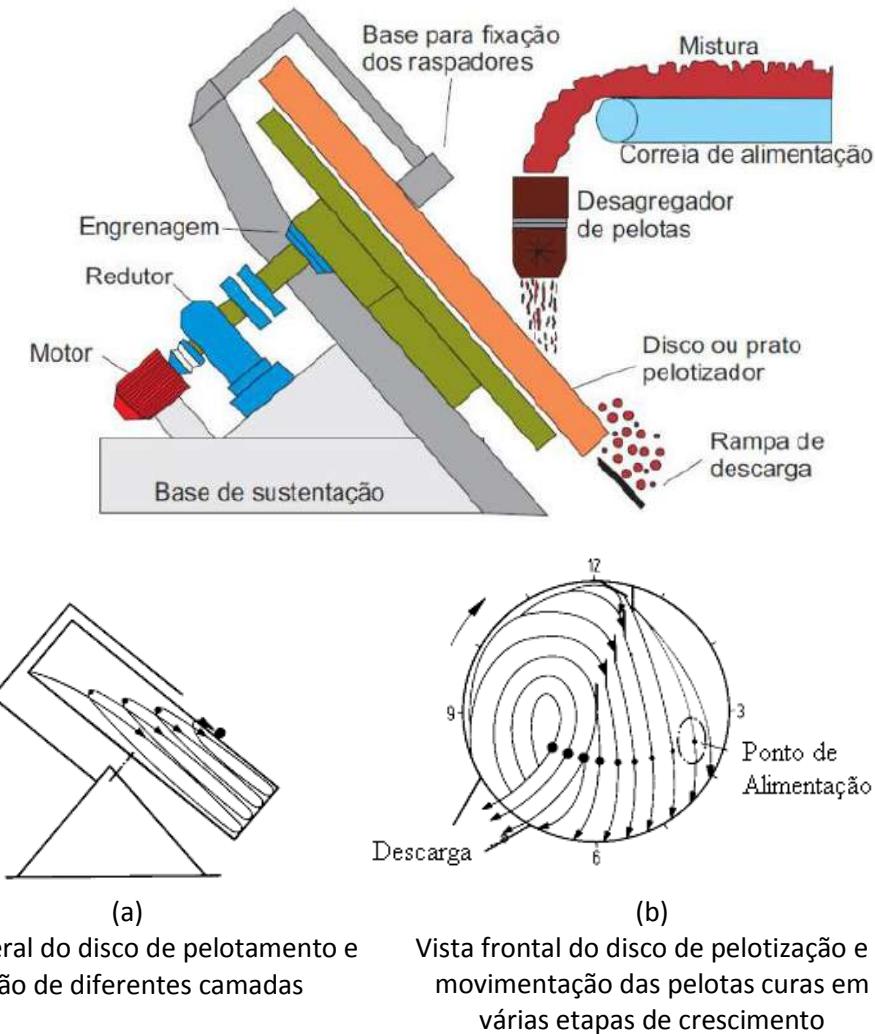


Figura III.5: O disco de pelotamento e seu princípio de funcionamento (modificado de MEYER, 1980).

Na etapa de aglomeração, denominada de pelotamento, o minério de ferro, devidamente preparado com os aditivos necessários, é alimentado aos discos pelotizadores onde se inicia a formação das pelotas. Com o “rolamento” no disco pelotizador em sentido circular gerado pela rotação e inclinação do disco, as partículas sólidas, revestidas por uma película de água, se tocam em vários pontos formando pontes líquidas provocadas principalmente pela tensão superficial da fase líquida. Com a formação destas pontes

inicia-se o estágio de crescimento do aglomerado, resultando posteriormente nas pelotas, como mostrado na Figura III.6 e III.7.

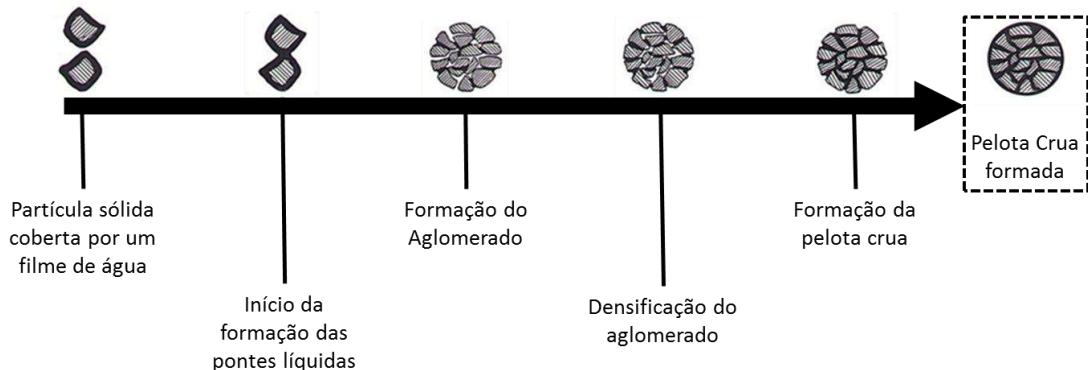


Figura III.6: Estágios de formação da pelota crua disco de pelotização (modificado de MEYER, 1980).

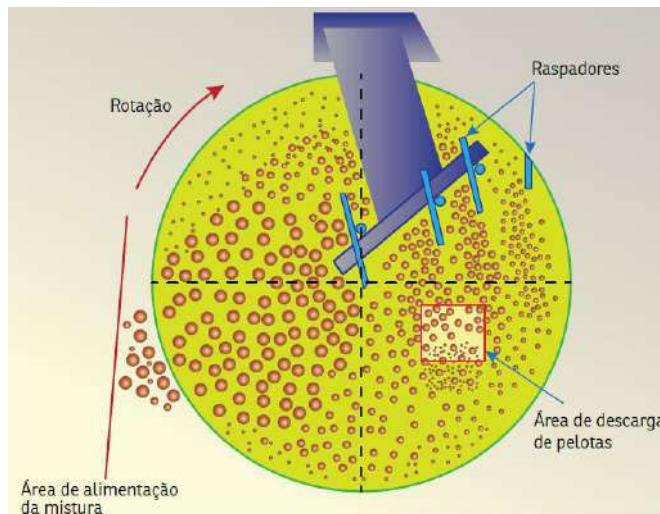


Figura III.7: Formação de pelotas cruas no disco (SAMARCO MINERAÇÃO, 2014)

As pelotas são produzidas com granulometria apropriada e resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transporte da área de pelotamento até o forno de endurecimento das pelotas (FONSECA, 2004).

De acordo com Fonseca (2004), dentre os fatores importantes para a formação das pelotas cruas, pode-se citar: a forma, o tamanho médio, a mineralogia, a distribuição granulométrica do minério e aditivos, a estrutura de poros, a molhabilidade das partículas, o teor de umidade, as características químicas da mistura, o tipo e quantidade do aglomerante utilizado, as condições operacionais dos equipamentos utilizados, os parâmetros operacionais (inclinação, tempo de residência, rotação), etc.

Após a saída das pelotas cruas dos discos pelotizadores, um sistema de classificação e transporte (mesa ou peneira de rolos) permite a separação da granulometria ideal para alimentação do forno de endurecimento, como visto na Figura III.8.

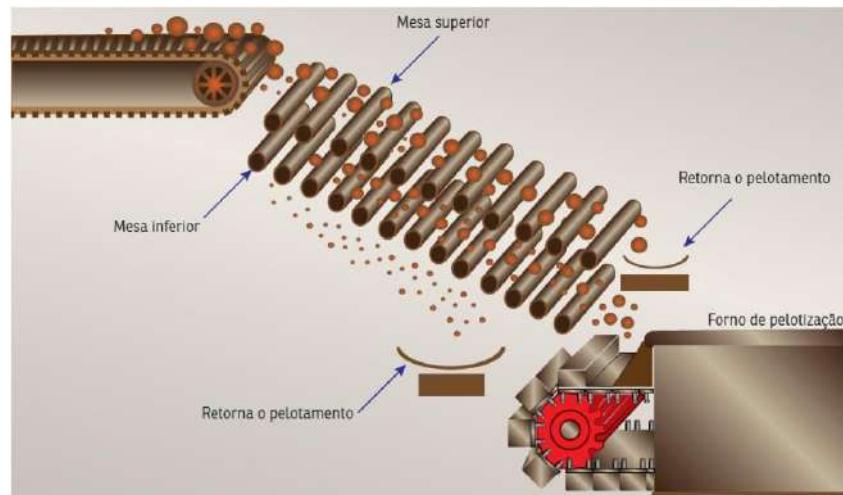


Figura III.8: Sistema de classificação na alimentação do forno de endurecimento (SAMARCO MINERAÇÃO, 2014).

III.1.2.4 Processo de endurecimento

O processo de endurecimento é uma das etapas mais importantes do processo de produção das pelotas de minério de ferro, pois para que as pelotas possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente, torna-se necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando às mesmas a resistência física e mecânica apropriada.

Nesta etapa, as pelotas são submetidas a um ciclo térmico adequado em um forno de endurecimento ou forno de pelotização. O forno (Figura III.9) pode ser dividido nas regiões de secagem, queima e resfriamento.

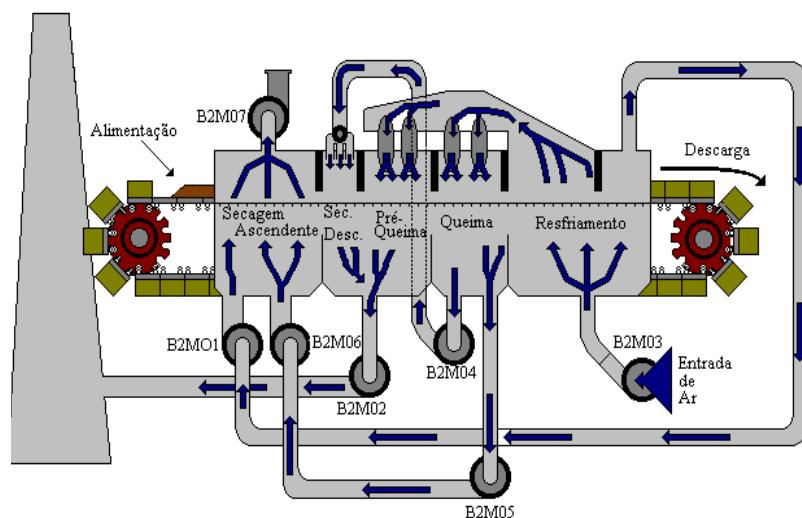


Figura III.9: Fluxograma do Forno de endurecimento do tipo grelha móvel. (COTA et al., 2005).

Durante a secagem, as pelotas devem perder a água não ligada, preservando, entretanto, sua integridade física, resistindo às tensões internas que surgem em função da evaporação da água contida nos poros e às pressões dinâmica e estática dos gases quentes (FONSECA, 2004).

De acordo com Athayde (2013), a etapa de pré-queima é a fase intermediária às fases de secagem e queima, onde as pelotas são expostas a um fluxo descendente de gases a temperaturas da ordem de 500 a 900 °C. Nestas condições as pelotas sofrem um aquecimento adequado antes de serem submetidas às rigorosas temperaturas de endurecimento na zona de queima, uniformizando a elevação de temperatura no leito de pelotas.

Na etapa de queima ocorre a sinterização dos grãos de hematita, que é muito importante para aumentar a resistência mecânica das pelotas queimadas. Esta sinterização consiste na recristalização e crescimento dos grãos de hematita e depende do tempo e da temperatura (FONSECA, 2004).

Por se tratar de um processo cinético, a relação da eficiência da sinterização com adequadas condições e tempo de queima é baseada no processo de difusão atômica. A difusão entre partículas de minério de ferro se caracteriza como um processo que diminui a energia livre ou que, alternativamente, aumenta a entropia (FONSECA, 2004).

O resfriamento se dá por meio de um fluxo ascendente intenso de ar atmosférico à temperatura ambiente que passa através do leito de pelotas já queimadas, ainda incandescentes, devido às elevadas temperaturas resultantes da etapa anterior, deixando as pelotas a uma temperatura adequada para o transporte via correias transportadoras e empilhamento no pátio de estocagem (DANIEL, 2013).

Portanto, nesta etapa é importante o controle da temperatura das pelotas na descarga do forno para evitar perda de calor. Outro fator importante nesta etapa é o choque térmico que as pelotas queimadas podem sofrer, ocasionando o aparecimento de trincas que podem fragilizar a estrutura, reduzindo a qualidade física (MEYER, 1980).

A dosagem de água em pelotas quentes após a sua descarga do forno também reduz a resistência à compressão das pelotas queimadas (MEYER, 1980).

III.1.2.5 Estocagem e embarque de pelotas de minério e ferro

Após a completa queima no forno de endurecimento, as pelotas são estocadas para então serem embarcadas nos navios, no caso de usinas localizadas junto a instalações portuárias. A estocagem de granéis sólidos genericamente pode ser efetuada de duas

maneiras: em silos ou em pátios. A estocagem ainda pode ser dividida em estocagem a céu aberto ou em galpões fechados (FERREIRA, 1989).

Os pátios a céu aberto apresentam grande vantagem sobre outros métodos por permitirem a estocagem de grandes quantidades, por longos períodos de tempo e a custo relativamente baixo. Tal método exige regras e possui limitações importantes, como por exemplo, à variabilidade do material e à sua granulometria. A degradação intempérica, além da contaminação, é evidenciada como uma desvantagem, exigindo deste método cuidados especiais no projeto do pátio (ZADOR, 1991).

Zador (1991) cita que um parâmetro importante para reduzir a degradação mecânica do material é a altura da pilha que será formada. Devido ao peso exercido pelas camadas sobrejacentes e as características do solo de apoio, a altura ideal deve ser calculada a partir da resistência mecânica do material.

Durante a recuperação da pelota no pátio de estocagem para o seu embarque nos navios, a pelota passa por diversos chutes de transferência de correias (Figura III.10), potencializando a degradação do produto durante o transporte. As recuperadoras devem manter uma taxa constante de retomada, evitando espaçamentos nas correias e proporcionando uniformidade no carregamento (PERINI, 2010).

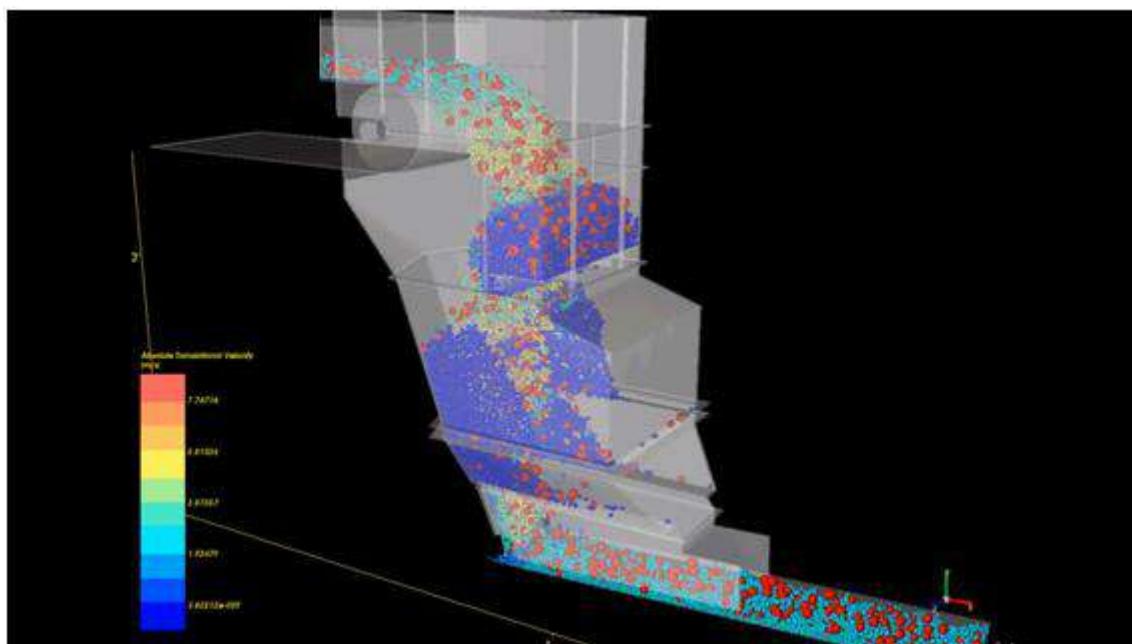


Figura III.10 – Simulação em DEM de chute de transferência (Site: <https://www.youtube.com/watch?v=WIIKhfPoiQ4>, acesso em 02/05/2017).

Considerando terminais de grande movimentação de carga, dedicados exclusivamente para carregamento de granéis sólidos como minério de ferro, o principal equipamento responsável pelo carregamento é o *shiploader* (Figura III.11). Este equipamento carrega

navios de forma constante, por meio de correias transportadoras. Basicamente existem três tipos de *shiploader*: o fixo, o móvel e o móvel giratório. As taxas de carregamento, dependendo do equipamento, situam-se de 500 a 16.000 toneladas por hora. (ALFREDINI, 2005).



Figura III.11: Shiploader do Porto de Ubu (SAMARCO, 2014)

A etapa de carregamento é considerada a mais crítica em relação a degradação das pelotas, pois a pelota pode chegar a cair de uma altura de quase 30 metros, dependendo do tipo de embarcação. Os navios graneleiros são classificados quanto à capacidade carregada. Usualmente se classificam pela tonelagem de porte bruto, em inglês, *deadweight tonnage* (dwt), que representa o peso total que o navio movimenta, incluindo a carga, combustível, óleo, tripulação, peças sobressalentes, suprimentos, etc (STOPFORD, 1997).

As principais categorias de navios graneleiros são (STOPFORD, 1997):

- Handy Max, entre 30.000 - 50.000 dwt;
- Panamax, entre 50.000 - 80.000 dwt;
- Médio, entre 60.000 e 80.000 dwt;
- Cape Size (Pós – Panamax), entre 80.000 – 200.000 dwt;
- Valemax, acima de 200.000 dwt.

Por isso, é muito importante entender o real impacto desta etapa de manuseio no processo de degradação da pelota.

III.1.3 Controle de qualidade das pelotas

O controle de qualidade da pelota queimada é de suma importância para determinar, além da sua aplicabilidade nos fornos siderúrgicos, a sua capacidade de resistir a esforços de manuseio desde a usina de pelotização até o pátio do cliente. Para isso, é necessário realizar amostragens periódicas com o intuito de formar um composto para avaliar a qualidade química, metalúrgica e física das pelotas queimadas. Esta avaliação

é feita por meio de um conjunto de ensaios de laboratório padronizados por instituições regulamentadoras como ISO (*International Standard Organization*), ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e JIS (*Japanese Industrial Standard*).

Os principais elementos e compostos químicos presentes na estrutura das pelotas são: o ferro total, FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, P, S, Na₂O, K₂O, cujo teores são determinados por meio de análises químicas.

Os testes metalúrgicos fornecem uma estimativa de comportamento esperado das pelotas durante as operações de redução, seja no alto forno ou em fornos de redução direta. Os testes são realizados em escala laboratorial para simular as condições de operação dos reatores. Os principais parâmetros avaliados nos testes metalúrgicos são: a capacidade de redução (redutibilidade) das pelotas e o grau de expansão volumétrica (índice de inchamento) associados à transformação da hematita (Fe₂O₃) em magnetita (Fe₃O₄) durante a redução do minério de ferro.

Os ensaios físicos padronizados, tais como: o ensaio de tamboramento e abrasão (ISO 3271) e o ensaio de resistência à compressão (ISO 4700), visam fornecer subsídios operacionais para avaliar o desempenho do processo produtivo da pelotização, ou seja, os mesmos 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. (CAVALCANTI, 2015).

III.2 ESTUDO DA FRATURA DE PELOTAS

Quando um cliente compra um carregamento de pelotas entende-se que o navio estará cheio de pelotas íntegras, ou seja, pelotas inteiras. Entretanto, tanto pelotas, quanto granulados e sínter, passam por etapas agressivas de manuseio até chegar ao pátio do cliente. 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, esforços e impactos.

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.

III.2.1 Mecanismos de fragmentação de partículas

A fragmentação das partículas ocorre devido a aplicação de forças de contato capazes de deformar as partículas ocasionando tensões no qual o material responde a estas solicitações mecânicas através da geração de trincas ou da deformação inelástica. Esse processo é caracterizado pelos mecanismos de abrasão, estilhaçamento ou clivagem, os quais dependem do nível de energia aplicada sobre as partículas (KING, 2001).

Quando a força aplicada não é suficiente para fragmentá-la, ocorre o processo de deformação do material sólido, no qual pode ser classificada como Deformações Elásticas e Deformações Inelásticas. A deformação elástica é uma deformação na qual não existe a possibilidade do material se manter deformado após a aplicação da força, sendo mantida a conservação da energia durante a deformação. Já a deformação inelástica recupera apenas parte da energia de deformação, tendo a outra parcela desta energia sido transformada em mecanismos de rearranjos internos de sua estrutura e, com isso, não sendo recuperável (TAVARES, 2004).

A fragmentação da partícula pode ser classificada em duas formas: Quebra Superficial ou Quebra Volumétrica, conforme mostrado na Figura III.12. Segundo Tavares (2004) a fratura volumétrica pode ser classificada como estilhaçamento, quando elevadas taxas e intensidades de aplicação de energia, sob ação de esforços compressivos, é aplicada sobre o material, causando intensa fragmentação da partícula original, o que resulta em um amplo intervalo de tamanhos de fragmentos ou a fratura por clivagem, quando a intensidade de aplicação de energia é baixa, de maneira que são formados alguns fragmentos grossos, bem como partículas finas próximo aos pontos de aplicação dos esforços.

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).

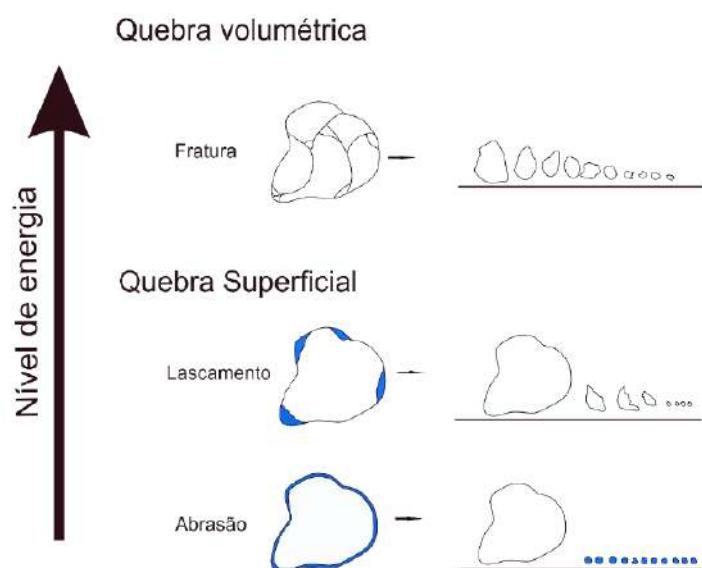


Figura III.12 – Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (CUNHA, 2014).

III.2.2 Degradação de minério de ferro

O tipo de fragmentação que o minério sofrerá depende do nível de manuseio/ transporte que a mesma será submetida desde a usina de pelotização até o pátio do cliente no qual estes esforços estão diretamente correlacionados com as operações de transporte em correias, diferentes chutes de transferências, operações de empilhamento e recuperação, além da etapa de carregamento e descarregamento do produto.

Pode-se destacar alguns fatores que influenciam na degradação dos minerais. Dentre eles estão: o número de impactos e a altura total de queda, o amortecimento na presença prévia de finos, o tipo de superfície de impacto, o tamanho da partícula, a seletividade de partículas mais resistentes (fenômeno de estabilização), a ordem com que ocorrem os eventos de impacto, a composição mineralógica e o tempo de envelhecimento.

III.2.2.1 Efeito do número de impactos e da altura total de queda

Fagerberg e Sandberg (1973) mostraram, a partir de ensaios de queda livre de partículas de carvão, que a substituição de um evento de impacto por n eventos de impacto com alturas menores, de maneira que a soma destas fosse equivalente à altura total para um único impacto, produziria a mesma proporção de finos. Porém, estudos realizados por Sahoo *et al.* (2002) e Sahoo (2004) demonstram que a taxa de geração de finos aumenta com a diminuição do número de impactos para uma mesma altura total de queda.

III.2.2.2 Efeito de amortecimento na presença de finos

Sahoo *et al.* (2002) investigaram este efeito a partir de ensaios de impacto por queda livre com carvão variando a proporção inicial de finos. Foi verificado que, à medida que aumenta a quantidade de finos presentes antes do impacto, diminui a geração de novos finos por degradação (Figura III-13), caracterizando o efeito de amortecimento.

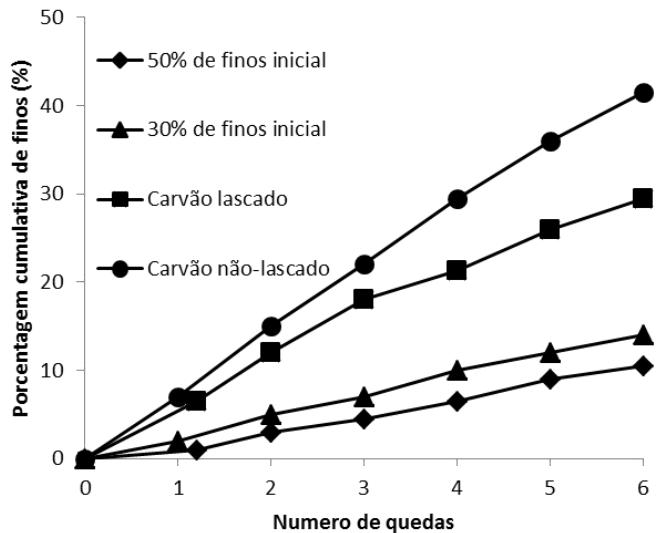


Figura III.13 - Porcentagem acumulada de finos (- 16 mm) vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo et al., 2002).

III.2.2.3 Efeito da superfície de impacto

Tanto Ooshima *et al.* (1981) quanto Sahoo *et al.* (2003) verificaram em seus estudos que a taxa de geração de finos era maior quanto mais rígida for a superfície de impacto, como o aço, por exemplo (Figura III.14). Além disso, a geração de finos aumenta com a repetição das quedas.

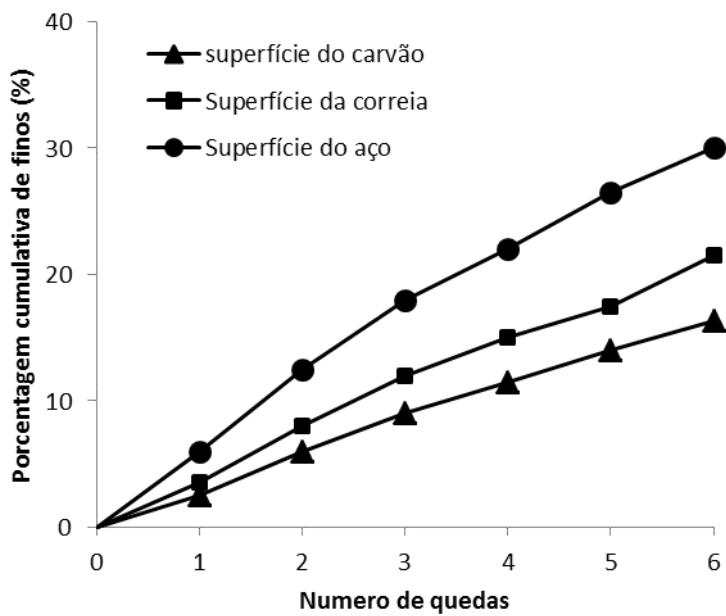


Figura III-14 - Porcentagem acumulada de finos vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo et al., 2003).

III.2.2.4 Efeito do tamanho de partícula

Diversos autores têm demonstrado (SCHÖNERT, 1986; TAVARES e KING, 1998) que, assim como para outros materiais frágeis, existe uma tendência de aumento da resistência de minérios à quebra com a diminuição do tamanho de partícula . Sahoo e Roach (2005) demonstraram que a geração de finos como resultado de impactos sucessivos de partículas de carvão mineral australiano a uma altura de 5 m diminuía com a redução do tamanho de partícula.

Além disso, segundo Cavalcanti (2015), estudos realizados com pelotas de minério de ferro mostram que quanto menor o diâmetro médio da pelota, maior será a sua resistência a fratura (Figura III.15).

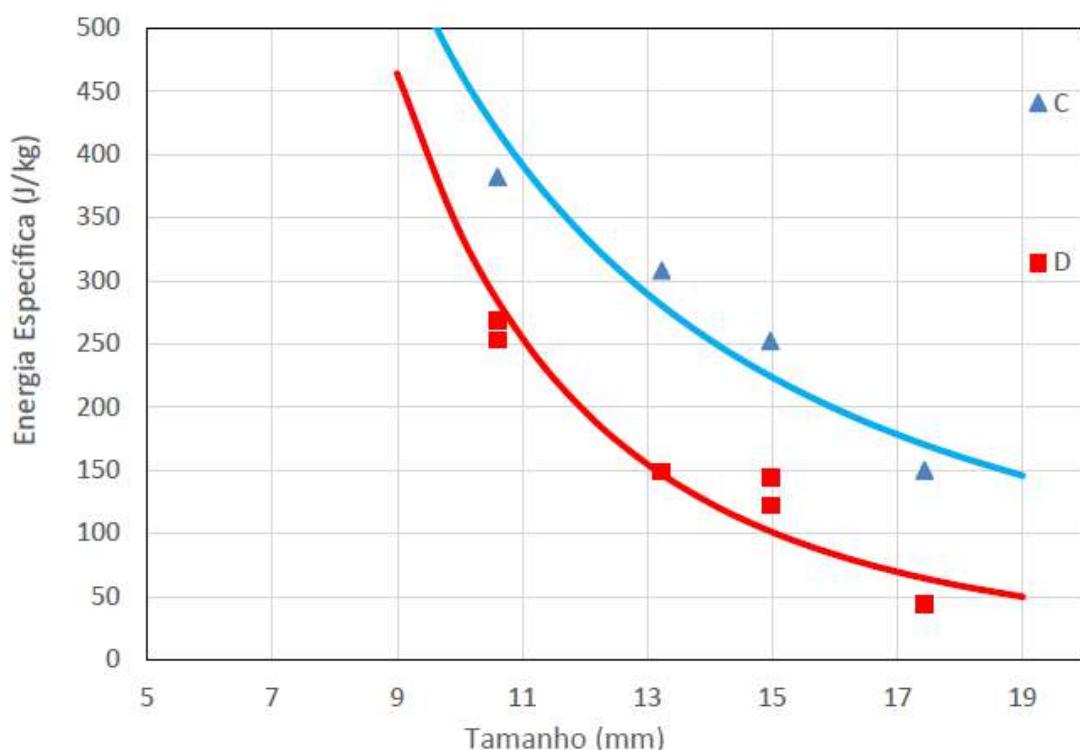


Figura III.15- Efeito de tamanho de pelota na energia específica de fratura para dois tipos de pelota de minério de ferro (CAVALCANTI, 2015)

III.2.2.5 Efeito de estabilização e ordem dos eventos de impacto

Norgate *et al.* (1986) verificaram que a quantidade de finos gerada pela degradação depende da ordem dos eventos de impacto. Foi observado que, para uma dada altura de queda, a degradação será maior nas primeiras operações de um circuito de manuseio do que nas últimas, pois, segundo Tavares e Carvalho (2008), quando uma população de partículas de minério é submetida a repetidas quedas de baixa energia, há a tendência que as partículas mais frágeis deste grupo sejam rapidamente desintegradas já nos primeiros impactos, enquanto que as outras partículas remanescentes conseguem resistir

a um maior número de eventos de impacto, mesmo com a diminuição de sua resistência como resultado do acúmulo de dano.

III.2.2.6 Influência da composição mineralógica

Dentre os principais minerais de minérios utilizados como matéria prima para a produção de ferro e aço temos a magnetita, a hematita e a goethita (limonita), que por sua vez, também são os principais minerais na composição do concentrado produzido pela Samarco para a produção de pelotas de minério de ferro.

Segundo Fonseca (2004), durante a etapa de endurecimento da pelota crua no forno, ocorre a perda da água de cristalização do minério goethítico, aumentando a porosidade da pelota, fragilizando o grão e reduzindo a resistência física da pelota (Figura III.16). Isso acarreta em uma menor permeabilidade do forno, maior consumo de insumos, menor produtividade e menor resistência física das pelotas queimadas devido a sua hidratação e poros.

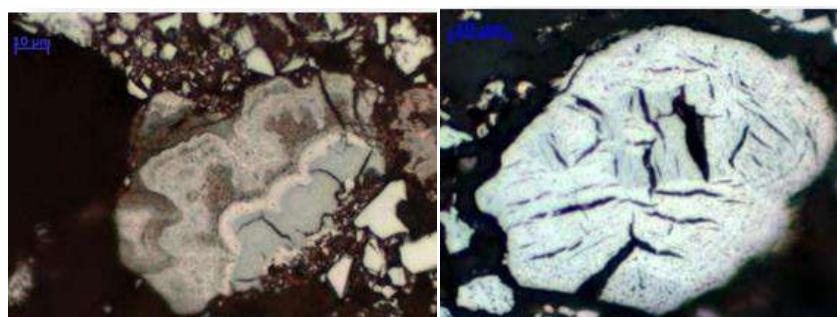


Figura III.16 – Imagem de grão de Goethita antes e após a queima (BAILON, 2015)

Sá *et al.* (2004) verificaram em pelotas para operação de redução direta que a presença de um tipo de hematita, denominada especular, favorece o aumento da resistência à compressão (Figura III.17), quando comparada à goethita, magnetita e martita (hematita porosa).

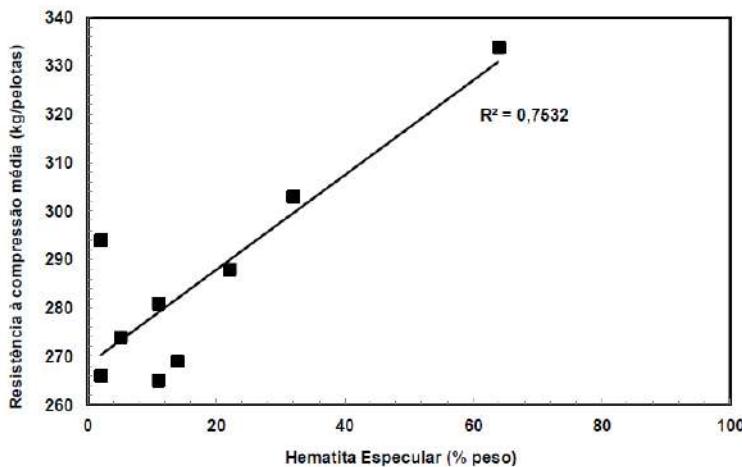


Figura III.17 – Efeito da proporção de hematita especular na resistência média à compressão de pelota
(SÁ et al., 2004 apud SÁ, 2003)

Estudos mostram uma influência negativa do teor de magnetita na resistência à compressão (LAGOEIRO, 1998), uma vez que os valores médios de resistência à compressão da faixa acima de 300 kg/pelota apresentaram um decréscimo com o aumento dos teores de magnetita dos concentrados originais. Segundo Lagoeiro (1998), a redução da resistência à compressão da pelota ocorre devido o processo de oxidação de magnetita em hematita, ou vice-versa, pois ocorrem alterações ao longo dos planos cristalográficos que envolvem uma diferença de volume e forças de cisalhamento atuando na interface das fases criando planos de fraqueza que promovem o fraturamento.

Sá (2003) propôs uma equação que relaciona a resistência à compressão (*CCS*) com os teores dos minerais que compõe a pelota, sendo dada por:

$$CCS = 364,87 - 0,81Hp - 1,13 * Go - 2,40 * Ma \quad (\text{III.1})$$

onde *Hp* é a percentagem da Hematita porosa, *Go* é a percentagem de Goethita e *Ma* é a percentagem de Magnetita. Esta equação foi obtida com base em regressão linear múltipla, com resultados de aderência estatística mostrados na Figura III.18.

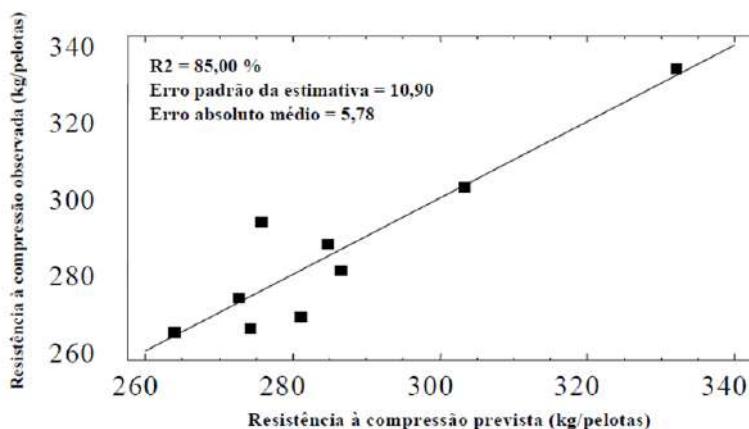


Figura III.18 – Validação do modelo para cálculo da resistência à compressão ISO (SÁ, 2003)

III.2.2.7 Influência do tempo de envelhecimento

Uma das etapas do processo de pelotização é o empilhamento do produto em pátios abertos, no qual ações das intempéries durante a estocagem (chuva, umidade do ar, etc.) causam o envelhecimento da pelota, proporcionando a fragilização da estrutura. Segundo Leite apud Fonseca (2003), a fragilização da pelota está ligada à decomposição dos ferritos de cálcio ($n\text{CaO} \cdot m\text{Fe}_2\text{O}_3$) que resultam da lixiviação. Fonseca (2003) propõe um mecanismo para o fenômeno de envelhecimento e comprova a existência de ciclos de envelhecimento, influenciados pela água de chuva e/ou a empregada para minimizar a emissão de particulados.

Martins (2013) avaliou a perda da resistência de pelotas, simulando as três principais regiões das pilhas de pelotas: A superfície, o centro e a base. O resultado mostrou que a base da pilha, que fica diretamente em contato com a umidade excessiva, apresentou maior perda de resistência mecânica.

III.2.2.8 Influência do processo de produção das pelotas

Na maioria dos casos industriais é praticamente impossível fazer alterações estruturais para modificações de sistemas de manuseio. Neste caso, é necessário fazer uma análise de qual produto ou tipo de pelota é adequado para este sistema.

Com isso, alguns autores descrevem fatores que influenciam na perda de resistência mecânica das pelotas, tais como: 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) e a distribuição granulométrica dos insumos utilizados (COSTA, 2008; BOECHAT et al., 2011).

O controle dessas variáveis durante o processo de fabricação irá contribuir para a melhoria da resistência mecânica das pelotas e, por conseguinte, a 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 por meio 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.

III.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS NA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIOS DE FERRO

Dentre as propriedades das pelotas de minério de ferro, a resistência mecânica é uma das mais importantes. Pelotas com resistência mecânica adequada resistem mais às solicitações de natureza física relacionadas às etapas de manuseio e transporte. Sendo assim, a resistência mecânica de pelotas de minério de ferro deve ser avaliada por meio de ensaios que traduzem o comportamento físico destes materiais, nas diversas etapas de sua utilização.

Atualmente, os dois principais testes que avaliam a resistência mecânica das pelotas e que seguem normas ISO são o índice de tamboramento/abrasão e a resistência à compressão das pelotas (Shi et al., 2009):

- **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO:** O ensaio de resistência à compressão a frio torna possível a avaliação da integridade física das pelotas nas etapas de manuseio, isto é, estocagem e transporte, pois como os volumes de pelotas nas etapas de estocagem e transporte são muito elevados, a resistência à compressão a frio passa a ter, na avaliação da resistência mecânica durante o manuseio, um elevado peso.

Para a determinação da resistência à compressão a frio de pelotas, utiliza-se o padrão mundial ISO 4700. Segundo este padrão, no mínimo, 60 pelotas da amostra, com granulometria entre 12,5 mm e 9,0 mm, são individualmente colocadas entre duas placas paralelas e submetidas à ação de força compressiva uniaxial, a uma taxa específica (10 a 20 mm/min), até a ruptura da mesma. O valor médio de carga de ruptura (em N ou kgf) dos ensaios é reportado como o resultado final, acompanhado do desvio padrão e dos valores máximo e mínimo. Mais recentemente, Cavalcanti (2015) propôs usar esse método, com o registro das deformações durante a aplicação dos esforços, na medida da energia de fratura das pelotas por compressão. A Figura III.19 apresenta um equipamento automatizado utilizado para este ensaio.



Figura III.19 Equipamento de testes de Resistência à Compressão das pelotas.

- **RESISTÊNCIA À ABRASÃO:** O ensaio de tamboramento é utilizado para avaliar a resistência das pelotas ao atrito durante transporte, manuseio e ao próprio atrito entre as mesmas durante a descida da carga nos reatores.

Para a determinação do índice de tamboramento e abrasão utiliza-se o padrão mundial ISO 3271 - Determination of Tumble Strength. O teste consiste em colocar uma massa de 15 kg da amostra de pelotas, de granulometria entre 6,3 mm e 19,0 mm, em um tambor de abrasão e submetê-las a 200 rotações, a uma frequência de rotações de 25 rpm. O resultado de tamboramento é expresso como o percentual retido na peneira de 6,3 mm, e a abrasão é o percentual passante na peneira de 0,5 mm. A Figura III.20 apresenta do equipamento utilizado para este ensaio.



Figura III.20 Tambor de abrasão onde é avaliado o Índice de Tamboramento das pelotas queimadas.

Estes ensaios físicos padronizados visam fornecer subsídios operacionais para avaliar o desempenho do processo produtivo da pelotização, entretanto, não permitem prever, com o intuito de simulação, como as pelotas se comportarão durante as operações de manuseio e transporte (SILVEIRA, 2012).

Contudo, vários testes estão sendo utilizados e adaptados para estudar o fenômeno da fragmentação e, dentre os equipamentos já utilizados para determinação dos parâmetros de quebra do minério, podemos citar:

- **Célula de Carga de Impacto (CCI):** Utilizado para determinar a energia necessária para fraturar um minério (Figura III.21). Este teste é caracterizado como um ensaio de carregamento rápido, porém de impacto duplo. Esse ensaio foi proposto por Silveira (2012) para caracterização a resistência à fragmentação de pelotas por impacto.

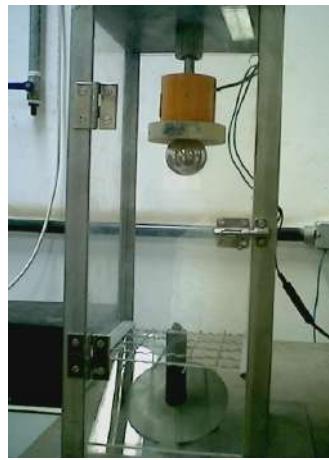


Figura III.21 Célula de carga de impacto LTM/COPPE

- **Ensaio de Auto Fratura:** São ensaios de impactos repetidos, por meio de queda livre (impacto simples). Este ensaio consiste em lançar um minério em um tubo com alturas variáveis sobre uma superfície de aço (Figura III.22). Esse ensaio foi usado por Silveira (2012) na avaliação da resposta das pelotas à fragmentação superficial, tendo sido ainda usado por Cavalcanti (2015) na estimativa indireta da distribuição das energias de fratura e da resposta de pelotas a impactos repetidos.

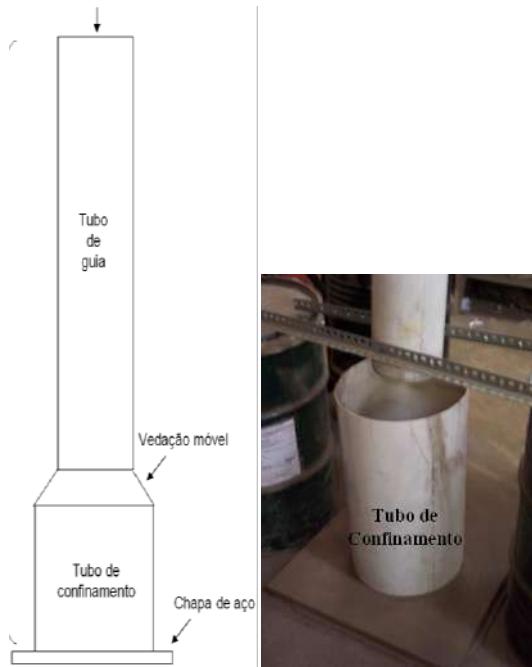


Figura III.22. Diagrama esquemático do sistema de transferência montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.

- **Ensaio de Queda de Peso – *Drop Weight Test (DWT)*:** O ensaio é utilizado para determinar as características de resistência à fragmentação de partículas por impacto. O teste consiste colocar uma partícula sobre uma superfície rígida

(geralmente de aço), proporcionando um impacto de elevada energia através de um impactor em queda a partir de uma altura conhecida (Figura III.23).

Os fragmentos, provenientes da fratura das partículas são recolhidos e analisados por peneiramento. Com isso, é possível determinar a relação entre a energia fornecida e a distribuição granulométrica do produto. A tendência é que a quebra (distribuição granulométrica dos fragmentos) será proporcional à energia aplicada (KING, 2001). Esse ensaio foi usado por Silveira (2012) na caracterização da fragmentação volumétrica de pelotas de minério de ferro.

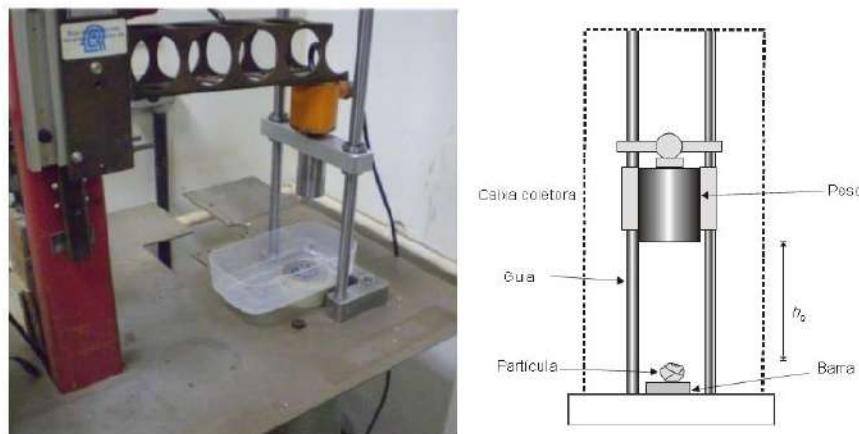


Figura III.23 – Célula de carga de impacto LTM/COPPE de 63 mm

- **Ensaios de fragmentação por abrasão (tamboramento LTM):** O ensaio de abrasão permite a modelagem de quebra por abrasão (“*surface attrition*”), através de impacto de baixa magnitude. O ensaio de Tamboramento do LTM é uma modificação do Tamboramento da ISO 3271, onde o tambor utilizado neste ensaio possui o mesmo diâmetro (1 metro), porém com espessura diferente (0,3 metros ao invés de 1 metro) (Figura III.24). Ele foi proposto por Silveira (2012), tendo sido utilizado para gerar dados para modelagem da fragmentação superficial de pelotas.



Figura III.24 – Tambor LTM/COPPE

É importante destacar que, na versão mais recente do modelo de degradação da UFRJ, Cavalcanti (2015) usou uma combinação dos ensaios de compressão de pelotas, modificado de forma a permitir a medida da energia de fratura, ensaios de autofratura, tamboramento LTM e ensaio de queda de peso. Dentre esses vários ensaios, o de autofratura foi o que revelou ser o mais importante, mas também tedioso de realização experimental, o que cria desafios práticos importantes para a adoção do modelo de degradação na previsão de resultados para uma amostra de pelota com características desconhecidas.

III.4 MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS

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 (2008) e nas modificações propostas por Silveira (2012) e Cavalcanti (2015), pelo fato deste 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.

O modelo matemático desenvolvido por Tavares e Carvalho (2008 e 2011) 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. Cavalcanti (2015) também fez modificações importantes no modelo, no qual foi proposto parâmetros de quebra variando apenas por faixa de tamanho da pelota e a inclusão de novos parâmetros no modelo.

O modelo, após as devidas modificações, define que, quando uma pelota sofre quebra, esta deixa de existir e torna-se um fragmento (caco), alterando sua característica de fragmentação, enquanto que o inverso não ocorre (Figura III.25).

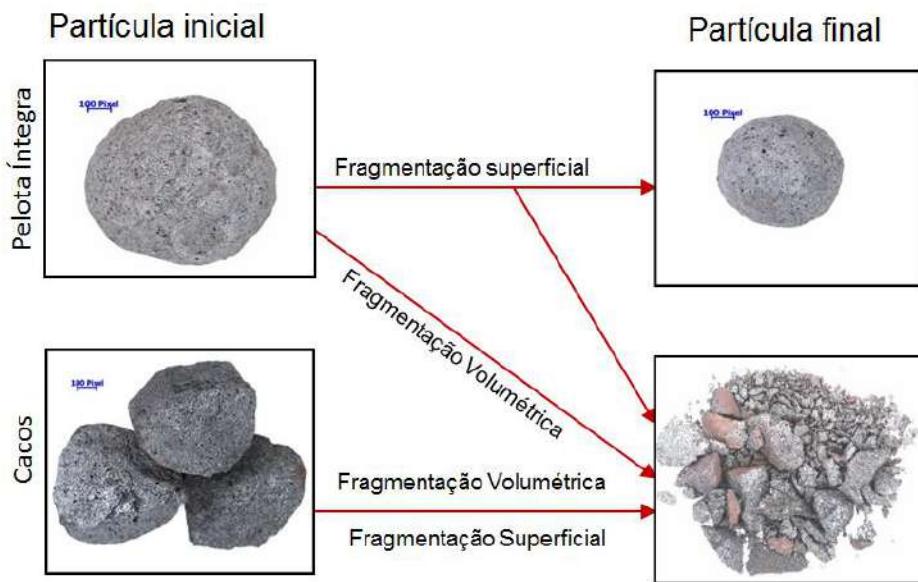


Figura III.25 – Esquema do modelo de degradação modificado por Silveira (2012)

O modelo parte do princípio de que nem sempre uma partícula fratura após um evento de queda durante o seu manuseio e transporte. Quando isso ocorre, a partícula sofre um dano, que diminuirá a energia necessária para a sua fratura em um evento seguinte de impacto. Esta teoria 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 se pode observar na Figura III.26, a aplicação do modelo é dada pela mudança do comportamento mecânico da partícula, representado por uma curva de força versus deformação que varia como consequência de sucessivos impactos de mesma magnitude.

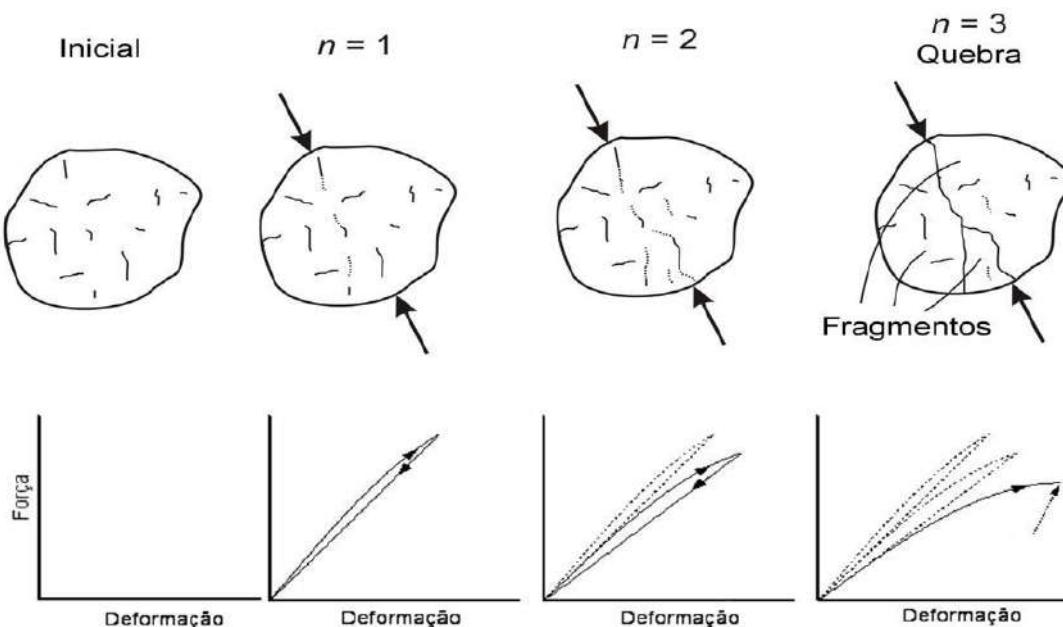


Figura III.26 – Efeito do enfraquecimento devido ao acumulo de dano causado por impactos repetidos de mesma energia (TAVARES, 2009)

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 deformação crítica para fratura (α_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.2):

$$D = \left(\frac{\alpha}{\alpha_c} \right)^\gamma \quad (\text{III.2})$$

na qual D é o dano, α é a deformação sofrida pelo material com impacto e α_c é a deformação crítica do material. γ é um parâmetro que mede a susceptibilidade do material à fragmentação. A partir de resultados de ensaios em laboratório, Silveira (2012) percebeu que o valor de γ varia com o tamanho do caco, porém não com o tamanho da pelota, adaptando o modelo inicial proposto. Já Cavalcanti (2015) determinou que o valor de γ varia com o tamanho de partícula.

O modelo também se baseia na descrição da distribuição de probabilidade de fratura do material original, a qual pode ser obtida através de experimentos realizados na célula de carga de impacto do Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ.

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

$$F_{n+1}(E) = \frac{[F_n[E/(1-D)] - F_n(E_K)]}{1 - F_n(E_K)} \quad (\text{III.3})$$

sendo que $F_n(E_k)$ é a proporção de partícula quebradas no n -ésimo impacto a partir de uma energia específica de impacto E_k . Neste caso a proporção de partículas quebradas é diferente para cacos e pelotas no modelo modificado. O dano (D) é calculado pela equação (TAVARES e KING, 2002):

$$D = \left[\frac{2\gamma(1-D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_K}{E} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (\text{III.4})$$

Essa equação não se apresenta na forma explícita, sendo necessário aplicar um método numérico iterativo para resolvê-la.

A Equação III.5 calcula a distribuição de tamanhos do material através de um balanço de massas de uma faixa granulométrica individual para cada impacto de partículas

$$W_{i,n+1} = W_{i,n}[1 - F_{i,n}(eE_{k,n})](1 - K_j) + \sum_j^i W_{j,n}[F_{j,n}(eE_{k,n})b_{i,j} + K_j[1 - F_{j,n}(eE_{k,n})]a_{i,j}] \quad (\text{III.5})$$

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 proporção de produtos gerados por abrasão das partículas contidas na classe de tamanhos i , a qual é presumida no modelo original (TAVARES e CARVALHO, 2008) 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.6:

$$a_{i,j} = a_i = \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^{\lambda} \quad (\text{III.6})$$

sendo d_a e λ parâmetros característicos dos materiais e d_i é o tamanho médio de partícula.

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.7:

$$E_{k,n} = m_p g h_n \quad (\text{III.7})$$

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 Equação III.8, baseada na teoria de contatos de elásticos de Hertz (Tavares e Carvalho, 2008)

$$e = \left(\frac{k_{superfície}}{k_{superfície} + k}\right) \left(\frac{k_{aço} + k}{k_{aço}}\right) \quad (\text{III.8})$$

sendo $k_{aço}$ a rigidez do aço (aproximadamente 230 GPa) 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.9):

$$e = 0,5 \left(\frac{k_{aço} + k}{k_{aço}}\right) \quad (\text{III.9})$$

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

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

sendo $E_{k,n}$ a energia de impacto e E_{50bi} a energia de fratura mediana das partículas que quebraram, a qual é dada pela Equação III.11 (TAVARES, 2009):

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

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 III.12) se transforma na Equação III.13:

$$W_{i,n+1} = \left\{ W_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - K_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i W_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n}) b_{ij}(eE_{k,n}) + K_j(E_{k,n}) [1 - F_{j,n}(eE_{k,n})] a_{i,j}] \right\} \text{pelota} + \left\{ W_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - K_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i W_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n}) b_{ij}(eE_{k,n}) + K_j(E_{k,n}) [1 - F_{j,n}(eE_{k,n})] a_{i,j}] \right\} \text{caco} \quad (\text{III.13})$$

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.

Mais recentemente, Cavalcanti (2015) introduziu modificações importantes no modelo, considerando a influência do tamanho da pelota na sua energia média de fratura, sendo descrita por meio da Equação III.14:

$$E_{50}(dp) = C_{pelota} \left(\frac{dp_0}{dp} \right)^d \quad (\text{III.14})$$

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 10mm), também medida em J/kg, dp_0 igual a 10 milímetros, dp o tamanho da pelota em milímetro e d uma constante de cada pelota.

Além disso, Cavalcanti (2015) concluiu que não há variações nos parâmetros do modelo da função quebra volumétrica, comparando várias pelotas, bem como nos seus tamanhos. Com isso, a Equação III.10 foi substituída por outra que descreve de forma mais precisa a fragmentação de pelotas a baixas energias de impacto (Equação III.15):

$$t_{10} = A \left[1 - \exp^{-b' \left(\frac{E}{E_{50b}} - E_0 \right)} \right] \quad (\text{III.15})$$

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 de distribuição da energia de fratura das pelotas que efetivamente quebraram naquele impacto e E_0 um parâmetro de ajuste do modelo (CAVALCANTI, 2015). A Tabela III.1 apresenta os valores dos parâmetros A , b' e E_0 para a função quebra volumétrica das pelotas.

Tabela III.1 Parâmetros do modelo da função quebra volumétrica de pelotas (CAVALCANTI, 2015).

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

O padrão de fragmentação de diferentes tipos de pelotas foi descrito por meio de uma curva única, conforme ilustrado na Figura III.27.

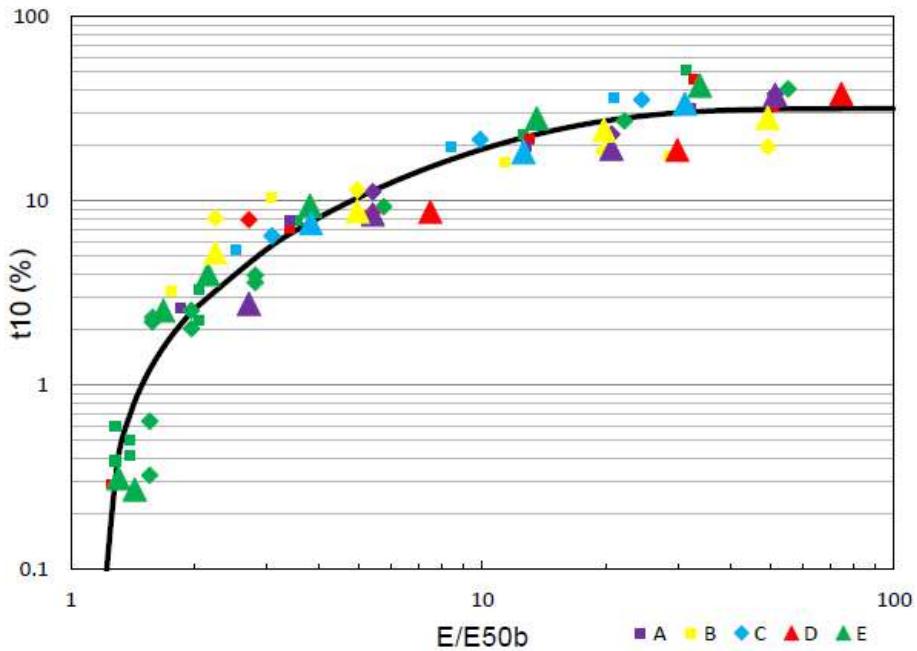


Figura III.27 – Modelagem da relação entre o t10 da fragmentação volumétrica e a energia de impacto para 5 diferentes pelotas, onde os símbolos são os dados experimentais, enquanto que a linha é o ajuste do modelo descrito na Equação III.13 (CAVALCANTI, 2015)

Por fim, Cavalcanti (2015) propôs e validou uma expressão para a proporção de finos gerados por fragmentação superficial (Equação III.16).

$$Taxa\ de\ abrasão = (C_{abrasão} E_k^{d_{abrasão}}) f \quad (\text{III.16})$$

onde $C_{abrasão}$ e $d_{abrasão}$ são constantes de cada pelota, f é o fator relativo ao tamanho da pelota e E_k a energia específica de impacto, em J/kg

O modelo foi validado a partir da comparação da proporção de pelotas e cacos e da distribuição granulométrica resultante de quedas sucessivas de lotes de pelotas contra uma superfície de aço, mostrando ótima aderência.

III.5 SIMULADOR DE DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DURANTE O MANUSEIO LTMPHS

Modelos matemáticos são ferramentas úteis na previsão de resultados. Entretanto, eles realmente somente se tornam uma ferramenta útil para a indústria quando estão disponíveis em uma plataforma que proporcione ao usuário sua pronta aplicação. Isso é particularmente verdadeiro no caso da degradação de pelotas de minério de ferro, que pode ocorrer como resultado de uma sequência muito variada de eventos de manuseio. Pensando nisso, a equipe do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRJ desenvolveu, em parceria com a Samarco Mineração, um simulador capaz de prever a

susceptibilidade da pelota degradar simulando qualquer sistema de manuseio existente e é chamado de LTM *Pellet Handling Simulator* ou LTMPHS (Figura III.28).



Figura III.28 – Tela de entrada do Simulador LTMPHS

O simulador foi desenvolvido com o intuito de disponibilizar uma ferramenta capaz de simular diferentes fluxogramas de manuseio com lotes de diferentes produtos. A estrutura geral do simulador é apresentada na Figura III.29.

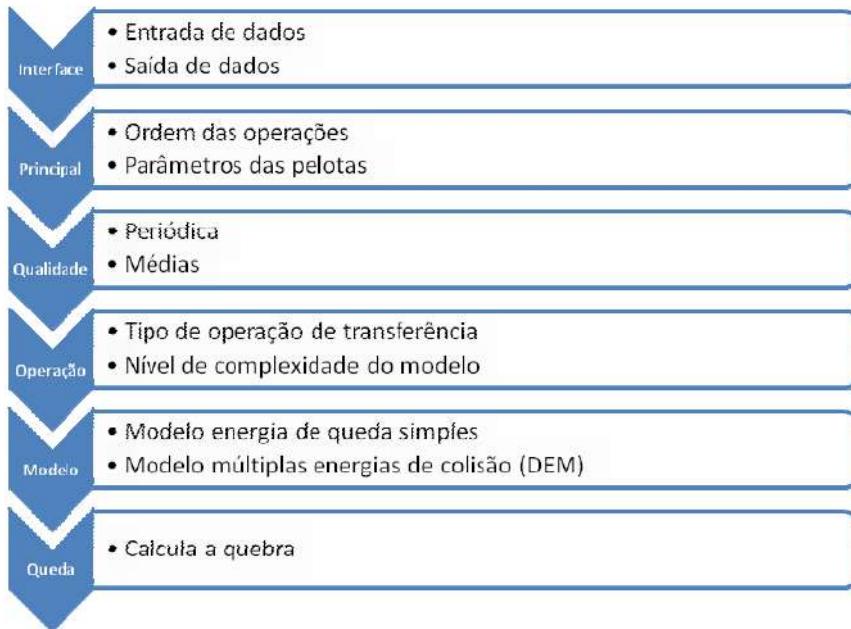


Figura III.29 – Estrutura geral do simulador

Todo o conjunto de informações inseridas no simulador é denominado “projeto”, sendo possível carregar um projeto já existente, ou salvar um projeto atual a qualquer momento da utilização do software. O projeto é dividido em quatro grandes áreas de informações: granulometria, fluxograma, caracterização e simulação, como apresentando na Figura III.30.

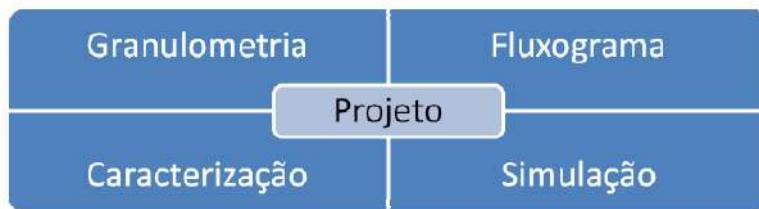


Figura III.30 – Módulos contidos em um projeto de simulação no LTMPHS

O módulo de “caracterização” trata da introdução dos parâmetros que descrevem as características de quebra do lote de produto cujo manuseio será simulado. Nesse caso, duas alternativas são oferecidas ao usuário:

- Modelo simples (caracterização simplificada)
- Modelo completo (caracterização padrão)

No caso da caracterização simplificada, são utilizados como *default* parâmetros detalhados obtidos para amostras de pelotas previamente analisadas. Neste caso, a caracterização dos mecanismos de fragmentação é realizada de forma simplificada. Inicialmente, a caracterização da fragmentação por impacto é realizada a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão de pelotas (ISO 4700). A resposta do

lote de produto por fragmentação por abrasão, por outro lado, é caracterizado utilizando o tambor de abrasão também empregado no ensaio de tamboramento ISO 3271, com a importante diferença que o material introduzido ao tambor é contido em uma faixa estreita de tamanhos (12,5 x 9,0 mm) e a geração de material fino é registrada. Em ambos os parâmetros de qualidade, o usuário poderá utilizar um valor médio, resultados periódicos ou, até mesmo, não utilizá-los. A Figura III.31 mostra a janela de edição da caracterização simples.

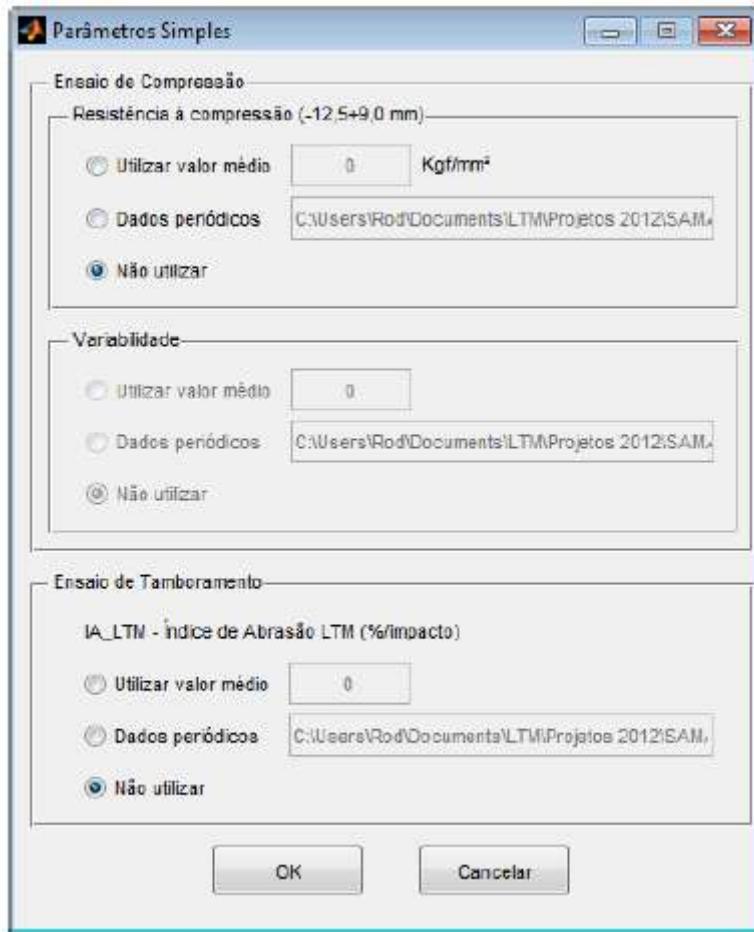


Figura III.31 – Janela de edição dos parâmetros da caracterização simples

No caso da caracterização padrão, todos os parâmetros do modelo devem ser introduzidos, sendo os mesmos obtidos a partir dos seguintes ensaios:

- Fratura de partículas em ensaios de compressão, registrando a curva força-deformação;
- Fratura de partículas em ensaios de autofratura;
- Fragmentação de partículas em ensaios de autofratura;

- Ensaio de tamboramento padrão LTM-COPPE.

A Figura III.32 mostra a janela de edição dos parâmetros da caracterização completa no simulador.

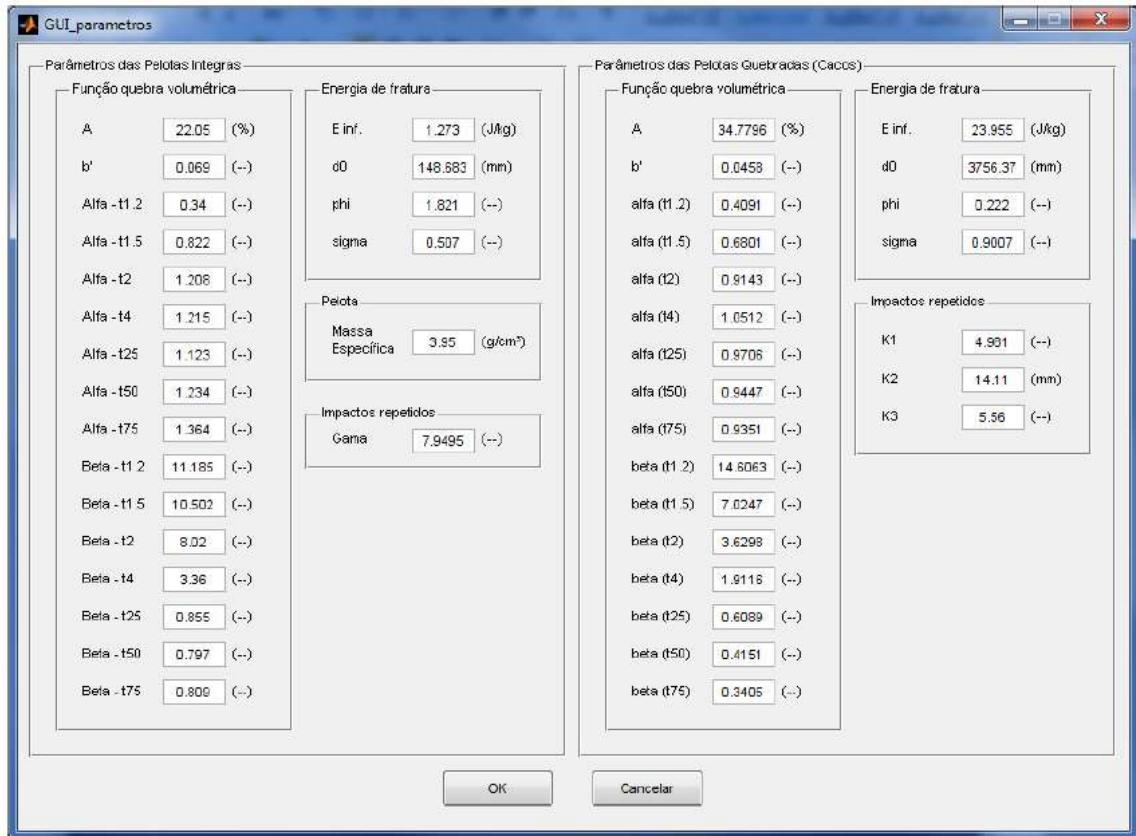


Figura III.32 – Janela de edição dos parâmetros completos do modelo de quebra

O módulo de “fluxograma” trata da inserção do circuito completo de manuseio. Por meio desse módulo o usuário utiliza o editor para introduzir a sequência de etapas de manuseio no simulador, com as opções de carregar, salvar e editá-lo, quando desejado. Nesse módulo são oferecidas as opções das operações listadas na Tabela III.2, sendo cada uma das opções representada por um ícone de fácil identificação.

Tabela III.2 - Lista das operações de transferências implementadas no simulador

Operação	Ícone	Descrição
Chute de transferência		Simula operação ocorrida em chutes de transferência
Shiploading		Simula operação ocorrida no carregamento de navios
Empilhamento		Simula queda ocorrida sobre pilhas de peletas
Queda		Simula operação de queda em diferentes superfícies sem a formação de pilhas
Lightringe		Simula a transferência de carga seja para outro navio quanto para balsas

A construção do fluxograma de manuseio no modo de edição do fluxograma é feita de maneira intuitiva, bastando o usuário clicar (selecionando) o ícone desejado na biblioteca de modelos e clicar no local onde este deve ser posicionado. Um exemplo de fluxograma construído é apresentado na Figura III.33. A manipulação do posicionamento é feita utilizando cliques de “arrastar e soltar”. Ao se encerrar a edição do fluxograma, o simulador retorna a tela de edição de níveis de modelo e parâmetros nos quais devem ser informados a complexidade do modelo utilizado para cada operação e os valores dos parâmetros requeridos pela descrição matemática de cada modelo.

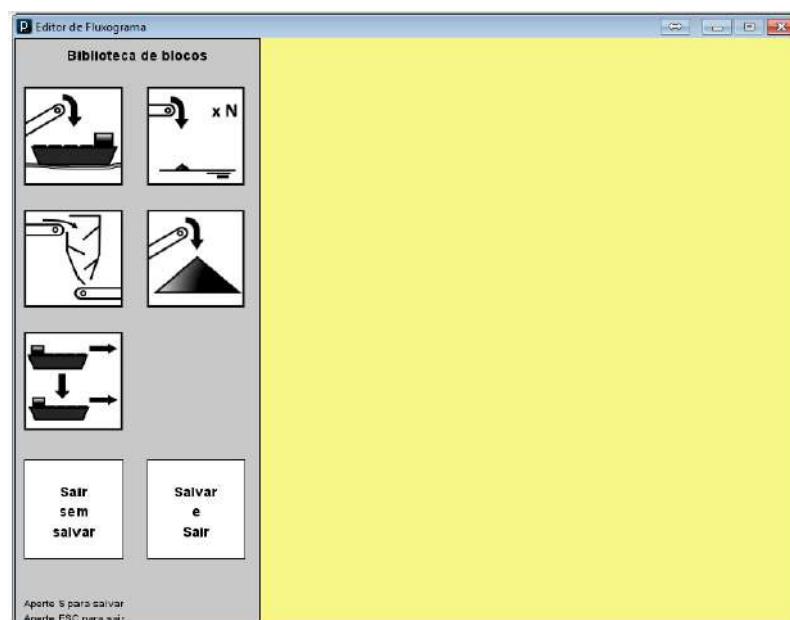


Figura III.33 – Imagem do editor de fluxogramas mostrando a biblioteca de ícones de operação pré-definidos (no lado esquerdo) e a área de construção do fluxograma (no lado direito)

Durante a etapa de descrição do fluxograma do circuito de manuseio, dependendo do tipo de operação, diferentes descrições matemáticas estão disponíveis no simulador, sendo essas classificadas em níveis de complexidade crescentes de 1 a 3, como mostrado na Tabela III.3

Tabela III.3 Lista de operações e níveis de complexidade dos modelos disponíveis no simulador

Operação	Níveis de modelos disponíveis no simulador
Chute de Transferência	<ul style="list-style-type: none"> • Nível 1 • Nível 2 • Nível 3
Shiploading	<ul style="list-style-type: none"> • Nível 1 • Nível 2 • Nível 3
Empilhamento	<ul style="list-style-type: none"> • Nível 1 • Nível 2
Queda	<ul style="list-style-type: none"> • Nível 1
Lighterage	<ul style="list-style-type: none"> • Nível 1

O módulo de “granulometria” do simulador permite ao usuário selecionar entre uma das duas seguintes opções:

- Digitar alimentação: introduzindo uma análise média para o carregamento que se deseja simular, discriminando entre a proporção de pelotas e cacos. Neste caso é possível salvar ou carregar a informação digitada em um arquivo para uso em diferentes projetos.
- Especificar a granulometria da alimentação via planilha de carregamento: introdução dos dados das análises de processo realizadas em algum ponto de amostragem do circuito.

Por fim, o módulo de “simulação” integra as informações dos módulos de Fluxograma, Granulometria e Caracterização, levando em consideração os modelos matemáticos utilizados em cada operação. A simulação abre o módulo de visualização de resultados.

Este, por sua vez, pode ser utilizado de diferentes maneiras:

- Resultado simples: permite visualizar em gráfico a granulometria final das pelotas após o último evento de transferência.
- Resultado completo: permite visualizar em gráficos a evolução das pelotas e seus fragmentos a cada etapa.
- Resultado do navio: quando o modelo de *Shiploading* nível 3 for utilizado na simulação, em conjunto com a planilha qualidade, esse módulo permitirá visualizar o resultado completo obtido para cada porão do navio.
- Exportar relatório: exporta todos os resultados para um arquivo externo ao software cujo formato permitirá que os dados contidos sejam facilmente transferíveis para planilhas.

IV. MODELAMENTO DA ALTURA DE QUEDA EM NAVIOS

O presente capítulo mostra o desenvolvimento do modelo para estimar a altura de queda da pelota dentro de embarcações, desenvolvido para aprimorar o modelo de previsibilidade da degradação, pois não se sabia, ao certo, como a pelota se comportava, em relação à altura de queda, durante o carregamento do navio, tendo em vista que esta etapa de manuseio é a mais crítica no processo de degradação da pelota durante o manuseio.

IV.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Este assunto é de suma importância, tendo em vista que o embarque de pelotas em navios é a etapa de manuseio mais agressiva em termos de degradação. Além disso, não se sabe ao certo qual é a altura de queda da pelota, pois este valor muda constantemente durante o carregamento do material no navio.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo capaz de estimar a altura de queda da pelota no porão do navio em qualquer período do carregamento. Apesar do mesmo ter sido desenvolvido a partir de dados de um porto em particular, o mesmo foi proposto de forma a ser aplicável a outros portos, a partir da informação da altura de operação do *shiploader* e dos diferentes tipos de navios.

O embarque de pelotas de minério de ferro ocorre em navios a granel que possuem grandes porões capazes de receber milhares de toneladas deste material. Para isso, é necessário utilizar sistemas de carregamento que possuem altas taxas de embarque, com o intuito de reduzir o tempo de operação.

Antes de se carregar um navio, o comandante precisa entregar para o inspetor de embarque o plano de carregamento. Neste documento, consta toda a sequência e o volume de pelotas a ser alimentado em cada porão, cujo objetivo é encher os porões de material de forma homogênea, buscando a estabilidade do navio.

Além disso, outro fator para redução deste resultado é o modo operacional do *shiploader*, pois existem carregadores de navios que não permitem movimentação vertical da lança enquanto outros têm sua operação restrita a uma altura mínima.

Considerando um *shiploader* que permite movimentação vertical da lança, a altura de queda, imediatamente no início do carregamento, pode ser definida como a soma da altura mínima da lança até a superfície do navio (HL) e a altura do porão vazio (HP), conforme mostrado na Figura IV.1.

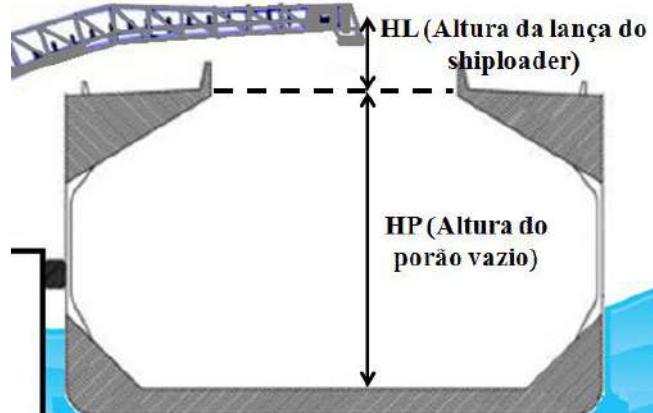


Figura IV.1 – Figura esquemática da altura de queda das pelotas do Shiploader até o porão

Portanto, para um determinado porto, quando o navio estiver vazio, a altura de queda inicial poderá ser calculada pela seguinte equação:

$$H_0 = H_L + H_P \quad (\text{IV.1})$$

onde H_0 é a altura de queda no início do carregamento para shiploader que possui movimentação vertical da lança, H_L é a altura mínima da lança do shiploader até a superfície do navio; e H_P é a altura do porão vazio.

Esta equação só é válida para sistemas de carregamento que possuem movimentação vertical, ou seja, um shiploader que opera com altura mínima de segurança em relação ao navio.

Para carregadores que não possuem movimentação vertical da lança, a altura de queda imediatamente no início do carregamento, ou seja, com o navio vazio, pode ser definida como a soma da distância da lança até o píer, a distância do píer até a lâmina d'água, considerando a maré baixa, e a altura de calado do navio Figura IV.2.

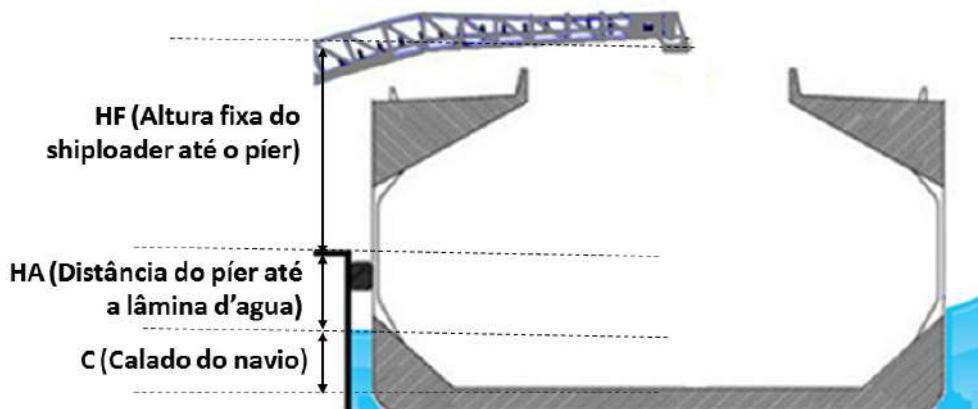


Figura IV.2 – Figura esquemática da altura de queda da pelota do Shiploader até o porão

Portanto, para um determinado porto, quando o navio estiver vazio a altura de queda inicial poderá ser calculada pela seguinte equação:

$$H_{0f} = H_F + H_A + C \quad (\text{IV.2})$$

onde, H_{0f} é a altura de queda no início do carregamento para shiploader com lança fixa, H_F é a distância da lança até o píer, H_A é a altura do píer até a lâmina d'água, considerando a maré baixa e C é a altura de calado do navio vazio;

Para períodos de maré mais elevada, deve-se subtrair este valor da equação, portanto:

$$H_{0f} = H_F + (H_A - \text{Maré}) + C \quad (\text{IV.3})$$

Imediatamente após o início do carregamento, ocorre a formação da pilha de pelotas dentro do porão, alinhado com o aumento do nível de calado devido ao peso da carga embarcada, ocasionando na variação da altura de queda da pelota. Este resultado é definido segundo um fator da variação da altura de queda (k) em função do volume embarcado em cada porão.

Portanto, a altura de queda pode ser descrita pelas equações $H = H_0 * k$, na qual H_0 é a altura de queda no início do carregamento para shiploader que possui lança com movimento vertical, ou $H = H_{0f} * k$, na qual H_{0f} é a altura de queda no início do carregamento para shiploader com lança fixa.

Para determinar este fator da variação da altura de queda, foi necessário realizar medições durante todo o período de carregamento em diversos tipos de navios para, com isso, definir uma curva que represente este fenômeno.

Para o desenvolvimento do modelo, coletou-se informações de altura de queda durante todo o período de carregamento em diferentes tipos de navio e para isso, foi utilizado um medidor de distância (trena a laser) de alta precisão ($\pm 1,5\text{mm}$) com alcance de 80 metros (Figura IV.3) para medir as alturas de queda da pelota do *shiploader* até o porão.



Figura IV.3 – Medidor de distância a laser utilizado nas coletas das informações de altura de queda (Bosch modelo GLM 80).

Tendo em vista que existem diferentes tipos de navios, com diferentes altura e quantidade de porão, foram propostas algumas variáveis importantes para o modelamento, que são:

- **TIPO DE NAVIO (NAVIO):** Foram considerados três tipos de navios: Panamax (até 55.000 tmn), Médio (de 55.000 até 100.000 tmn) e Capesize (acima de 100.000 tmn).
- **QUANTIDADE DE PELOTAS CARREGADAS NO NAVIO (TMN):** Determina se o carregamento está no início, meio ou no fim.
- **QUANTIDADE DE PELOTAS DENTRO DE CADA PORÃO (QUANT):** Avalia a utilização efetiva de cada porão.
- **NÚMERO DO PORÃO (PORÃO):** Se o porão carregado está perto da proa, poppa ou no centro do navio.

Após a definição das variáveis a serem estudadas, foi criado um plano experimental fatorial utilizando a ferramenta de análise do *StatGraphics* (Experimental Design). Visando entender o comportamento da altura de queda em todo o período do carregamento, foi proposto, inicialmente, realizar um planejamento fatorial 3^4 , sendo necessário realizar 81 medições. Entretanto, devido às dificuldades operacionais de se obter as informações de altura, foi proposto um experimento considerando uma análise de Box-Behnken, que reduziu o número de medições para 27 (MONTGOMERY, 1997).

Para coletar as medidas de altura de queda, o operador se posicionava na lança do shiploader e, com a trena a laser, fazia as medições durante do carregamento. A Figura IV.4 mostra um desenho esquemático da posição da trena a laser durante as medições das alturas.

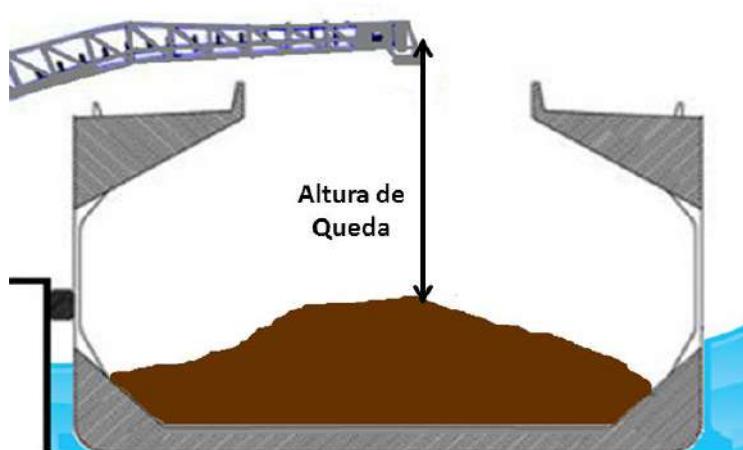


Figura IV.4 – Figura esquemática da altura de queda da pelota no porão do navio

Entretanto, durante as medições, vários problemas foram enfrentados para se obter os valores das alturas, como a indisponibilidade climática para fazer as medições e bloqueio de acesso à área portuária. Além disso, em várias situações, foi necessário

interromper o carregamento para que fosse feita as medições, pois a poeira dentro do porão impossibilitava o registro do valor da altura pela trena a laser.

Tendo em vista estas dificuldades, foi proposto um novo planejamento experimental mais compacto, chamado de Composto Reduzido de Draper e Lin, que é em um plano composto central que consiste em um plano fatorial fracionado de Plackett-Burman com menor resolução V (DRAPER e LIN, 1996). Com isso, para um plano com 4 fatores, necessitou-se de 18 medições, sendo uma réplica do ponto central, conforme mostrado na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 Combinações das variáveis utilizadas nas medições das alturas de queda.

NAVIO	TMN	QUANT	PORÃO	ALTURA (m)	ALTURA RELATIVA (k)
PANAMAX	INÍCIO	VAZIO	PROA	25,1	100%
PANAMAX	INÍCIO	CHEIO	POPA	21,0	84%
PANAMAX	MEIO	METADE	CENTRO	22,5	90%
PANAMAX	FIM	VAZIO	POPA	17,6	70%
PANAMAX	FIM	CHEIO	PROA	18,1	72%
MÉDIO	INÍCIO	METADE	CENTRO	24,3	90%
MÉDIO	MEIO	VAZIO	CENTRO	26,9	100%
MÉDIO	MEIO	METADE	CENTRO	20,4	76%
MÉDIO	MEIO	METADE	PROA	19,9	74%
MÉDIO	MEIO	METADE	POPA	21,0	78%
MÉDIO	MEIO	METADE	CENTRO	20,1	75%
MÉDIO	MEIO	CHEIO	CENTRO	18,0	67%
MÉDIO	FIM	METADE	CENTRO	16,0	59%
CAPESIZE	INÍCIO	VAZIO	PROA	28,3	100%
CAPESIZE	INÍCIO	CHEIO	POPA	22,6	80%
CAPESIZE	MEIO	METADE	CENTRO	16,9	60%
CAPESIZE	FIM	VAZIO	POPA	16,0	57%
CAPESIZE	FIM	CHEIO	PROA	15,1	53%

A altura relativa mostrada na Tabela IV.1 representa o fator k que descreve a variação da altura de queda em relação a altura máxima para cada tipo de navio. Esses dados foram descritos a partir de uma equação quadrática para as quatro variáveis, considerando interação entre elas.

A Figura IV.5 mostra a análise de resíduo para o fator k . Os pontos do gráfico apresentam-se de forma aleatória em torno da reta que corresponde ao resíduo zero. Dessa forma será de esperar que os erros sejam independentes, de média nula e de variância constante.

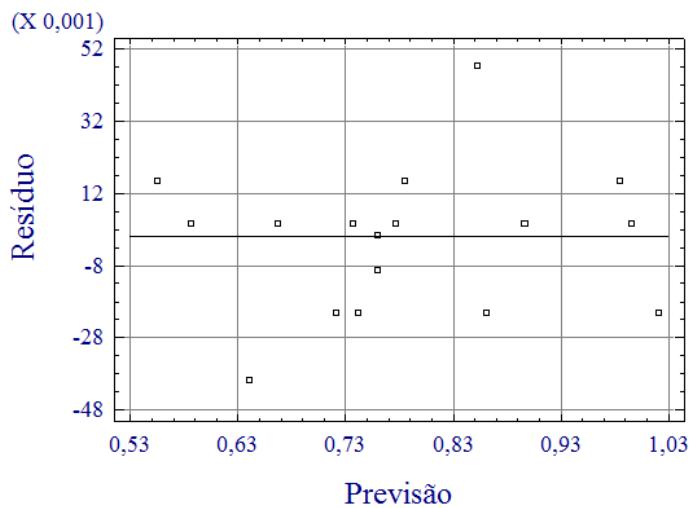


Figura IV.5 – Análise residual da altura relativa (k)

O Diagrama de Pareto apresentado na Figura IV.6 mostra que, dentre os efeitos principais, o tipo de navio, a quantidade de pelotas em cada porão e a tonelagem de pelota embarcada são as variáveis que mais tiveram influência sobre o fator k . O porão embarcado possui baixo efeito sobre o resultado.

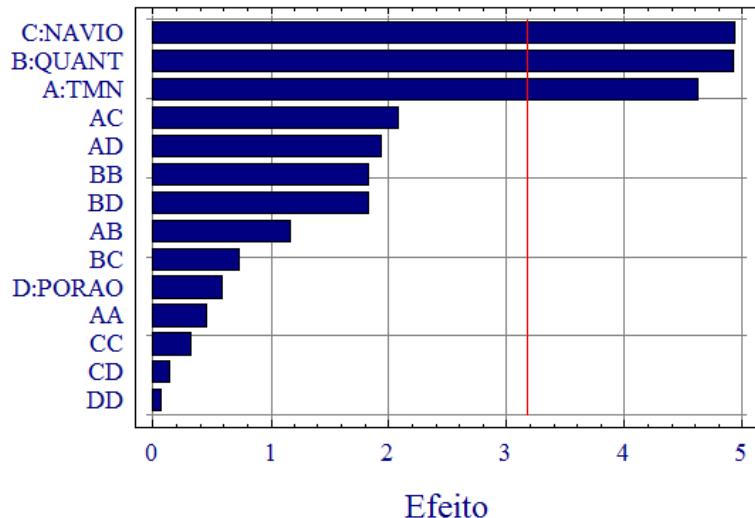


Figura IV.6 – Análise de Pareto do efeito das variáveis na altura relativa (k)

De acordo com a Figura IV.7, quanto maior a tonelagem de pelota embarcada e a quantidade de pelota em cada porão e quanto maior o tipo de navio, menor é a altura de queda da pelota. Além disso, quanto mais perto da proa do navio, menor é a altura de queda. Entretanto, o baixo efeito da última variável mostra que esta análise pode ser considerada inconsistente.

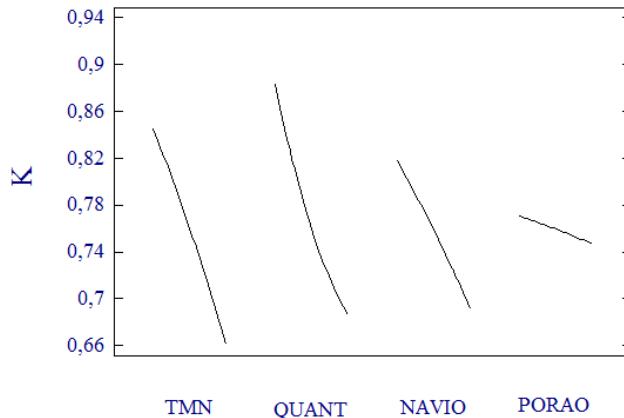


Figura IV.7 – Análise do efeito de cada variável na altura relativa (k)

Portanto, com base na análise de regressão das informações das medidas de altura de queda foi possível propor um modelo empírico, que permita avaliar o comportamento da altura de queda da pelota no porão do navio durante o carregamento no navio, sendo descrito pela seguinte equação:

$$k = 0.759 - 0.092 * TMN - 0.098 * QUANT - 0.063 * NAVIO - 0.012 * PORAO - 0.006 * TMN^2 + 0.031 * TMN * QUANT - 0.035 * TMN * NAVIO - 0.051 * TMN * PORAO + 0.025 * QUANT^2 - 0.013 * QUANT * NAVIO + 0.048 * QUANT * PORAO - 0.005 * NAVIO^2 + 0.003 * NAVIO * PORAO - 0.001 * PORAO^2 \quad (IV.4)$$

sendo, TMN a tonelagem embarcada (início: -1, meio: 0 e fim: 1), $QUANT$ a quantidade de pelotas dentro do porão (vazio: -1, metade: 0 e cheio: 1), $NAVIO$ é o tipo de embarcação (Panamax: -1, Médio: 0 e Capesize: 1) e $PORAO$ é a posição do porão sendo carregado (proa: -1, centro: 0 ou popa: 1).

Portanto, generalizando a equação da altura de queda de forma que a mesma possa ser utilizada em qualquer porto, tem-se a seguinte expressão:

$$H = (H_{of} \text{ ou } H_0) * k \quad (IV.5)$$

na qual H_{of} é a altura de queda no início do carregamento para Shiploader com lança fixa; H_0 é a altura de queda no início do carregamento para Shiploader que possui movimentação vertical da lança; k é o fator de variação da altura de queda em função do volume embarcado em cada porão.

IV.2 APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Este modelo foi desenvolvido a partir de medições de altura de queda realizadas o Shiploader que operava no porto da Samarco, localizado em Ponta Ubu (Figura III.11), até 2014, cuja altura inicial de operação podia variar de 5 a 8 metros, dependendo do porte da embarcação. Além disso, navios Panamax e Capesize possuem, aproximadamente, porões com altura de 18 e 24 metros, respectivamente.

O cálculo da altura de queda de queda durante o carregamento é realizado à partir da alimentação das informações provenientes do plano de carregamento, informado pelo comandante do navio, que determina a sequência de embarque a ser empregada (Tabela IV.2)

Tabela IV.2 Plano de embarque para um navio Capesize.

PLANO DE CARREGAMENTO		
SEQUENCIA	PORÃO	TMN
1	7	12000
2	5	12000
3	4	10000
4	9	10000
5	6	14000
6	3	10000
7	2	10000
8	1	10000
9	8	12000
10	5	9100
11	1	8500
12	9	8500
13	6	4400
14	2	7700
15	8	6200
16	3	10000
17	7	9100
18	4	8500
19	8	2000
20	2	2000

O plano de embarque mostrado na Tabela IV.2 representa um carregamento de um navio Capesize de 9 porões, com volume total de 163.500 tmn. Considerando que o navio possui porões com 24 metros de altura e o Shiploader possui movimentação vertical na lança de carregamento e sua altura mínima de operação é de 5 metros, conclui-se que a altura de queda no início do carregamento equivale a 29 metros.

Portanto, para este carregamento tem-se a seguinte expressão para cálculo das alturas de queda:

$$H = (5 + 24) * k \quad (\text{IV.6})$$

na qual o k é calculado para todo o período de carregamento, que vai de 0 a 100% (0 a 1) de material carregado.

A Figura IV.8 mostra o perfil da altura de queda da pelota no porão no navio em questão durante todo o período do carregamento, caracterizado pelo status, em %.

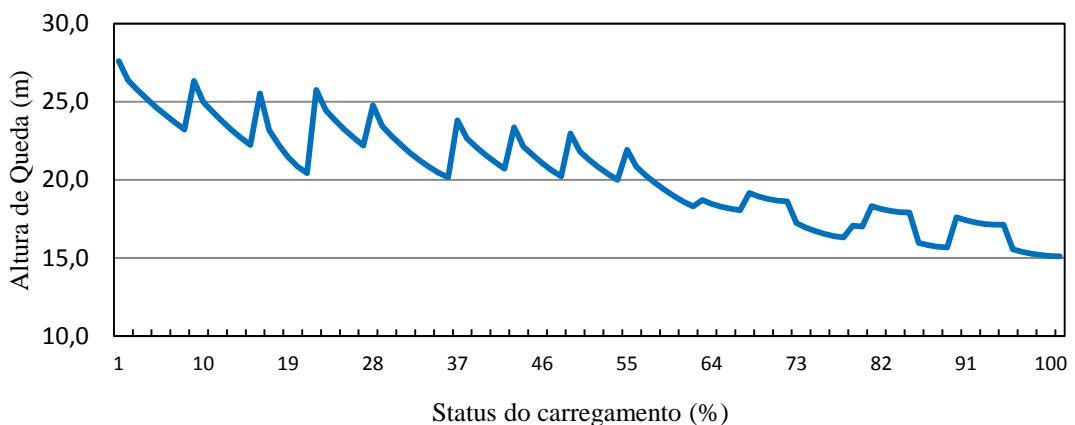


Figura IV.8 – Perfil da altura de queda durante todo o período de carregamento (relativo ao plano apresentado na Tabela IV.2)

Pode-se observar que a altura de queda diminui com o carregamento do porão e aumenta quando ocorre a troca de porão. Após, aproximadamente, 60% de carregamento, a variação de altura é mínima, pois ocorre somente uma distribuição de carga nos porões para nivelamento do calado do navio. A altura mínima neste caso foi de, aproximadamente, 15 metros e a média foi 20 metros. A mediana situou-se entre 19 e 20 metros (Figura IV.9).

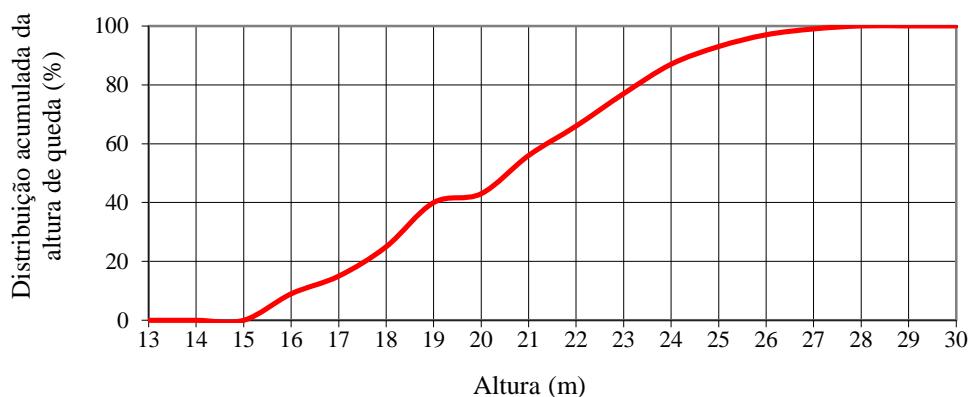


Figura IV.9 – Distribuição acumulativa da altura de queda relativa ao plano de carregamento apresentado na Tabela IV.2

Com o aumento da capacidade de produção da SAMARCO, a empresa precisou substituir o shiploader por um com maior capacidade de embarque (Figura IV.10). Entretanto, este novo equipamento é mais alto quando comparado com o anterior, sendo necessário validar o modelo para o mesmo.



Figura IV.10 – Novo Shiploader da Samarco, em Ponta Ubu.

O projeto deste novo equipamento incluiu a construção de uma passarela abaixo da correia da lança, restringindo o movimento vertical da lança, aumentando ainda mais a altura mínima da lança em relação ao shiploader, quando comparado ao shiploader antigo.

Portanto, para validação do modelo, foram realizadas novas medições de altura de queda, utilizando a mesma trena a laser, em um navio de porte Capesize, cujo volume embarcado foi de 180 mil toneladas de pelotas. Paralelamente, utilizou-se o modelo desenvolvido para simular as alturas. Para o cálculo, foi considerado que a altura mínima do novo Shiploader (H_L) é de 15 metros e que a altura do porão vazio (H_P) para um navio Capesize de 24 metros, chega-se a uma altura máxima no início do carregamento (H_0) de 39 metros. A Tabela IV.3 mostra uma comparação dos resultados de altura de queda medidos no novo Shiploader da Samarco e os valores calculados através do modelo desenvolvido

Tabela IV.3 Comparação dos valores da altura de queda medida e calculada no novo Shiploader da Samarco.

NAVIO	TMN	QUANT	PORÃO	ALTURA	
				MEDIDA	CALCULADA
CAPESIZE	INÍCIO	VAZIO	POUPA	35,12	36,03
CAPESIZE	FIM	CHEIO	POUPA	22,91	21,57
CAPESIZE	FIM	CHEIO	PROA	23,58	21,71
CAPESIZE	FIM	CHEIO	CENTRO	23,34	22,53
CAPESIZE	INÍCIO	VAZIO	CENTRO	37,89	38,24

A Figura IV.11 mostra uma análise estatística para dados emparelhado (*Paired T-Test*) realizada no software Minitab®. O resultado deixa claro que os resultados de altura de queda medida e calculado são estatisticamente similares.

Paired T-Test and CI: MEDIDA; CALCULADA				
Paired T for MEDIDA - CALCULADA				
	N	Mean	StDev	SE Mean
MEDIDA	5	28,57	7,32	3,27
CALCULADA	5	28,02	8,37	3,74
Difference	5	0,552	1,159	0,518

95% CI for mean difference: (-0,887; 1,991)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,06 P-Value = 0,347

Figura IV.11 – Análise estatística comparando os valores de altura medidos e calculados.

Durante o período de parada das operações da Samarco, a equipe de projetos realizou a manutenção do novo Shiploader, retirando toda a estrutura abaixo da correia da lança, fazendo com que a altura da lança até o navio reduzisse em torno de 5 metros. Entretanto, não foi possível validar este modelo após a alteração, pois as operações da empresa continuam paralisadas.

Portanto, este modelo, poderá ser utilizado para determinar o perfil da altura de queda da pelota durante todo o carregamento, obtendo assim a altura média de queda em cada porão e, com isso, com a utilização do simulador LTMPHS, determinar a degradação da pelota após o embarque. Além disso, a utilização deste modelo permite a simulação de vários planos de carregamento, visando minimizar a degradação da pelota durante o embarque.

V. NOVO EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE QUEBRA SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA DE PELOTAS

O presente capítulo apresenta e valida a utilização de um novo equipamento de análise de fragmentação superficial e volumétrica, comparando os resultados da caracterização da pelota realizada no laboratório LTM/COPPE com os valores obtidos neste equipamento.

V.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Tendo em vista os inúmeros estudos referentes ao entendimento do comportamento mecânico de minérios, diversas metodologias de caracterização em laboratório têm sido implementada. Estes ensaios podem ser classificados de acordo com o número de pontos de contato entre a partícula e a superfície, e a velocidade (taxa) de carregamento. São estes: impacto simples, impacto duplo, ou compressão lenta (Figura V.1).

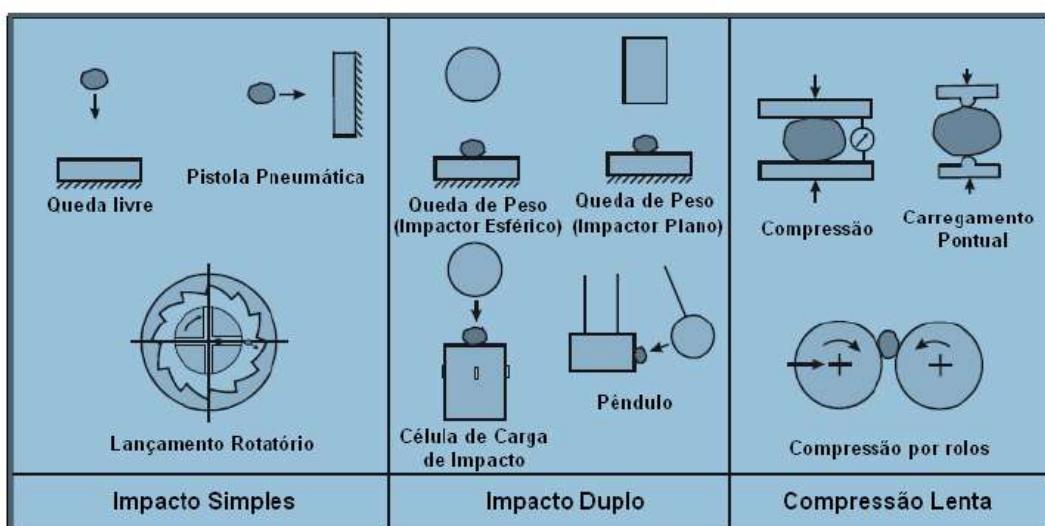


Figura V.1 – Classificação dos ensaios de fratura (modificado de TAVARES 2007).

Tanto o ensaio na Célula de Carga de Impacto (CCI), quanto o ensaio de queda de peso (DWT) são testes eficazes na caracterização do minério quanto as suas propriedades de quebra, entretanto, os mesmos podem ser influenciados pela ação do impacto duplo em seus resultados. Já os testes de Auto-Fratura e Abrasão não possuem esta influência de impacto duplo, no entanto, possuem uma limitação de uso para ensaios que requerem elevadas energias.

Com isso, foi proposto um equipamento de análise de quebra superficial e volumétrica de pelotas capaz de simular elevadas energias através de impactos simples (Figura V.2).



Figura V.2 – IDEA - Impact Degradation Energy Analyzer.

Este equipamento, chamado IDEA (*Impact Degradation Energy Analyzer*), que foi desenvolvido em conjunto entre a Samarco Mineração S/A, a AUTOMATICA TECNOLOGIA S/A e o LTM/COPPE, consiste em um analisador da quebra de partículas para caracterização da energia de fratura por impacto, através de pesagem individual das pelotas (antes e após cada impacto) e separação automática de cacos e pelotas íntegras.

O projeto de fabricação do IDEA objetivou o desenvolvimento de um equipamento que pudesse dispor do máximo de informações possível para uma completa caracterização necessária para definição da energia de degradação da pelota, permitindo a obtenção das mesmas de forma expedita. Neste caso, foi proposto utilizar um equipamento que fornecesse tanto informações de quebra por compressão, quanto por impacto simples. Com isso, dependendo do tipo do ensaio selecionado na tela de operação do sistema, uma pelota é direcionada ou para a prensa de compressão ou para a entrada do equipamento rotativo de impacto.

Para eliminar qualquer ruído na balança do IDEA, a prensa de compressão foi posicionada em uma estrutura externa ao equipamento, a qual, é composta por um duto de entrada de pelotas que direciona a pelota até o elevador de caneca (Figura V.3).

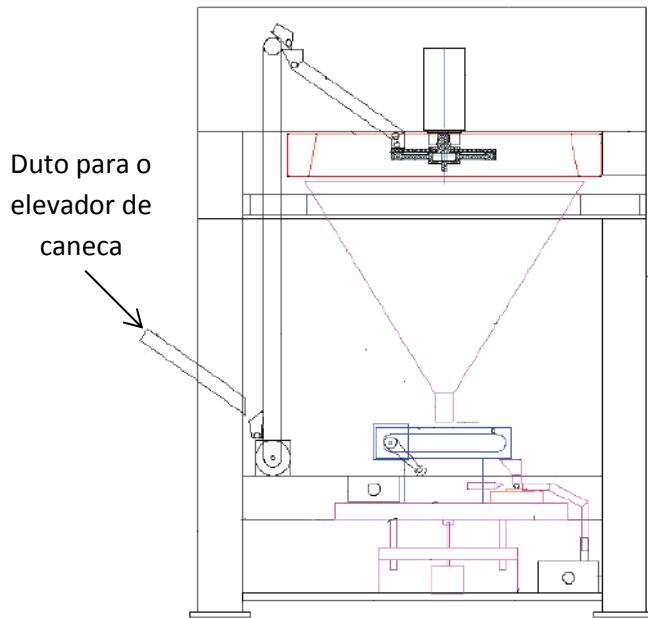


Figura V.3 – Diagrama esquemático do equipamento de análise de quebra de pelotas.

Como o ensaio de fratura ocorre de forma individual, foi proposto um sistema de alimentação de pelota que minimizasse a influência de degradação através de tubo condução. Cada pelota é alimentada com o rotor parado na posição de alimentação. O rotor possui um disco e uma capa que, por meio de molas, mantém a capa na posição de fechar o receptáculo da pelota, localizado no disco (Figura V.4). Uma vez alimentada a pelota, o conjunto é acionado por um servo-motor com velocidade controlada, por meio de um driver para servomotor, que gira a uma frequência que varia continuamente de 0 a 4000 RPM. Ao ser atingida a velocidade desejada, o controlador comanda a desaceleração brusca da capa. O disco com a pelota mantém a velocidade programada por inércia. A defasagem momentânea entre as velocidades da capa e do disco abre a porta do receptáculo liberando a pelota.

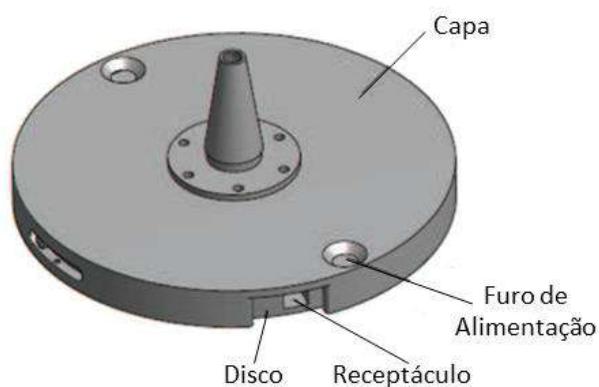


Figura V.4 – Vista 3D do rotor acelerador de pelotas

A bigorna de impacto foi projetada como uma estrutura circular em volta do rotor, com 45 cm de diâmetro, feita de aço endurecido para servir de anteparo de impacto das pelotas lançadas pelo rotor. Esta bigorna tem as paredes inclinadas em 10 graus em relação a vertical de forma a minimizar o rebote das pelotas contra o rotor, como mostra a Figura V.5.

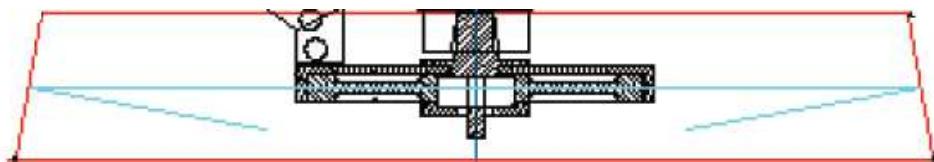


Figura V.5 – Vista de perfil da bigorna de impacto de pelotas, mostrando o rotor ao centro.

Para transformar a velocidade de rotação do equipamento em energia específica de impacto (E), foi utilizada a Equação V.1.

$$E \left(\frac{J}{kg} \right) = \frac{1}{2} \left(2\pi * \frac{\omega}{60} * r \right)^2 \quad (\text{V.1})$$

sendo, π a constante matemática que equivale, aproximadamente, 3,14, ω é a velocidade angular em rpm e r o raio do rotor.

Adjacente e abaixo da bigorna de impacto, o IDEA possui um funil fabricado em aço inoxidável revestido com borracha, a fim de minimizar a degradação quando houver projeção das pelotas na sua superfície. O funil direciona todo material, sejam pelotas ou fragmentos, para um dispositivo de separador de cacos, agindo como uma peneira de rolos (Figura V.6). O funcionamento deste dispositivo está sincronizado com o sentido da esteira. Neste caso, quando a esteira se movimenta para o recipiente de cacos, o dispositivo de rolos atua com uma abertura suficientemente pequena capaz de reter as pelotas íntegras e liberar os cacos para seu respectivo recipiente. Quando a esteira se movimenta no sentido da balança de pelotas, o dispositivo de rolos se abre totalmente para a passagem das pelotas.

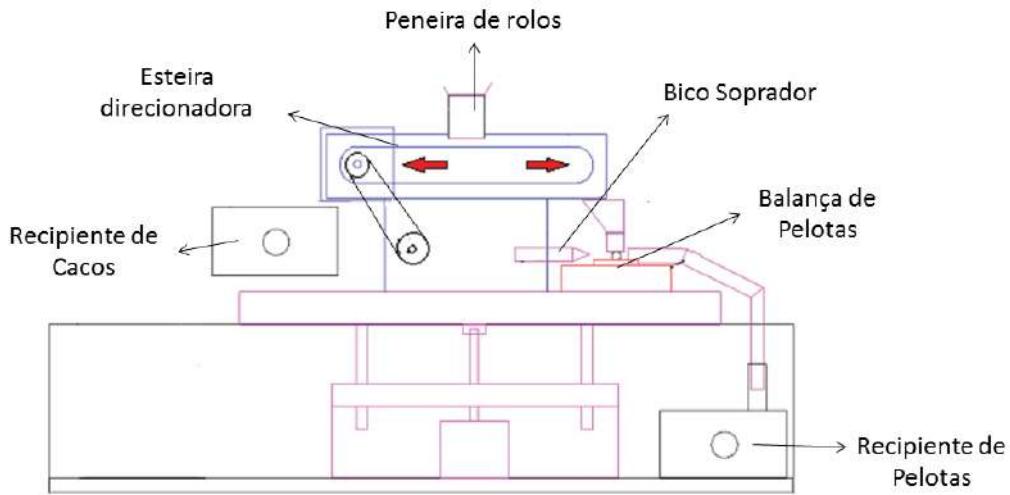


Figura V.6 – Vista esquemático do sistema de separação caco-pelota na base do equipamento.

Para o monitoramento das perdas mássicas das pelotas íntegras nos impactos, foram instaladas no IDEA balanças de precisão que registram as massas da pelota antes e após cada impacto.

Os primeiros testes realizados durante a etapa de comissionamento do IDEA identificaram que os resultados de degradação da pelota no IDEA estavam muito superiores com os resultados obtidos no LTM, utilizando teste de auto-fratura por queda livre. Com isso, a equipe do LTM realizou novamente várias simulações utilizando processo de simulação em EDEM para tentar identificar o que poderia estar influenciando no resultado de degradação. As análises preliminares já apontaram que as pelotas estavam sendo submetidas a vários impactos de forma aleatória, não sendo possível ajustá-las através de fator de correção (Figura V.8)

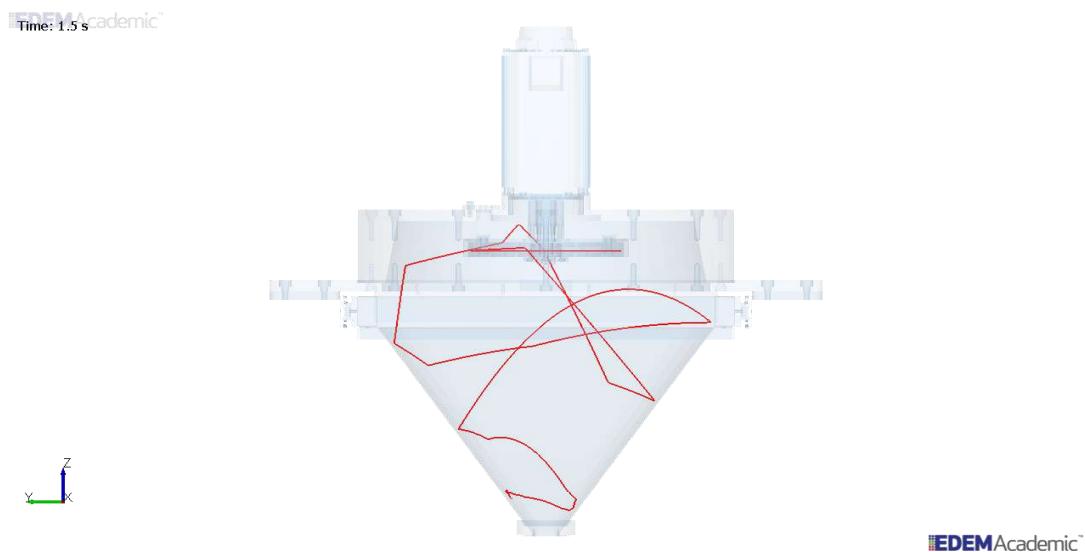


Figura V.8 – Simulação do IDEA em EDEM.

Uma solução proposta para minimizar este efeito do “ricochete” ou impactos

secundários foi a utilização de dois anteparos de borracha em formato de cruz (90 graus entre os planos), um imediatamente abaixo da bigorna de impacto, terminando na abertura da gaveta do funil, e outro na parte inferior, no interior do funil (Figura V.9).

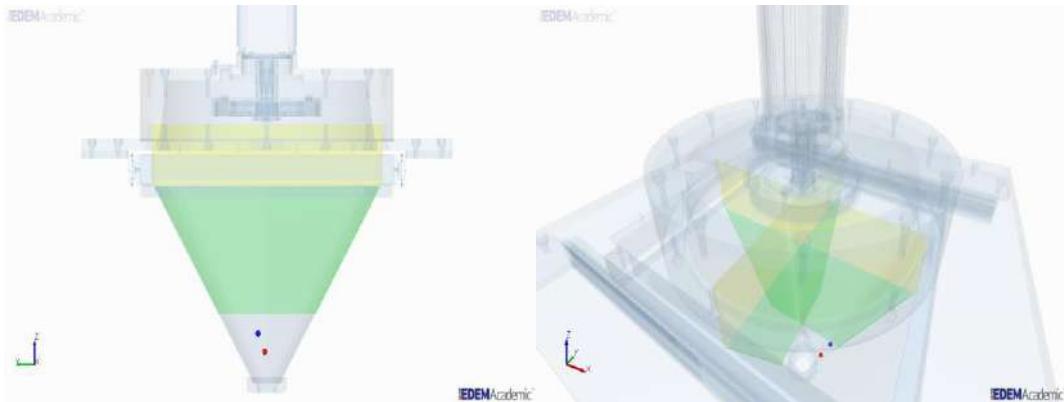


Figura V.9 – Simulação do IDEA em EDEM.

De acordo com a Figura V.10, a utilização das cruzetas mostrou-se como uma solução que resolveu, ao menos parcialmente, o efeito de ricochete durante a projeção de pelotas no equipamento.

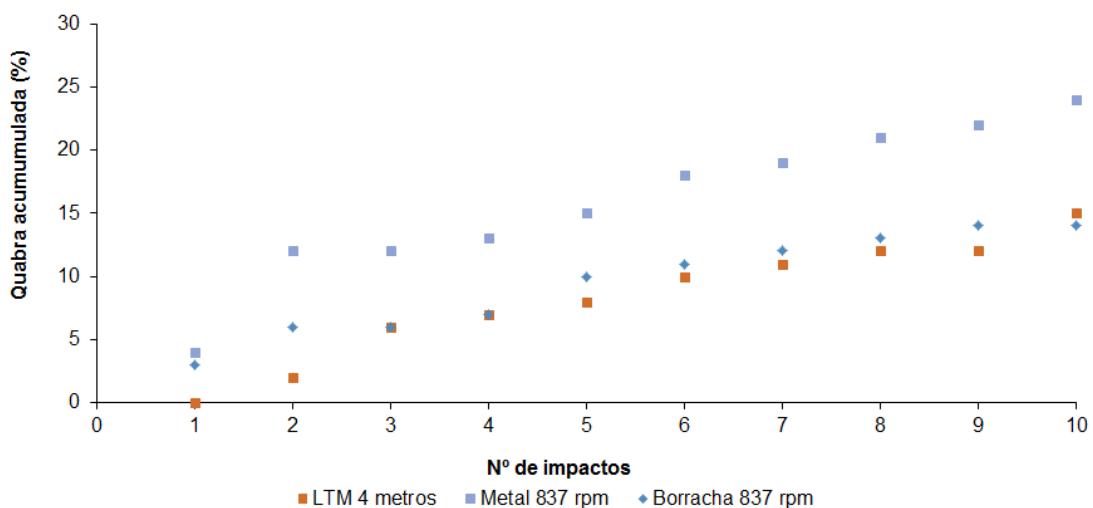


Figura V.10 – Comparação dos resultados do IDEA após a instalação das cruzetas.

Novos testes de validação foram realizados durante a etapa de comissionamento do equipamento, entretanto, foi identificado que, para uma determinada energia de impacto, a intensidade de degradação da pelota se ainda mostrava superior àquela obtida nos ensaios auto-fratura por queda livre, realizados no LTM. Com isso, a equipe do LTM realizou novamente várias simulações utilizando processo de simulação em EDEM a fim de identificar o que poderia estar causando tal efeito. Inicialmente, foi

identificado que, devido a inclinação da bigorna de impacto, o ângulo médio de impacto variava entre 57° a 59° (Figura V.7), com isso, as energias utilizadas não coincidiam com as alturas de queda de teste de auto-fratura.

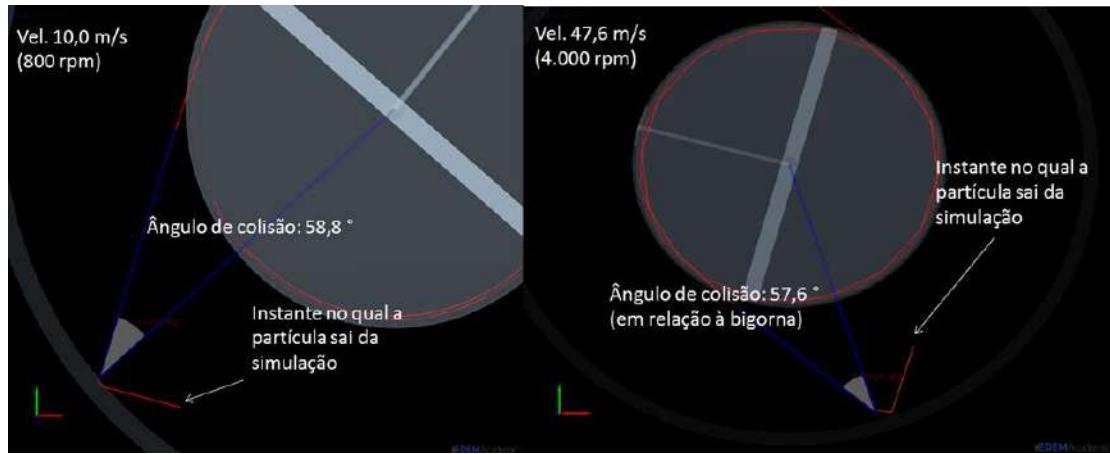


Figura V.7 – Simulação do IDEA em EDEM

Neste estudo, foram realizados ensaios considerando diferentes ângulos de impacto em dois tipos de pelotas (Pelota A e Pelota B), a fim de permitir a análise da influência das componentes normal e tangencial da energia de impacto na probabilidade de fratura de pelotas. A figura V.8 mostra os resultados da fração quebrada em função da energia de fratura para diferentes ângulos de impacto.

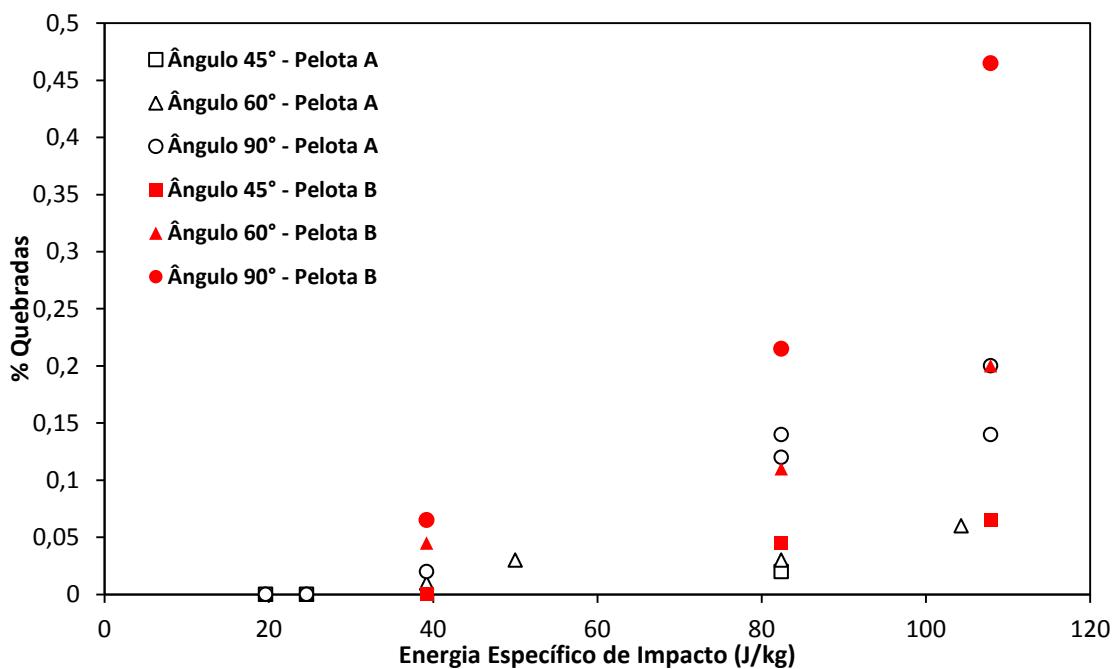


Figura V.8 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos contidos na faixa de tamanho 12,5-9,0 mm quebrados em um único impacto em função da energia específica de impacto para as pelotas A e B para diferentes ângulos de impacto

Apesar do aumentar da proporção de material quebrado com o aumento da energia específica de impacto, pode-se concluir que, o ângulo de impacto tem influência na probabilidade de quebra por impacto (DAN E SCHUBERT, 1990; SALMAN et al., 2003). Portanto, considerando que a probabilidade de ruptura do corpo é uma função apenas da energia específica de impacto normal (E_n), no qual, seu cálculo é realizado através da equação $E_n = E * \text{sen}^2\theta$, então os dados de quebra da Figura V.8 são agora apresentados como uma função de E_n (Figura V.9).

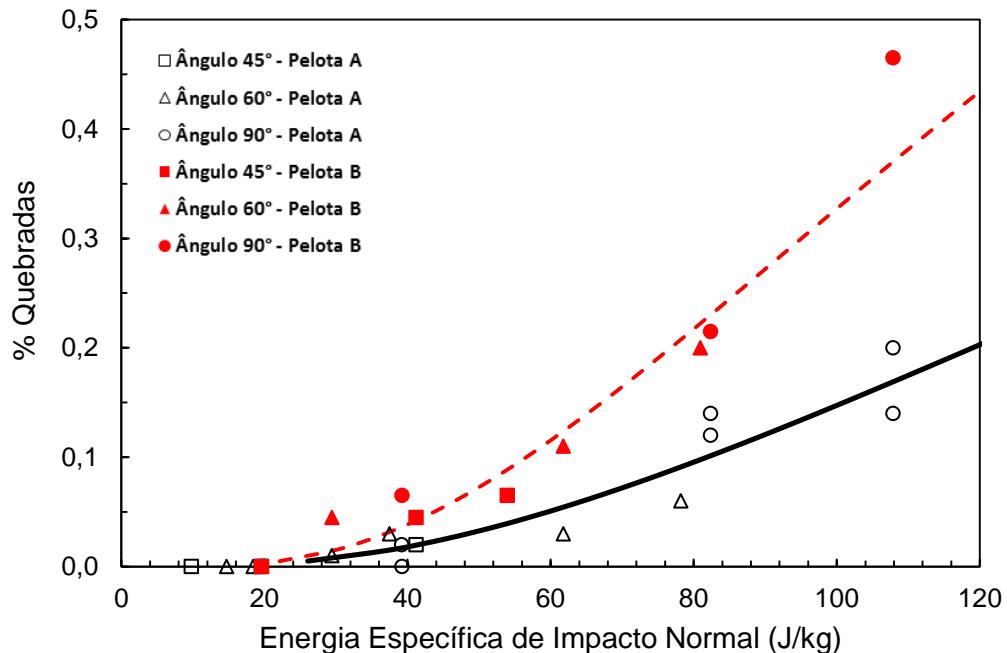


Figura V.8 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos contidos na faixa de tamanho 12,5-9,0 mm quebrados em um único impacto em função da energia específica de impacto normal para as pelotas A e B para diferentes ângulos de impacto. Os símbolos representam os pontos e linhas de dados que a curva se ajusta

De posse destas informações e do ângulo de impacto, foi possível propor um fator de correção das energias para cada nível de rotação e para cada tamanho de pelota utilizadas no IDEA. Com isso, os resultados que serão apresentados a seguir, tiveram como objetivo validar os testes obtidos no equipamento de análise de quebra de pelotas, comparando com o resultado experimental de um ensaio de manuseio conduzido em laboratório.

V.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PELOTAS

Para poder validar este novo equipamento, foi realizado no laboratório LTM/COPPE os ensaios de Auto-Fratura, analisando a energia de fratura e a perda por abrasão, além do teste compressão, sendo utilizadas duas amostras de pelota de minério de ferro. Além

disso, foi investigada a influência do ângulo de impacto na fragmentação de pelotas. Esse efeito é importante pois, conforme é mostrado na Figura V.7, no caso do IDEA impactos ocorrem contra a superfície da bigorna a um ângulo de aproximadamente 60° em relação à normal.

As amostras utilizadas consistiram em dois diferentes tipos de pelotas queimadas, denominados: Pelota de Redução Direta (PDR) e Pelota de Alto Forno (PBF), restrita na faixa granulométrica entre 12,5 e 9,0mm e características próprias para estes tipos de produtos.

V.2.1 Energia de fratura por compressão

O ensaio de compressão (ISO4700) não têm a pretensão de avaliar a susceptibilidade da pelota degradar-se durante o manuseio. Nos ensaios de compressão as partículas são fraturadas por meio de carregamento lento e controlado. O equipamento usado para pelotas de minério de ferro é a prensa.

Sabe-se que a energia específica de fratura mediana é a energia a qual metade da população da amostra em questão necessitou para se fraturar volumetricamente. Para se determinar a energia de fratura de cada ensaio de compressão foram realizados testes individuais em 100 pelotas e calculada a área abaixo da curva Força (N) x Deslocamento (mm) até o ponto de carga máxima, no qual ocorre a ruptura da pelota, conforme é ilustrado na Figura V.11.

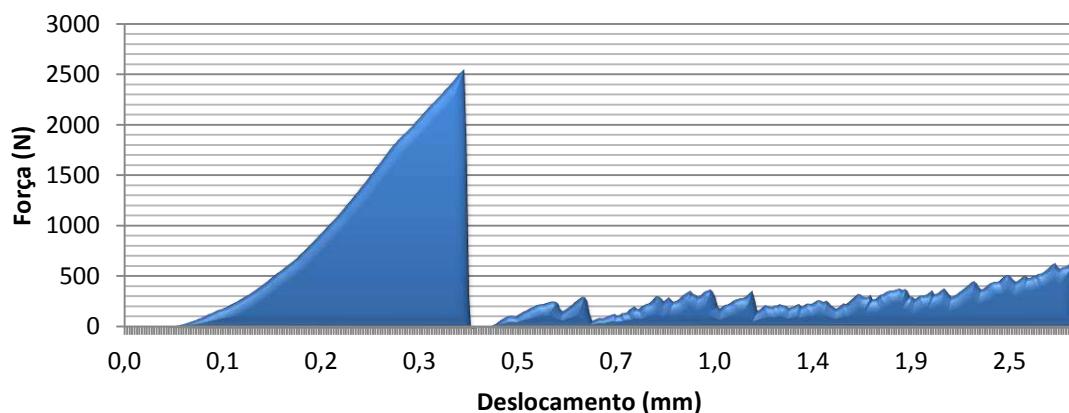


Figura V.11 – Gráfico típico de força versus deslocamento de uma pelota da amostra PBF para a obtenção da energia (J)

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. 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.

A Figura V.12 apresenta o gráfico de Escores Normais das Energias Específicas de Fratura de Compressão das pelotas PDR e PBF, respectivamente, bem como sua curva ajustada na distribuição Log-Normal Truncada. Observa-se que a pelota PBF, além de apresentar uma distribuição mais bem-comportada, possui energia de fratura de compressão mais elevada que a pelota PDR.

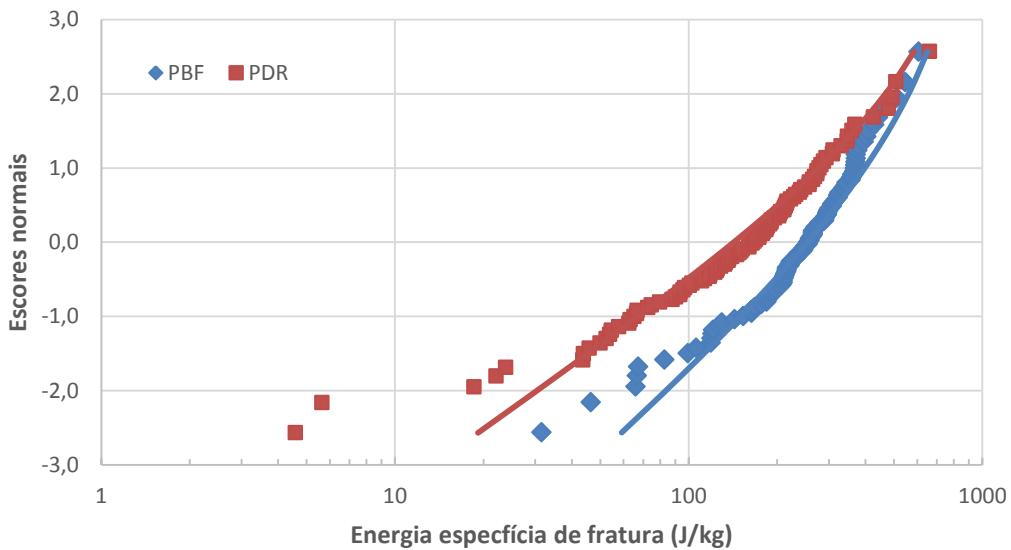


Figura V.12 – Distribuição de energias de fratura por compressão de pelotas BF e DR para partículas contidas na faixa de 12,5 x 9,0 mm

A partir do desvio padrão (σ), energia específica de fratura mediana (E_{50}) e truncamento superior (E_{\max}) da distribuição de cada amostra, no qual, os valores são apresentados na Tabela V.1, determinou-se as curvas ajustadas da distribuição das Energias Específicas de Fratura de Compressão das pelotas.

Tabela V.1 – Valores da Energia de Fratura (E_{50}), Desvio-Padrão (σ) e Truncamento (E_{\max}) das distribuições em função do tamanho das Pelotas PDR e PBF

Pelota	E_{50} (J/Kg)	E_{\max} (J/Kg)	σ
PDR	341,03	1000	0,659
PBF	165,94	1000	0,833

Sabendo que 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, obtida a partir deste ensaio, pode ser comparada com os resultados obtidos no IDEA, sendo necessária a multiplicação de um fator de ajuste da curva log-normal truncada, conforme mostrado nas Figuras V.13 e V.14.

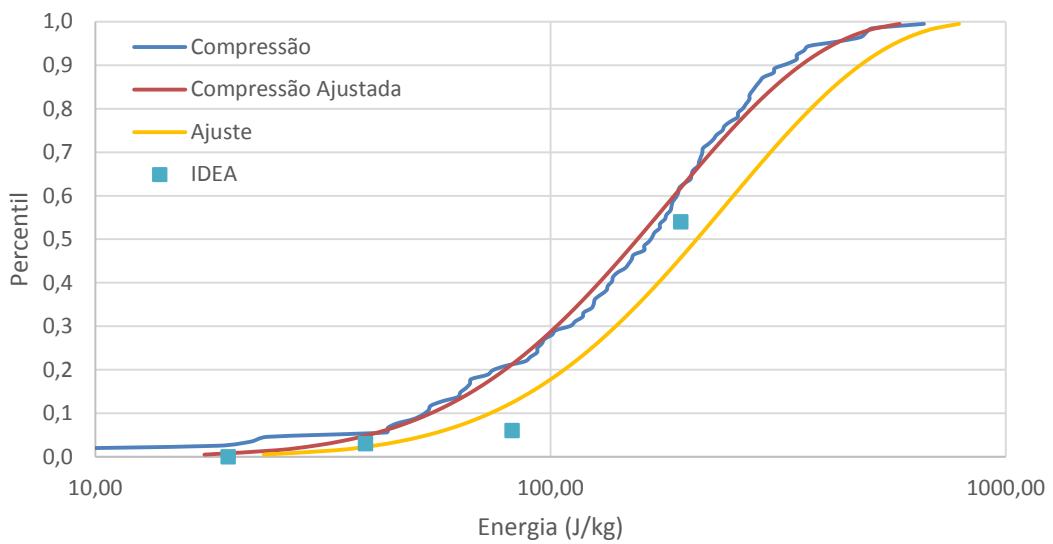


Figura V.13 – Comparação das energias específicas de fratura de compressão e os resultados do IDEA para amostra PBF, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são os modelados

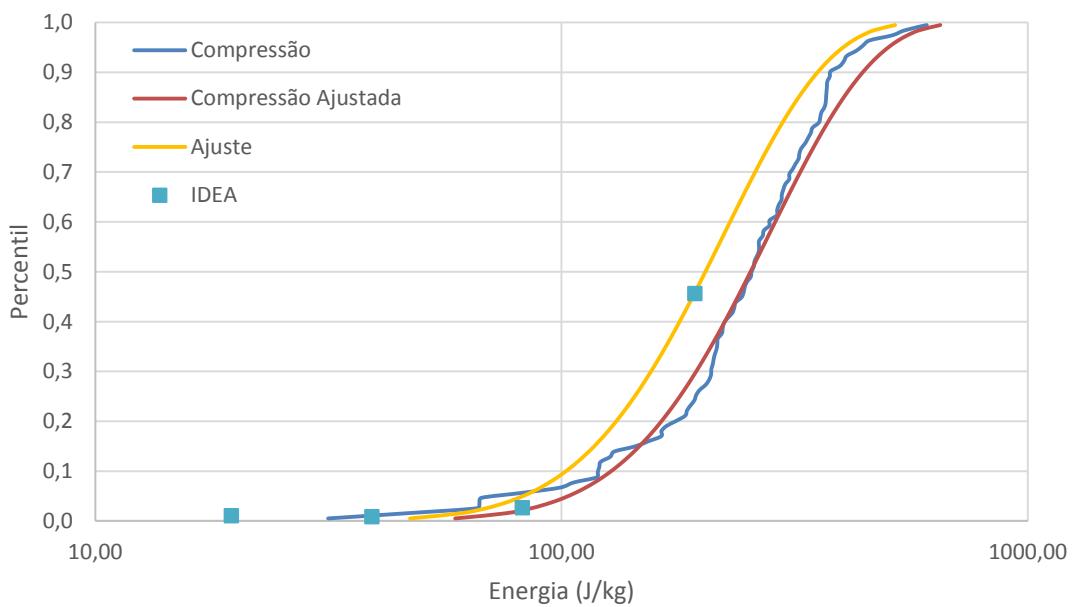


Figura V.14 – Comparação das energias específicas de fratura de compressão e os resultados do IDEA para amostra PDR, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são os modelados

V.2.2 Caracterização por Auto-Fratura

Nesta seção serão apresentados apenas os resultados de probabilidade de quebra referentes aos impactos simples, oriundos dos ensaios de Autofratura, pois, é o teste que melhor representa o fenômeno de degradação considerando a queda de pelota em uma determinada superfície.

O Ensaio de Auto Fratura são testes de impactos repetidos, que simula os eventos que ocorrem durante o manuseio de pelotas que são predominantemente por meio de queda

livre (impacto simples). Este ensaio consiste em lançar um minério em um tubo com altura máxima de 8,4 metros sobre uma superfície de aço (Figura V.15).

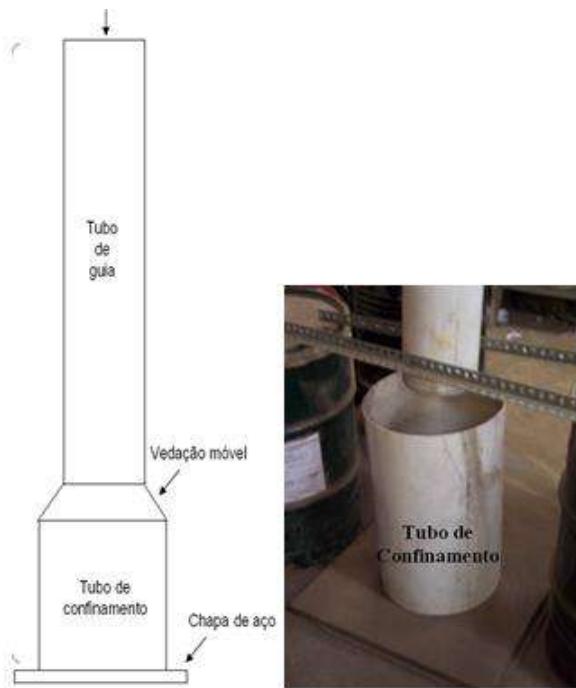


Figura V.15 - Diagrama esquemático do sistema de transferência montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.

Devido a limitação de espaço físico no laboratório, o ensaio de Auto-Fratura foi realizado considerando energias menores que contemplam alturas de 1,0m, 2,0m, 4,0m e 8,4m. Com isso, este ensaio mede a energia de impacto pela altura de queda, entretanto, o mesmo só analisa a parte inferior da curva no ensaio de Auto-Fratura.

Com as Energias Específicas de Fratura de Compressão das pelotas obtidas, 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 através do teste de Auto-Fratura e comparando com os resultados obtidos no IDEA, conforme mostrado nas figuras V.16 e V.17.

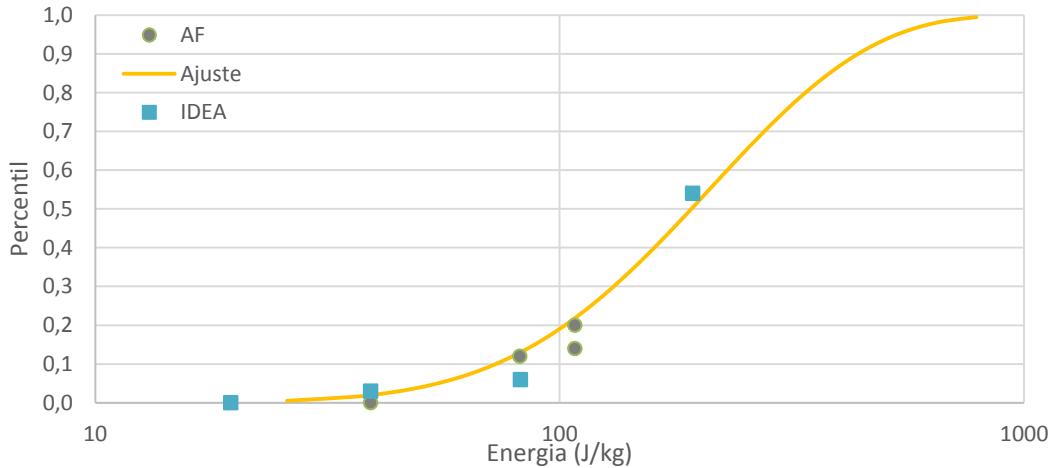


Figura V.16 – Comparação da curva ajustada das Energias Específicas de Fratura de Compressão com os testes de Auto-fratura (impacto simples) e IDEA (impacto simples) para a Pelota PBF

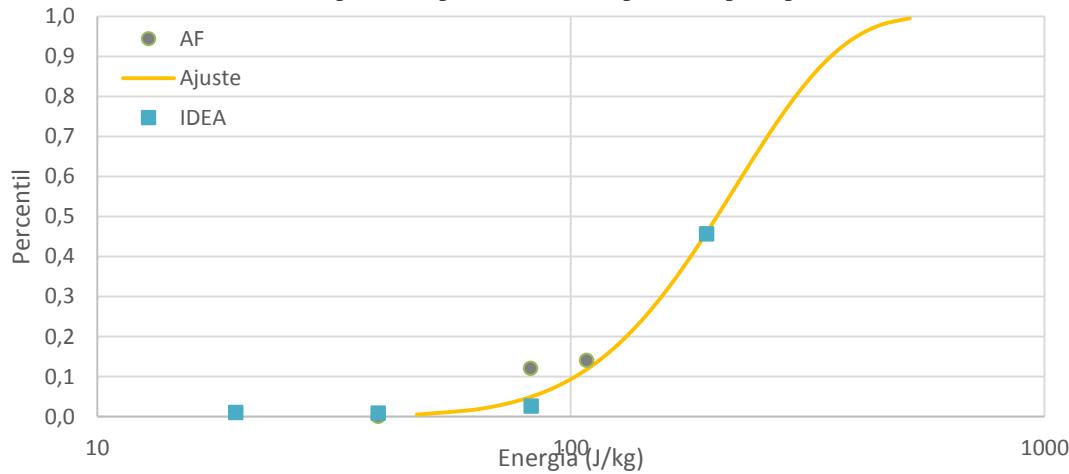


Figura V.17 – Comparação da curva ajustada das Energias Específicas de Fratura de Compressão com os testes de Auto-fratura (impacto simples) e IDEA (impacto simples) para a Pelota PDR

Conforme mostrado nas figuras anteriores, os resultados de energia específica de fratura obtida pelo ensaio de Auto-Fratura (impacto simples) estão aderentes aos resultados gerados com o novo equipamento de degradação (IDEA), para ambas as amostras.

V.2.3 Caracterização por Impactos Repetidos

Sabe-se, com base o modelo proposto por Tavares e King (2002), que o impacto repetido em uma Pelota causa o acumulo de dano na estrutura da amostra, tornando-a mais frágil e susceptível a fratura. No entanto, o objetivo deste capítulo é comparar as curvas de proporção quebrada através do ensaio de fratura por impactos repetidos com os resultados obtidos no novo equipamento de degradação (IDEA). As Figuras V.18, V19 e V.20 mostram a comparação das frações quebradas da pelota PDR, em função da energia específica aplicada no 1º, 5º e 10º impacto, respectivamente.

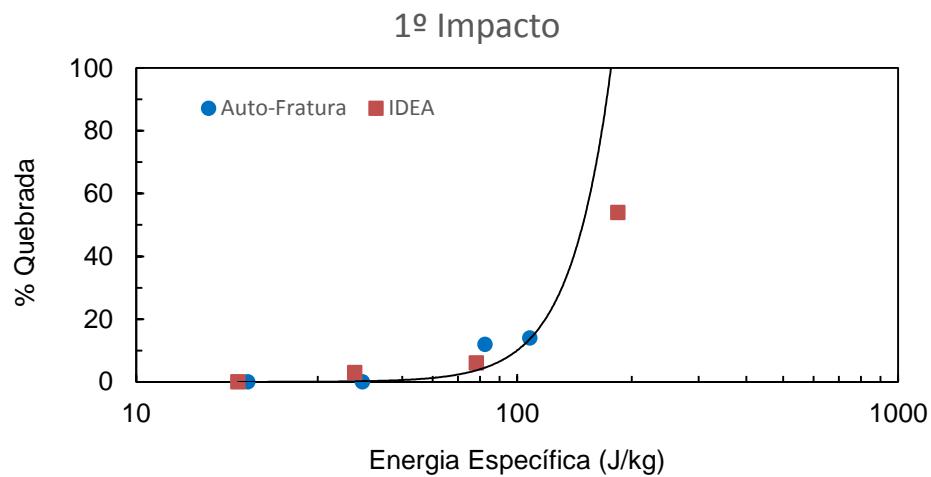


Figura V.19 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 1º impacto para diferentes energias, para a Pelota PDR, comparando com os resultados do IDEA.

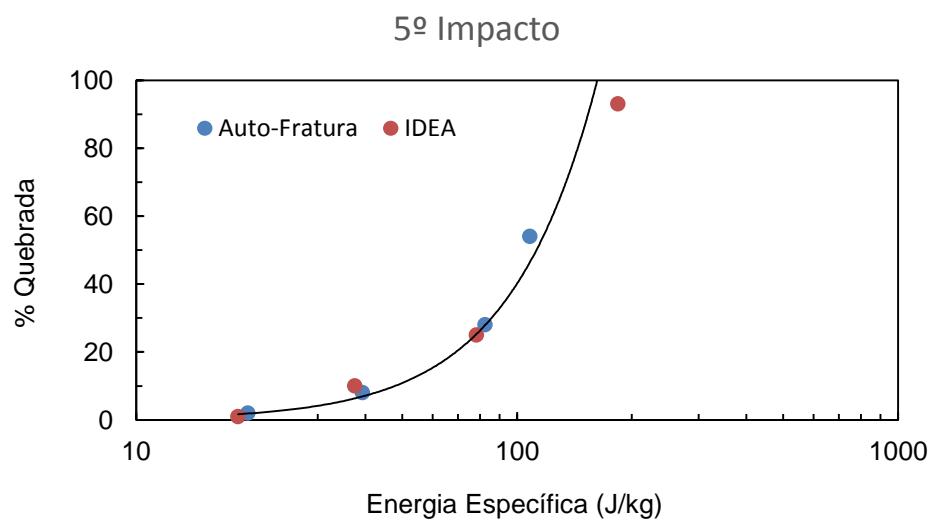


Figura V.20 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 5º impacto para diferentes energias, para a Pelota PDR, comparando com os resultados do IDEA

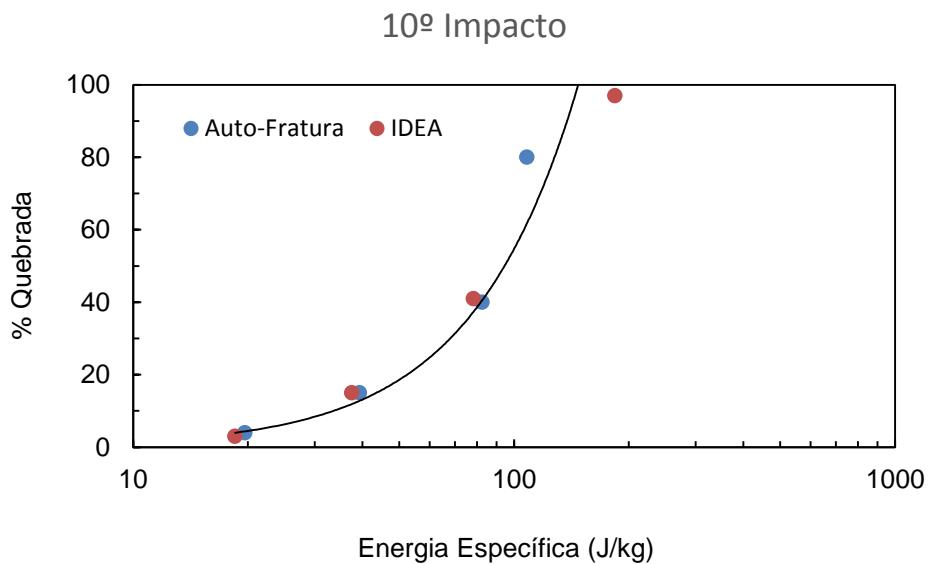


Figura V.21 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 10º impacto para diferentes energias, para a Pelota PDR, comparando com os resultados do IDEA

As figuras mostradas anteriormente evidenciam que os resultados de porcentagem de quebra de pelotas do ensaio de impactos repetidos são similares aos valores encontrados nos testes realizados no IDEA.

As mesmas análises foram realizadas na amostra PBF, conforme mostrado nas Figuras V.22, V.23 e V.24.

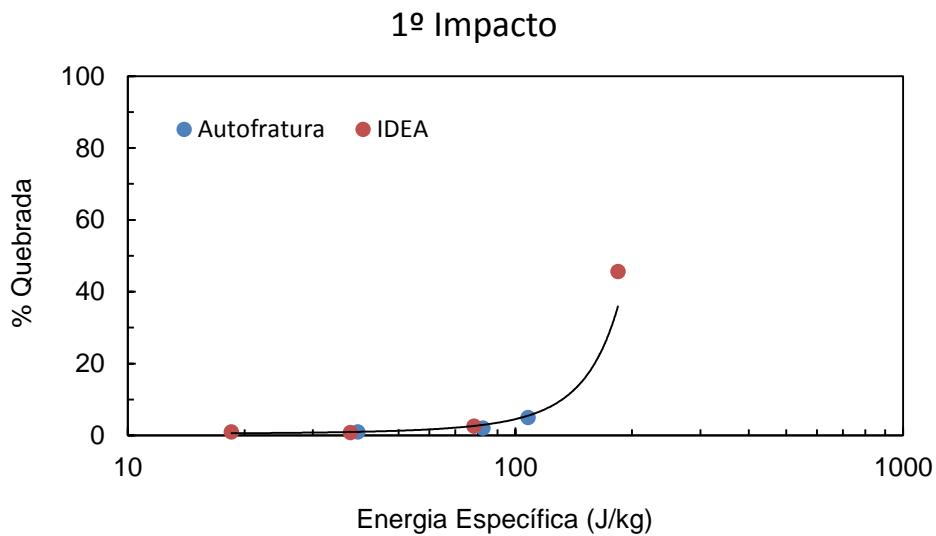


Figura V.22 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 1º impacto para diferentes energias, para a Pelota PBF, comparando com os resultados do IDEA.

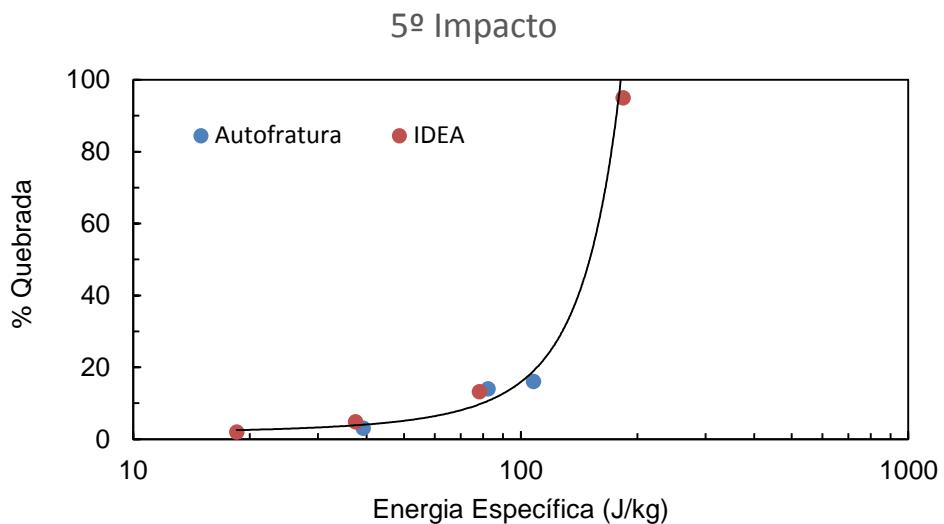


Figura V.23 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 5º impacto para diferentes energias, para a Pelota PBF, comparando com os resultados do IDEA

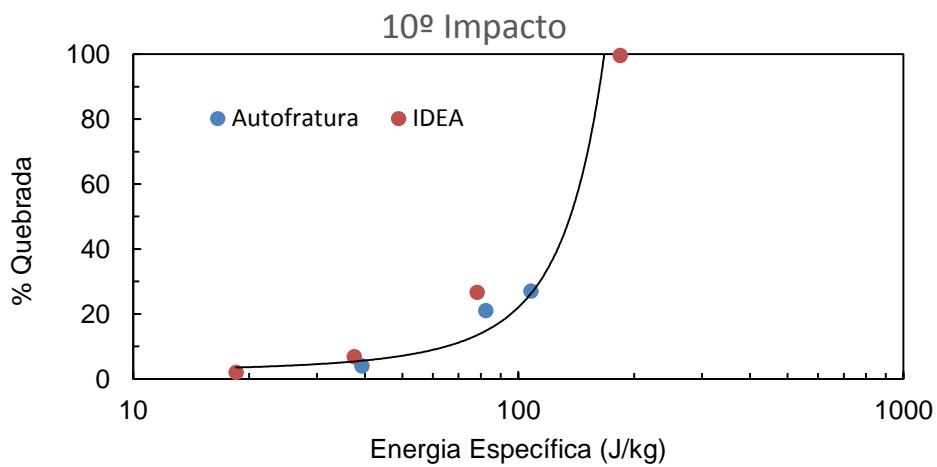


Figura V.24 – Porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos no 10º impacto para diferentes energias, para a Pelota PBF, comparando com os resultados do IDEA

As figuras mostradas anteriormente evidenciam que os resultados de porcentagem de quebra de pelotas do ensaio de impactos repetidos são similares aos valores encontrados nos testes realizados no IDEA. Portanto, conclui-se a fração de fragmentação volumétrica do novo equipamento (IDEA) segue a mesma tendência aos valores encontrados nos ensaios de Autofratura realizados no LTM.

V.2.4 Caracterização da Fragmentação Superficial

Considera-se que quando as partículas perdem mais de 10% de sua massa original, as mesmas sofrem quebra volumétrica. Por outro lado, partículas que sofrem perdas

mássicas menores são consideradas sofrer fratura superficial, também chamada de abrasão ou lascamento. A Figura V.25 mostra a distribuição da perda mássica obtida no IDEA para cada velocidade de rotação. Observa que o percentual de perda mássica aumenta com o incremento da velocidade do rotor, o que é evidente, pois a frequência define a energia específica de impacto. Para maiores energias de impacto, os resultados mostraram uma maior variabilidade. Entretanto, para menores velocidades de rotação, as perdas mássicas apresentaram resultados mais uniformes.

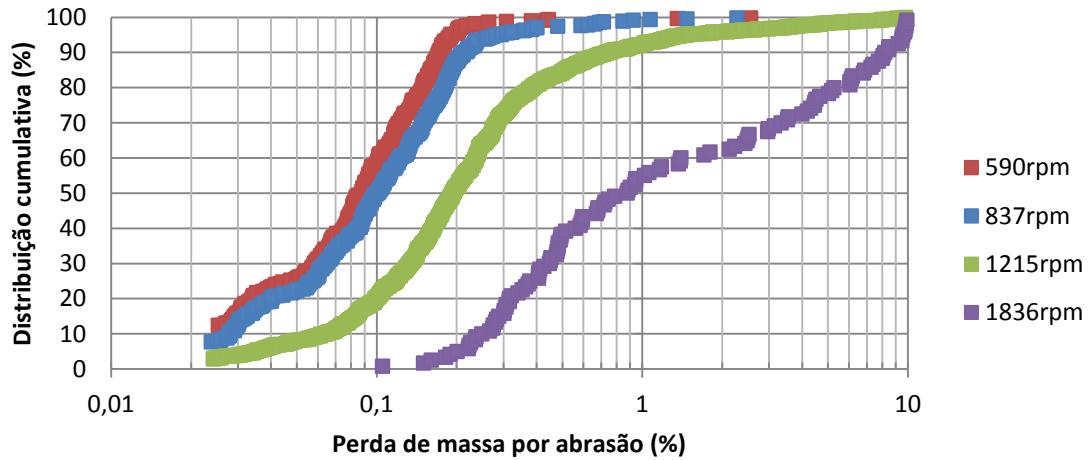


Figura V.25 – Distribuição dos dados experimentais da perda mássica percentual acumulada por impactos de diferentes energias específicas.

A Figura V.26 resume os resultados de perda mássica obtidos no IDEA para cada velocidade de rotação, em função do número de impactos. A figura sugere uma pequena variação da perda mássica média em função do número de impactos.

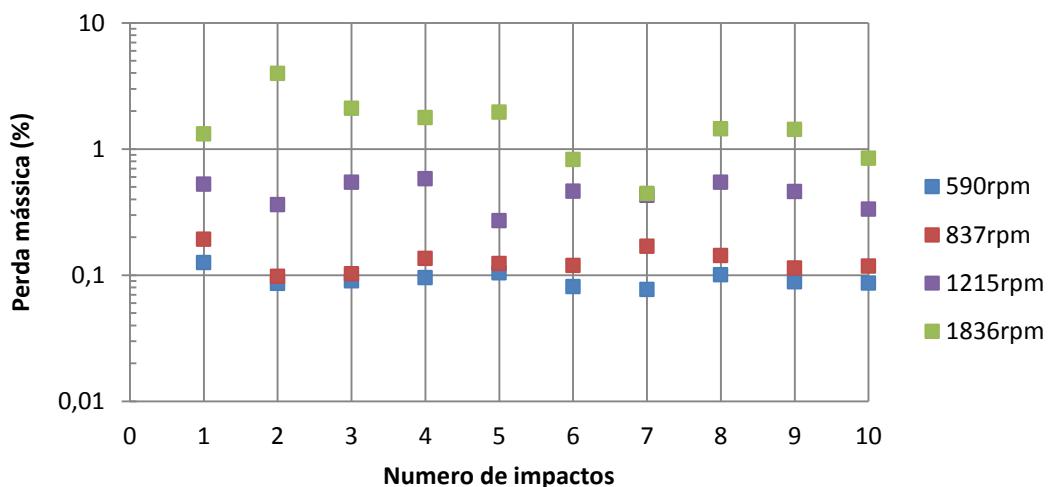


Figura V.26 – Distribuição dos dados experimentais da perda mássica percentual acumulada por impactos de diferentes energias.

Uma comparação mais detalhada da diferença entre os resultados dos primeiros impactos e os seguintes é possível na Figura V.27, que mostra que a perda mássica nos

primeiros impactos é mais alta, possivelmente influenciada pelo desprendimento da capa de finos aderidos à superfície da pelota, conforme já evidenciado na Figura IV.35.

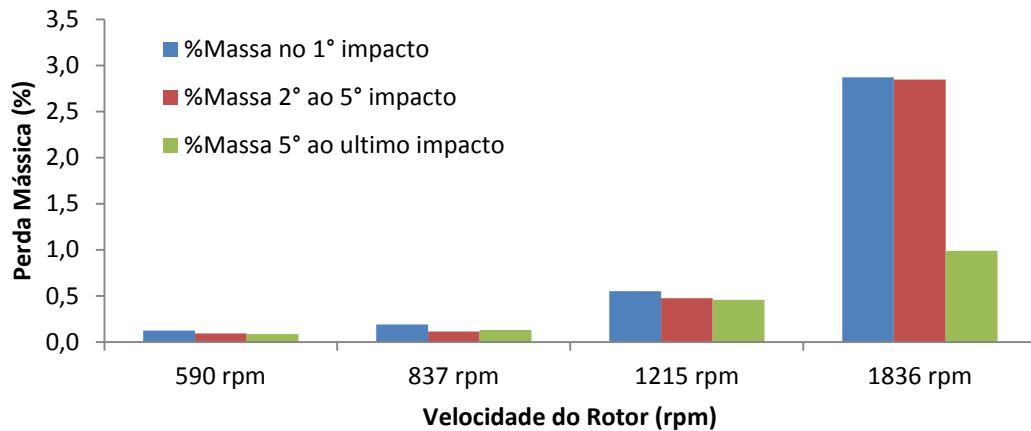


Figura V.27 – Distribuição dos dados experimentais da perda mássica percentual acumulada por impactos de diferentes energias.

A fim de validar estes resultados, os mesmos foram comparados com os valores referentes ao teste de Auto Fratura, realizado no LTM/COPPE, conforme mostrado nas Figuras V.28 a V.30. Observa-se uma boa correspondência para os primeiros impactos (Figuras V.28 e V.29), com maior diferença entre esses nos demais impactos.

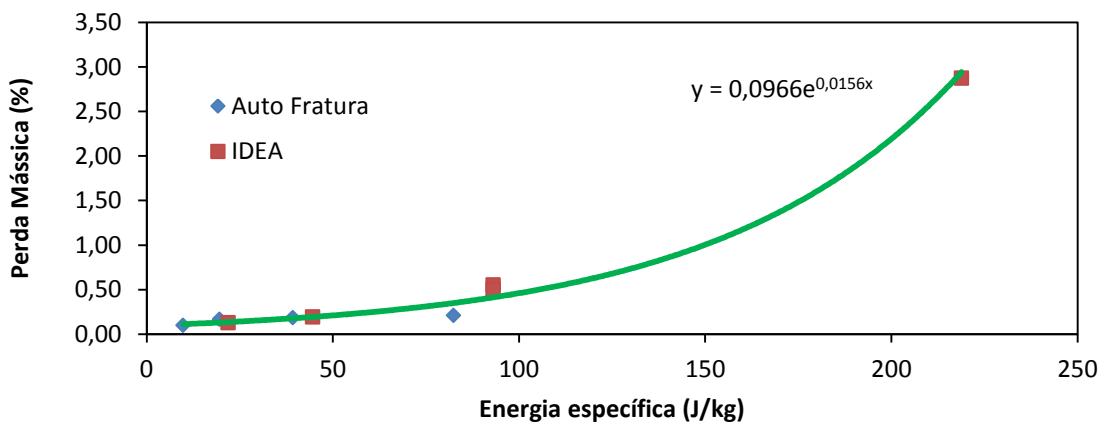


Figura V.28 – Média da perda mássica do ensaio de Auto Fratura no 1º impacto para diferentes energias, comparando com os resultados do IDEA., onde os símbolos são dados experimentais e a linha é ajuste do modelo.

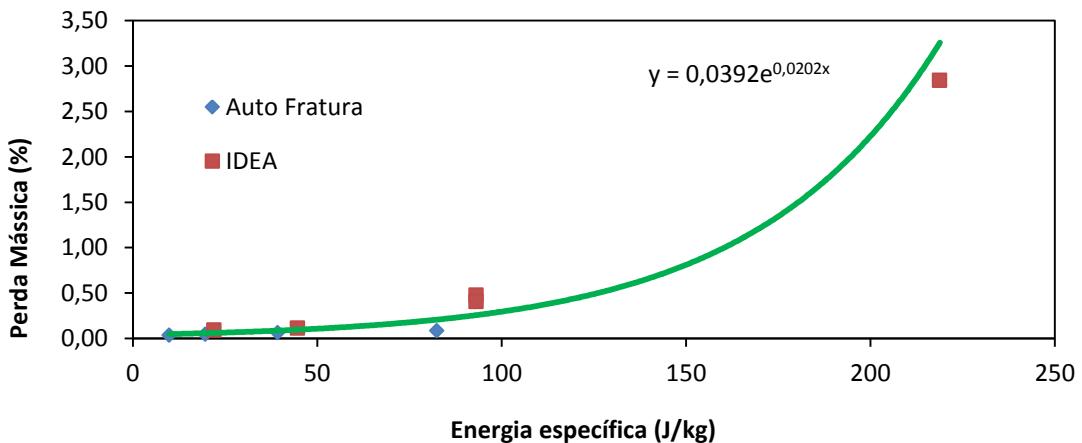


Figura V.29 – Média da perda mássica do ensaio de Auto Fratura entre o 2º e 5º impacto para diferentes energias, comparando com os resultados do IDEA, onde os símbolos são dados experimentais e a linha é ajuste do modelo.

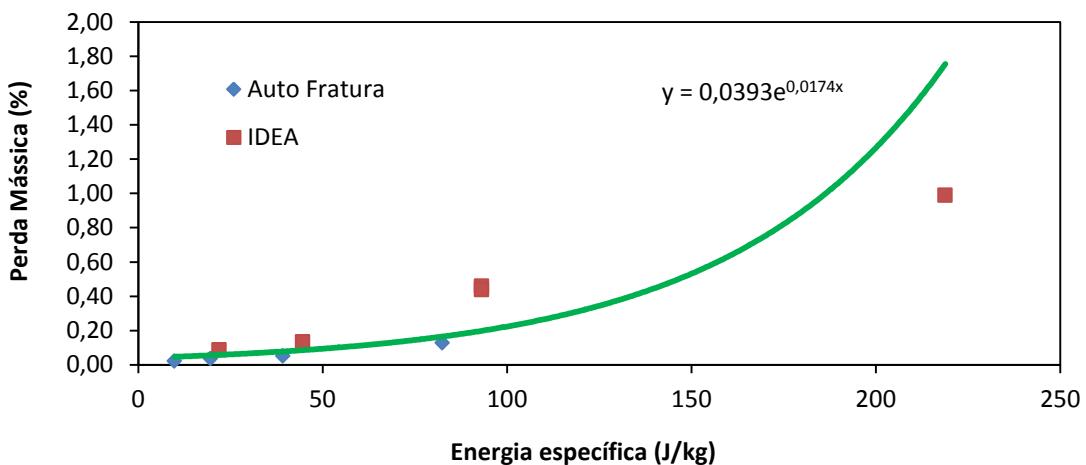


Figura V.30 – Média da perda mássica do ensaio de Auto Fratura após o 5º impacto para diferentes energias, comparando com os resultados do IDEA, onde os símbolos são dados experimentais e a linha é ajuste do modelo.

V.2.5 Distribuição granulométrica dos fragmentos

Conforme destacado no capítulo V.1, o IDEA permite recuperar e separar os fragmentos gerados, para posterior análise por peneiramento. Inicialmente, avaliaram-se as perdas mássicas durante os testes com o intuito de verificar se parte da massa das pelotas fragmentadas se perdeu no novo equipamento de degradação. A Figura V.31 apresenta as perdas nos ensaios realizados em cada velocidade analisada, comparando-se as massas originais das pelotas ensaiadas e a massa de material recuperado. Observe que, por gerar fragmentos mais finos, no o teste cuja velocidade foi 1863 rpm, a perda foi na ordem de 4%, enquanto os testes de 837 e 1215 rpm as perdas foram mais baixas, iguais a 2% e 1%, respectivamente. Estes resultados mostram que as perdas podem ser consideradas aceitáveis, tendo em vista a rapidez e simplicidade do teste.

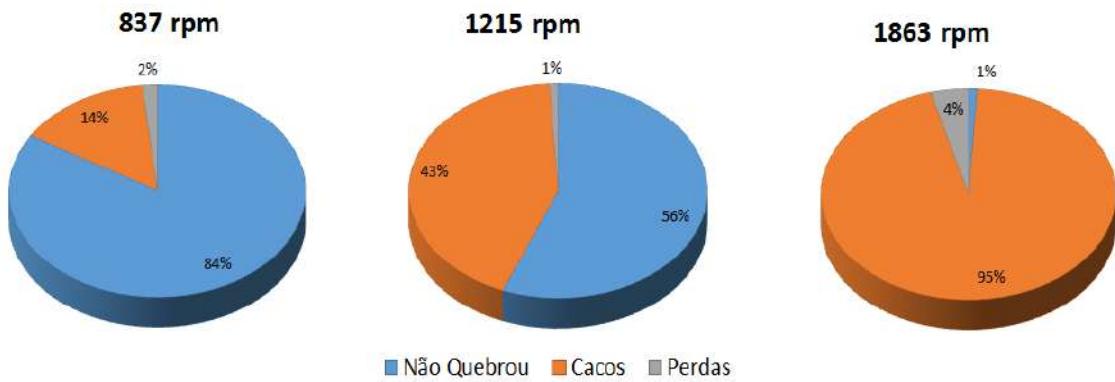


Figura V.31 – Distribuição das massas nos testes realizados no IDEA para três velocidades testadas.

A Figura V.32 apresenta a distribuição granulométrica, proveniente dos ensaios realizados no IDEA, da amostra BF, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, submetida às três diferentes energias de impacto. Observa-se que a distribuição granulométrica dos fragmentos das pelotas variou em função da energia de impacto aplicada na pelota. Além disso, quando comparada com as curvas de distribuição granulométrica dos fragmentos do ensaio de DWT, observa-se a mesma tendência de fragmentação.

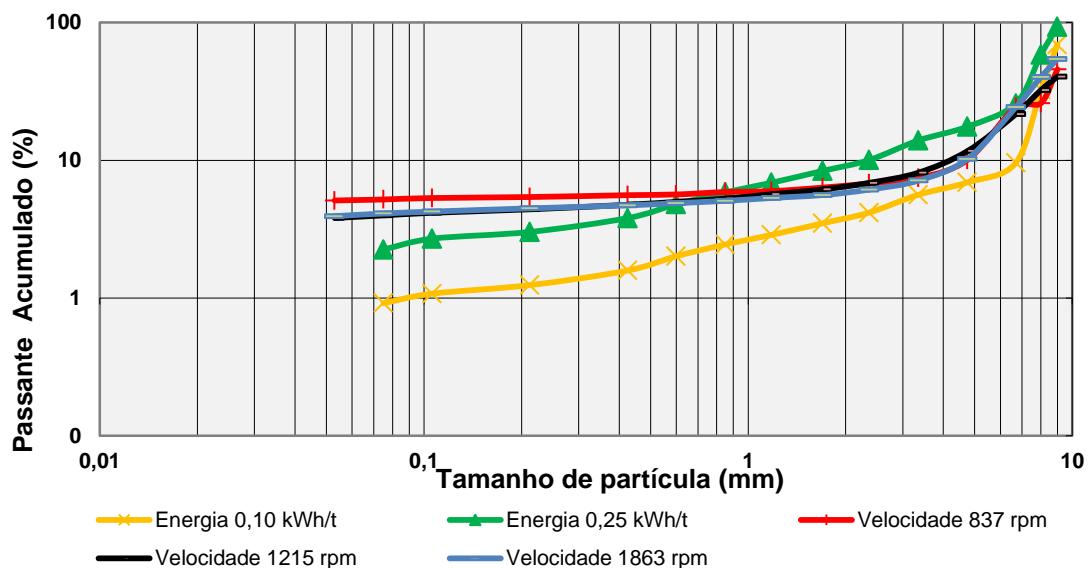


Figura V.32 – Análises granulométricas da pelota BF, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, submetidas às energias de impacto aplicadas e comparadas ao ensaio de DWT.

Um parâmetro importante a ser analisado na fragmentação volumétrica é cálculo do t_{10} para cada energia específica de impacto, cujo cálculo é realizado através de interpolação linear da distribuição granulométrica do material fragmentado (TAVARES, 2011). A Figura V.33 mostra a relação do t_{10} com a energia específica de impacto, comparando os resultados obtidos no IDEA com testes realizados no DWT para diversas energias.

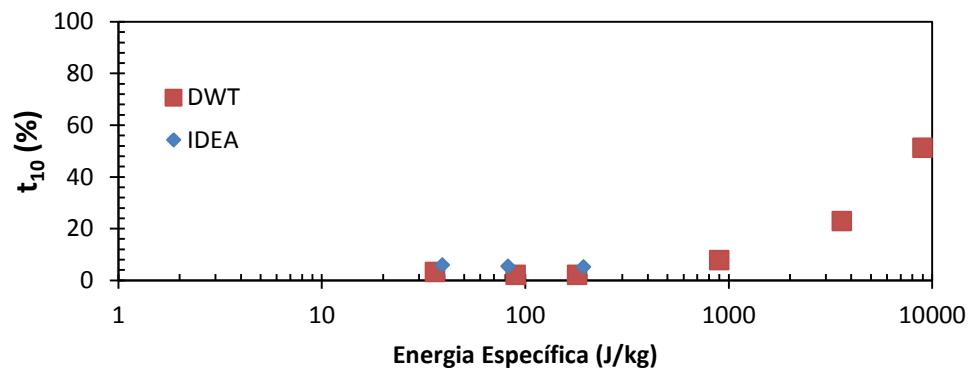


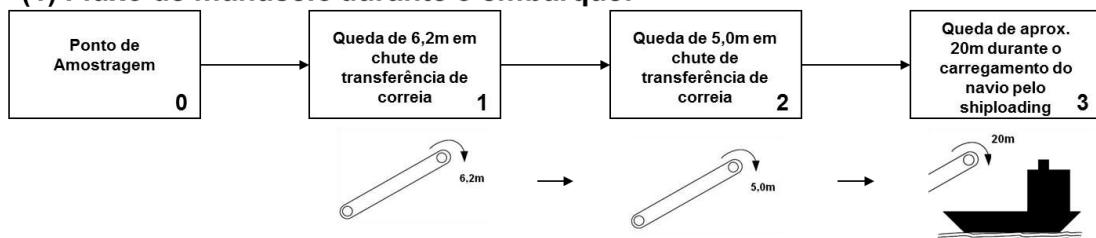
Figura V.33 – Relação entre o t_{10} da fragmentação volumétrica e a energia de impacto, comparando os resultados do IDEA ao ensaio de DWT.

VI. ESTUDO DE CASO - SIMULAÇÃO DO MANUSEIO DESDE A UNIDADE DE PELOTIZAÇÃO ATÉ O PÁTIO DO CLIENTE

Com o intuito de validar o modelo de previsibilidade da degradação durante o manuseio, foi realizado um estudo de caso juntamente com uma empresa siderúrgica localizada no Oriente Médio, no qual, foi feito um embarque de pelota de minério de ferro no porto da usina de pelotização e descarregado no pátio do referido cliente.

O circuito completo simulado consistiu desde aquele referente ao último ponto de amostragem dentro da Usina de pelotização (Porto de Embarque) até a estação de amostragem para verificação das propriedades do produto, realizada após o descarregamento do material no Oriente Médio (Pátio do cliente), conforme mostrado na Figura VII.1.

(1) Fluxo de manuseio durante o embarque:



(2) Fluxo de manuseio durante a descarga



Figura VII.1 – Fluxo de manuseio desde do embarque a descarga da Pelota no pátio do cliente.

Durante a etapa de embarque, foram realizadas amostragens de forma representativa, seguindo procedimentos normativos, tanto nos testes realizados, quanto nos equipamentos utilizados para fazer a coleta do material que está sendo embarcado no navio. A periodicidade de amostragem é definida com base no volume de pelota embarcado. Neste caso, como o volume embarcado foi, em torno, de 170 mil toneladas de pelota, foram realizadas amostragens a cada 1.000 toneladas, gerando compostos para realização de testes de granulometria e umidade para cada 4.000 toneladas embarcadas. Todos os resultados são guardados para futura consulta e auditoria, conforme mostrado na Tabela VII.1.

Tabela VII.1. Planilha de acompanhamento da qualidade embarcada.

TMN X 1000	+18,0 mm		-18+16 mm		-16+14mm		-14+12,5mm		-12,5+9 mm		-9+8 mm		-8,0+6,3 mm		-6,3+5,0 mm		-5,0+3,15 mm		-3,15+0,5 mm		-0,5 mm		-16+8 mm		-6,3 mm		-5,0 mm		-3,15 mm		Rel. Gran.		H ₂ O	
	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%	MÉDIA	%			
1	4	0,5	0,5	2,2	5,8	5,8	22,9	54,2	54,2	7,9	7,9	3,8	3,8	1,5	1,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	90,8	90,8	2,7	2,7	1,2	1,2	0,7	0,7	0,5	0,5	1,00	1,00	
2	8	1,0	0,8	3,7	3,0	5,2	5,5	25,2	24,1	50,1	52,2	7,8	7,9	4,3	4,1	0,7	1,1	1,0	0,8	0,4	0,6	0,5	88,3	89,6	2,7	2,7	2,0	1,6	1,0	0,9	0,6	0,6	2,19	1,60
3	12	0,6	0,7	4,1	3,3	9,6	6,9	31,0	26,4	48,0	50,8	3,3	1,4	3,2	0,9	1,0	0,4	0,6	0,3	0,4	0,5	91,9	90,3	2,0	2,5	1,1	1,4	0,7	0,8	0,7	0,8	1,98	1,72	
4	16	0,4	0,6	5,4	3,9	8,6	7,3	31,8	27,7	46,5	49,7	4,1	1,5	2,8	0,6	0,9	0,4	0,6	0,3	0,4	0,5	91,0	90,5	1,7	2,3	1,1	1,4	0,7	0,8	0,9	0,7	2,09	1,82	
5	20	0,7	0,6	7,0	4,5	9,3	7,7	34,4	29,1	42,9	48,3	3,0	5,2	1,3	2,5	0,4	0,8	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	89,6	90,3	1,4	2,1	1,0	1,3	0,7	0,8	1,0	0,8	1,79	1,81
6	24	1,8	0,8	3,1	4,3	7,2	7,6	28,5	29,0	53,0	49,1	3,2	4,9	1,8	2,4	0,5	0,8	0,3	0,5	0,3	0,4	91,9	90,6	1,4	2,0	0,9	1,2	0,6	0,7	0,7	0,7	1,10	1,69	
7	28	1,2	0,9	2,5	4,0	11,5	8,2	38,2	30,3	42,7	48,2	2,0	4,5	0,7	2,1	0,5	0,7	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	94,4	91,1	1,2	1,9	0,7	1,1	0,5	0,7	1,2	0,8	1,90	1,72
8	32	1,5	1,0	3,4	3,9	8,4	8,2	24,0	29,5	54,1	48,9	4,1	4,4	2,9	2,2	0,6	0,7	0,3	0,4	0,3	0,4	90,6	91,1	1,6	1,8	1,0	1,1	0,7	0,7	0,6	0,8	2,79	1,86	
9	36	2,8	1,2	7,0	4,3	11,1	8,5	31,6	29,7	41,0	48,1	4,2	4,4	1,1	2,1	0,4	0,7	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	87,9	90,7	1,2	1,8	0,8	1,1	0,5	0,7	1,0	0,8	0,85	1,74
10	40	2,1	1,3	8,5	4,7	14,5	9,1	32,0	30,0	37,8	47,0	2,8	4,2	1,0	2,0	0,5	0,7	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	87,1	90,4	1,3	1,7	0,8	1,1	0,6	0,7	1,2	0,8	1,55	1,72
11	44	2,6	1,4	7,2	4,9	10,5	9,2	29,6	29,9	42,3	46,6	4,1	4,2	1,9	2,0	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,4	86,5	90,0	1,8	1,7	1,1	1,1	0,8	0,7	0,9	0,8	1,75	1,73	
12	48	1,1	1,4	4,2	4,9	10,1	9,3	29,1	29,9	49,3	46,8	3,6	4,2	1,3	1,9	0,4	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	92,1	90,2	1,3	1,7	0,9	1,1	0,5	0,7	0,8	0,8	1,60	1,72	
13	52	1,7	1,4	5,2	4,9	12,6	9,6	29,1	29,8	44,4	46,6	3,9	4,2	1,3	1,9	0,8	0,7	0,4	0,4	0,3	0,3	90,0	90,2	1,8	1,7	1,0	1,0	0,6	0,7	0,9	0,8	1,85	1,73	
14	56	2,2	1,4	6,2	5,0	11,8	9,7	28,4	29,7	45,0	46,5	3,1	4,1	1,7	1,9	0,7	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	98,3	90,0	1,6	1,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,8	1,45	1,71	
15	60	1,8	1,5	5,6	5,0	10,1	9,8	28,0	29,6	47,5	46,6	3,6	4,0	1,9	1,9	0,8	0,7	0,3	0,4	0,2	0,3	89,2	90,0	1,5	1,7	0,7	1,0	0,4	0,6	0,8	0,8	1,99	1,73	
16	64	1,4	1,5	3,8	4,9	7,8	9,6	26,4	29,4	52,4	47,0	4,9	4,1	1,6	1,8	0,7	0,7	0,3	0,4	0,3	0,4	91,5	90,1	1,7	1,7	1,0	1,0	0,7	0,6	0,8	0,8	2,08	1,75	
17	68	1,7	1,5	4,8	4,9	8,8	9,6	27,3	29,3	50,6	47,2	4,2	4,1	1,2	1,8	0,6	0,7	0,4	0,3	0,1	0,3	90,9	90,1	1,4	1,7	0,8	1,0	0,4	0,6	0,7	0,8	1,75	1,75	
18	72	1,0	1,5	3,2	4,8	7,8	9,5	26,5	29,1	52,9	47,5	5,3	4,2	1,8	1,8	0,5	0,7	0,4	0,4	0,3	0,3	92,5	90,3	1,5	1,7	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	0,8	1,55	1,74	
19	76	1,3	1,4	2,8	4,7	8,7	9,4	27,8	29,0	51,9	47,7	3,9	4,2	1,3	1,8	0,6	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	92,3	90,4	2,3	1,7	1,0	1,0	0,6	0,7	0,8	0,8	1,94	1,75	
20	80	1,8	1,5	4,4	4,7	9,9	9,5	30,3	29,1	46,5	47,7	4,4	4,2	1,4	1,8	0,5	0,6	0,2	0,4	0,2	0,3	91,1	90,4	1,3	1,7	0,8	1,0	0,6	0,6	0,9	0,8	1,20	1,72	
21	84	0,8	1,4	4,0	4,7	7,8	9,4	27,6	29,0	51,6	47,8	5,1	4,2	1,7	1,8	0,7	0,6	0,3	0,4	0,2	0,3	92,1	90,5	1,4	1,7	0,7	1,0	0,4	0,6	0,7	0,8	3,00	1,78	
22	88	1,6	1,4	4,1	4,7	8,1	9,3	34,3	29,3	46,1	47,8	3,5	4,2	1,1	1,7	0,6	0,6	0,2	0,4	0,2	0,3	92,0	90,5	1,2	1,6	0,6	1,0	0,4	0,6	0,9	0,8	2,59	1,82	
23	92	1,2	1,4	5,7	4,7	7,9	9,3	29,4	29,3	50,3	47,9	3,2	4,1	1,2	1,7	0,4	0,6	0,3	0,4	0,2	0,3	90,8	90,6	1,1	1,6	0,7	1,0	0,4	0,6	0,7	0,8	1,69	1,81	
24	96	0,9	1,4	4,5	4,7	9,0	9,3	33,3	29,4	46,1	47,8	3,7	4,1	1,5	1,7	0,4	0,6	0,2	0,4	0,2	0,3	92,1	90,6	1,0	1,6	0,6	1,0	0,4	0,6	0,9	0,8	0,70	1,77	
25	100	0,5	1,4	3,0	4,6	6,4	9,1	28,0	29,4	51,6	48,0	5,3	4,2	2,5	1,7	0,9	0,6	0,7	0,4	0,4	0,3	91,3	90,6	2,7	1,6	1,8	1,0	1,1	0,6	0,7	0,8	1,25	1,75	
26	104	1,0	1,4	2,8	4,6	6,8	9,1	26,6	29,3	53,7	48,2	4,7	4,2	1,9	1,7	0,8	0,6	0,8	0,4	0,5	0,3	91,8	90,7	2,5	1,7	1,0	1,0	0,9	0,6	0,6	0,8	1,90	1,75	
27	108	1,3	1,4	3,0	4,5	7,2	9,0	27,4	29,2	56,3	48,5	0,4	4,0	2,3	1,8	0,8	0,6	0,7	0,4	0,3	0,3	91,3	90,7	2,1	1,7	1,3	1,0	0,6	0,6	0,6	0,8	1,80	1,75	
28	112	1,0	1,3	4,3	4,5	7,1	8,9	26,2	29,1	50,9	48,6	5,9	4,1	2,6	1,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	90,1	90,7	2,0	1,7	1,2	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	1,80	1,75	
29	116	1,2	1,3	2,3	4,4	6,8	8,8	26,0	29,0	56,6	48,8	4,4	4,1	1,6	1,8	0,4	0,6	0,3	0,4	0,2	0,3	93,8	90,8	1,1	1,7	0,7	1,0	0,4	0,6	0,6	0,8	2,65	1,79	
30	120	1,7	1,3	3,6	4,4	7,7	8,8	27,0	28,9	51,1	48,9	4,8	4,1	2,1	1,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	90,6	90,8	2,0	1,7	1,2	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	2,15	1,80	
31	124	1,4	1,3	4,6	4,4	7,5	8,8	34,3	29,1	46,4	48,8	3,3	4,1	1,3	1,8	0,5	0,6	0,3	0,4	0,2	0,3	91,5	90,8	1,2	1,7	0,7	1,0	0,4	0,6	0,9	0,8	1,35	1,78	
32	128	1,5	1,4	5,2	4,4	7,8	8,7	29,4	29,1	49,0	48,8	4,2	4,1	1,6	1,8	0,6	0,6	0,2	0,4	0,3	0,3	90,4	90,8	1,3	1,7	0,7	1,0	0,5	0,6	0,8	0,8	2,40	1,80	
33	132	2,0	1,4	4,6	4,4	7,6	8,7	30,2	29,1	48,7	48,8	3,7	4,1	1,8	1,8	0,5	0,6	0,3	0,4	0,2	0,3	90,2	90,8	1,4	1,6	0,9	1,0	0,6	0,6	0,8	0,8	2,30	1,82	
34	136	2,2	1,4	6,0	4,5	7,5	8,7	33,6	29,3	45,4	48,7	3,2	4,1	1,2	1,8	0,2	0,6	0,2	0,4	0,2	0,3	89,7	90,8	0,9	1,6	0,7	1,0	0,5	0,6	0,9	0,8	2,75	1,85	
35	140	1,8	1,4	6,1																														

Além disso, foram realizados testes segundo o padrão ISO de compressão, tamboramento e análise química a cada 16.000 toneladas embarcadas, para caracterização contratual da carga. As características médias do material embarcado estão listadas na Tabela VII.2.

Tabela VII.2. Planilha de acompanhamento da qualidade embarcada.

	Parâmetro	Resultado
Qualidade Química	Fe (%)	67,72
	SiO ₂ (%)	1,45
	Al ₂ O ₃ (%)	0,51
	CaO (%)	0,79
	MgO (%)	0,11
	B2 (-)	0,54
Qualidade Física	Tamboramento	93,4
	Abrasão	5,9
	Compressão	326

Entretanto, além dos resultados dos testes ISO realizados, ao final do carregamento, uma amostra representativa ao embarque deste produto foi enviada ao LTM e realizada uma caracterização completa para determinação dos parâmetros de quebra que foram utilizados para alimentar o modelo de previsibilidade de degradação.

Além da caracterização no porto de embarque, o cliente faz uma amostragem, menos representativa no porto de descarga para realização de alguns testes para validação do certificado do material embarcado, dentre eles, a granulometria. A Figura VII.2 apresenta a comparação da distribuição granulométrica medida no porto de embarque e o porto de descarga. A figura mostra que a degradação é evidenciada pela distribuição mais fina do produto. Entretanto, é importante destacar que a magnitude da mesma é comparativamente pequena, o que impõe desafios à sua quantificação, tendo em vista as dificuldades em amostrar um volume dessa magnitude.

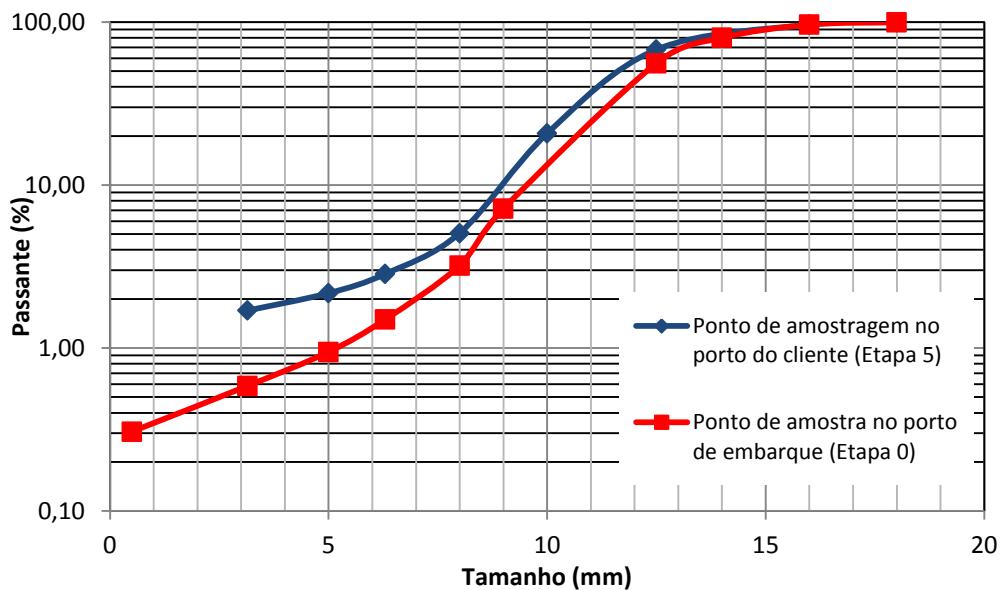


Figura VII.2 – Análises granulométricas no início e no fim do circuito de manuseio estudado.

Para a realização das simulações, utilizou-se o software LTMPHS e, para isso, o mesmo foi alimentado com a granulometria do carregamento e feito o desenho de todo fluxo de manuseio, considerando as características de cada etapa, conforme detalhado a seguir.

A etapa 1 consistiu em uma queda de 6,2m em chute de transferência de correia. Para isso, foi utilizado o nível 3 de caracterização no modelo, conforme mostrado na Figura VII.3.

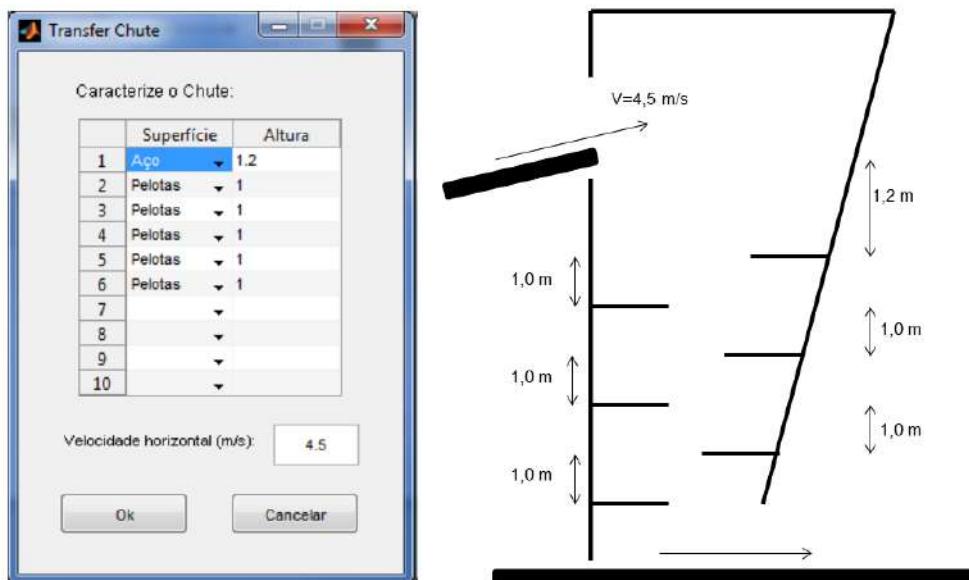


Figura VII.3 – Detalhamento das condições usadas na simulação da etapa 1.

O chute de transferência da etapa 2 é similar àquele usado na etapa 1, entretanto, com menor altura. Além disso, como sua capacidade de transporte é maior, a correia transportadora possui menor velocidade, conforme mostrado na Figura VII.4.

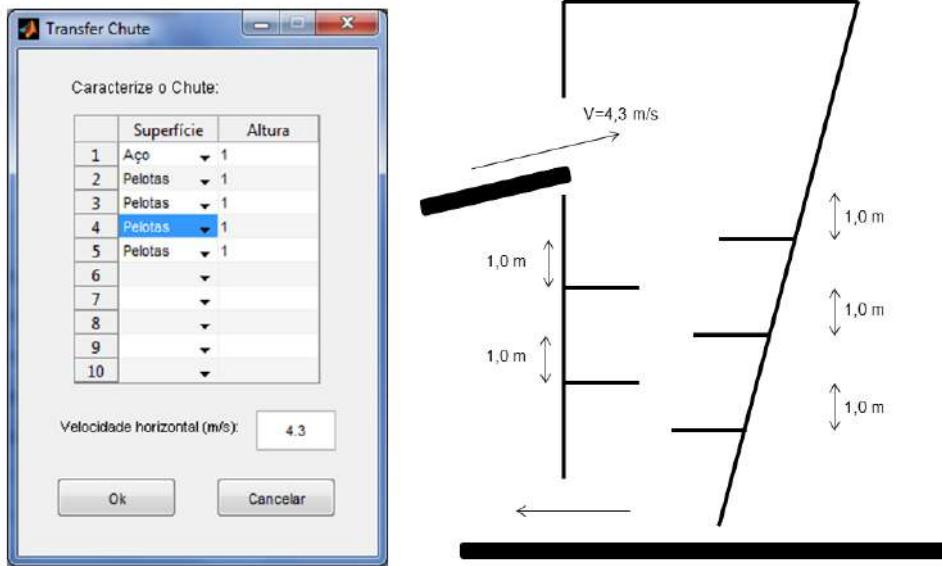


Figura VII.4 – Detalhamento das condições usadas na simulação da etapa 2.

A etapa 3 representa o carregamento da pelota por meio do shiploader. O navio utilizado para transportar o material até o cliente, do tipo Capesize, possui 9 porões e sua distribuição de carga foi alimentada no modelo, considerando o nível 3 de simulação, conforme mostrado na Figura VII.5.

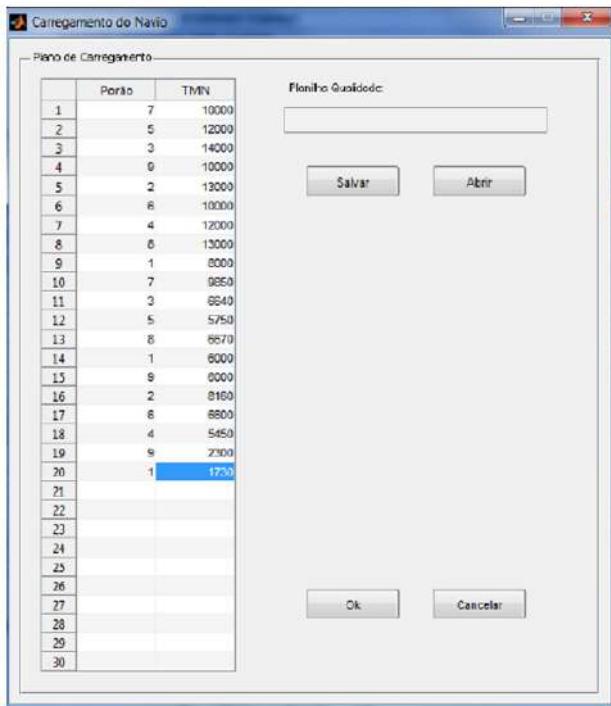


Figura VII.5 – Detalhamento das condições usadas na simulação da etapa 3.

Com base nas informações da sequência de carregamento, foi calculado o perfil de altura de queda, utilizando o modelo proposto e apresentado no capítulo IV. A Figura VII.6 mostra o comportamento da altura de queda da pelota no porão do navio durante todo o período de carregamento.

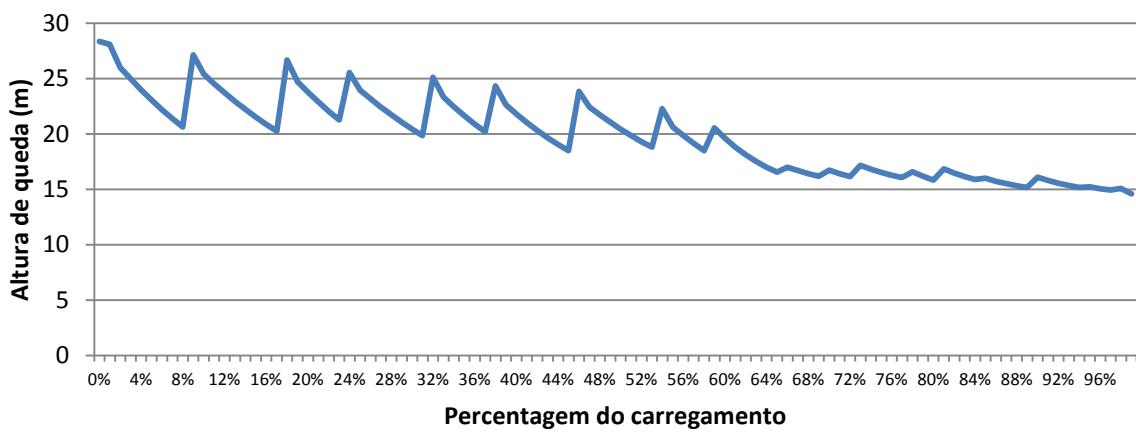


Figura VII.6 – Perfil de altura de queda no porão do navio do estudo de caso.

Além do perfil de queda, o modelo é capaz de informar a altura de queda média para cada porão, conforme apresentado na Figura VII.7. Observa-se que as alturas de queda são marginalmente mais altas na porção central da embarcação, sendo mais baixa próximo à proa.

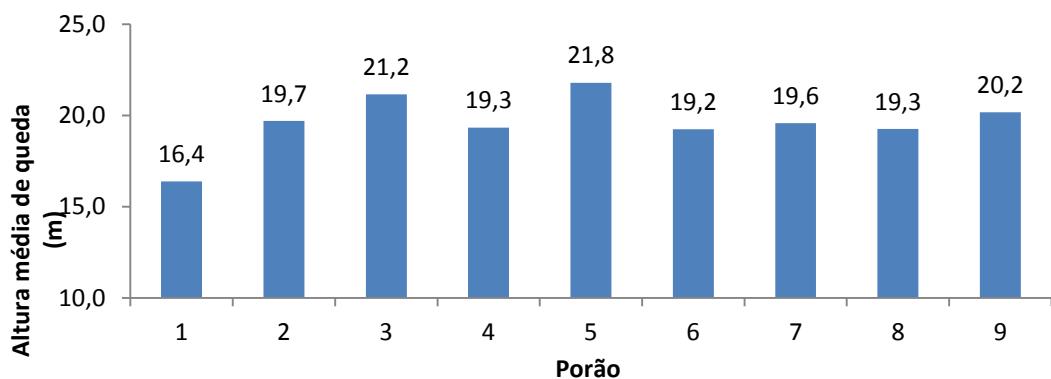


Figura VII.7 – Perfil de altura de queda no porão do navio do estudo de caso.

Uma das etapas mais críticas deste estudo de caso foi a simulação do sistema de transferência de carga, pois como o calado do porto de descarga é baixo, é necessário transferir parte da carga para um navio menor (Panamax) para que o mesmo possa atracar para o descarregamento do material. Essa operação é comumente chamada de “lightering”. Como não foi possível obter informações mais detalhadas sobre esta etapa de manuseio, foi definido utilizar uma altura média de queda equivalente a 10 metros.

Além disso, foi necessário realizar uma série de suposições sobre os chutes de transferência após a descarga do material no porto do cliente. Neste caso, foi considerado que o material seria submetido a duas quedas de 4 metros cada,

considerando a superfície de impacto um leito de pelotas, conforme mostrado na Figura VII.8.



Figura VII.8 – Detalhamento das condições usadas na simulação da etapa 5.

A Figura VII.9 compara os resultados medidos e simulados usando o simulador desenvolvido no LTM/COPPE. A aderência é razoável, mostrando que o modelo, mesmo com as suas várias suposições, é capaz de descrever com alguma confiança os resultados de manuseio. Entretanto, pode-se observar que o resultado da simulação foi superestimado em relação ao resultado real de degradação medido no porto do cliente, sobretudo no que diz respeito à proporção de finos (Tabela VII.3). É importante destacar que essa divergência pode ser creditada tanto à dificuldade do modelo quanto à qualidade dos resultados experimentais. Estudos anteriores de validação em condições controladas de laboratório (CAVALCANTI, 2015) mostraram que o modelo foi capaz de prever resultados de degradação com grande confiança.

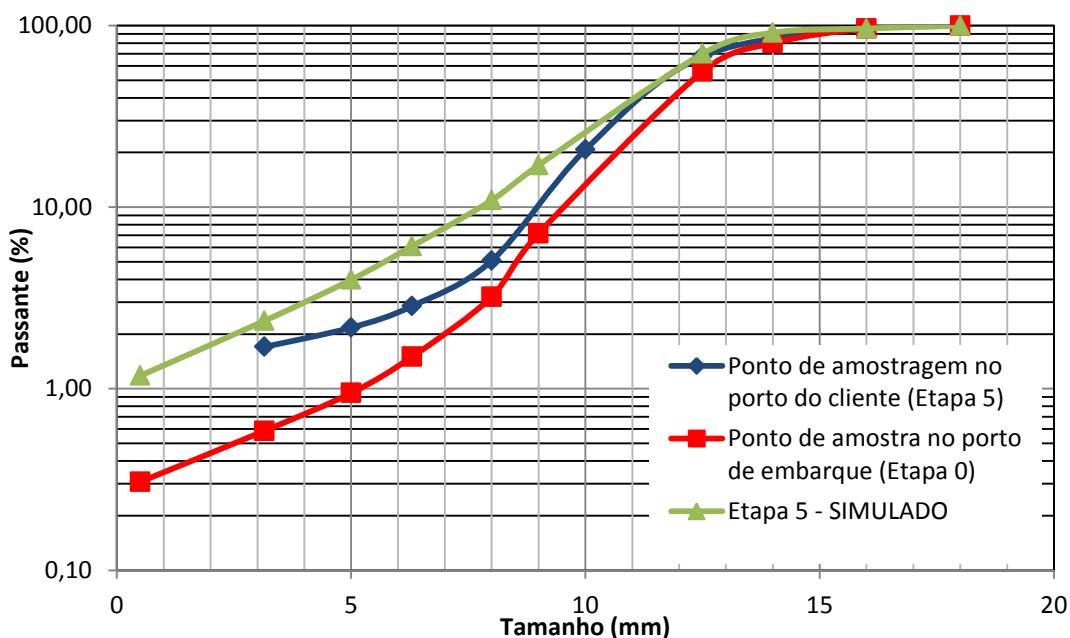


Figura VII.9 – Resultado de simulação comparando a curva da granulometria após o circuito de manuseio.

Tabela VII.3. Resumo do resultado da simulação comparado aos dados reais do estudo de degradação durante o manuseio e transporte até o cliente.

ETAPA DE MANUSEIO	Medida de degradação (% < 8 mm)
Ponto de amostra no porto de embarque (Etapa 0)	3,50
Ponto de amostragem no porto do cliente (Etapa 5)	5,07
Simulação (Etapa 5)	12,33

É importante destacar que o modelo é capaz de gerar informações detalhadas da distribuição granulométrica de cada uma das operações (etapas) de manuseio como, por exemplo, a distribuição das frações de cacos e pelotas, para cada tamanho de pelota (Figura VII.10). A figura mostra que na faixa mais grossa e fina a proporção de pelotas apenas diminui e aumenta, respectivamente, conforme é esperado. Nas faixas intermediárias a variação consiste da combinação de redução da proporção por quebra de pelotas e do aporte das faixas mais grossas por quebra.

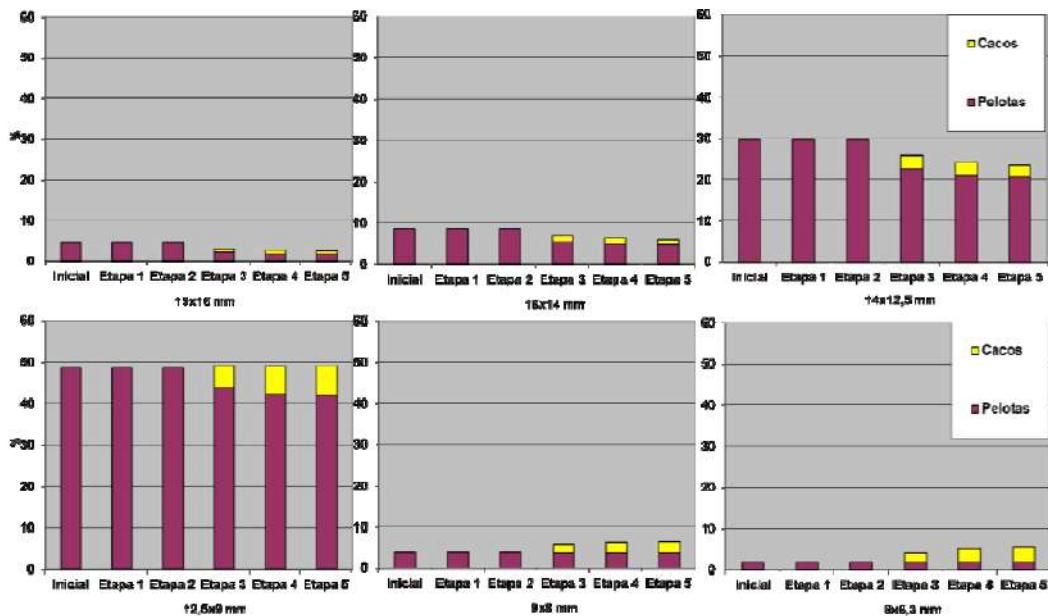


Figura VII.10 – Previsão da variação da proporção contida em cada uma das faixas de tamanhos na simulação do manuseio e transporte até o cliente.

Além disso, o modelo é capaz de prever a distribuição granulométrica das pelotas após embarque em cada um dos porões do navio (Figura VII.11) e estimar a sua degradação após a etapa de manuseio (Figura VII.12).

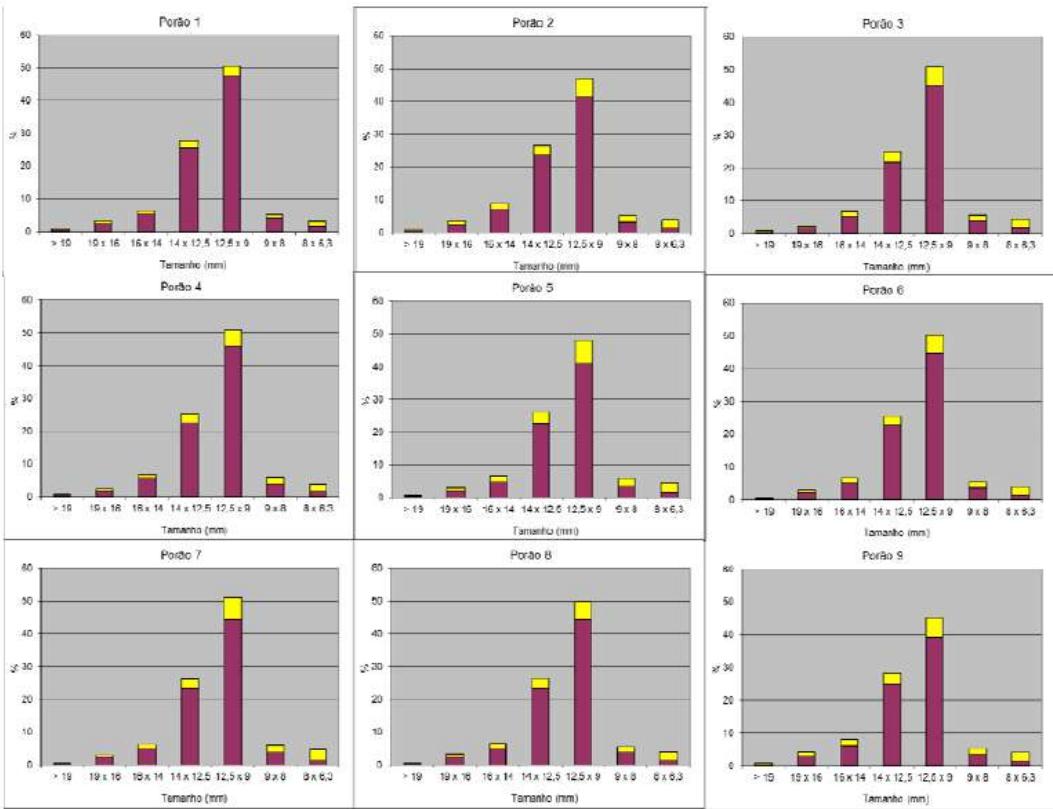


Figura VII.11 – Previsão da distribuição granulométrica das pelotas em cada porão do navio

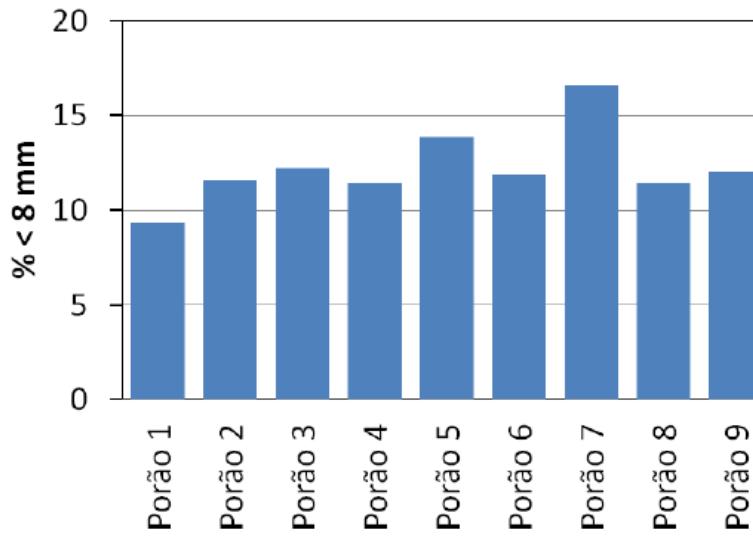


Figura VII.12 – Previsão da degradação em cada porão após a etapa de manuseio

Tendo em vista a divergência encontrada entre os resultados simulados e medidos no porto do cliente, pode-se questionar a fidelidade do modelo. Por outro lado, é também pertinente levar em consideração que a distribuição granulométrica medida no cliente também é sujeita a erros, uma vez que a coleta de uma amostra representativa de um navio de grande porte não é uma operação trivial.

Portanto, o objetivo deste capítulo foi apresentar o grande potencial que o modelo de previsibilidade tem para gerar informações relevantes para tomada de decisões técnicas e comerciais entre o vendedor e o comprador, oferecendo melhores condições para negociação de contratos, tendo em vista à possibilidade de adequar a qualidade das pelotas produzidas ao circuito de manuseio e transporte do cliente. Além disso, este modelo 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.

VII. SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE MANUSEIO USANDO SOFTWARE LTMPHS

Conforme já descrito anteriormente, o entendimento do efeito das características físicas do produto manuseado e do tipo de manuseio na degradação da pelota proporciona à pelotizadora melhores condições de negociar contratos, pois poderia adequar a qualidade das pelotas produzidas ao circuito de manuseio e transporte do cliente. Para isso, conforme mostrado no capítulo III.5, a equipe do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRJ desenvolveu, em parceria com a Samarco Mineração, um simulador capaz de prever a susceptibilidade da pelota degradar simulando qualquer sistema de manuseio existente e é chamado de *LTM Pellet Handling Simulator* ou LTMPHS.

Portanto, o objetivo deste capítulo é mostrar, através de simulações, utilizando o modelo de previsibilidade de degradação, como dois circuitos distintos de manuseio podem resultar em inversão dos resultados de degradação para duas pelotas (uma com alta tendência à fragmentação volumétrica e outra com alta tendência à fragmentação superficial).

VII.1 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS PELOTAS

Para realização das simulações, foram considerados dois tipos de pelotas, sendo uma com alta tendência à fragmentação volumétrica (Pelota A) e outra com alta tendência à fragmentação superficial (Pelota B).

Para padronizar a granulometria inicial nas simulações, considerou-se que as pelotas A e B possuem a mesma distribuição granulométrica. A Tabela VII.1 mostra a granulometria inicial das pelotas A e B no carregamento, no qual, a fração abaixo de 6,3mm equivale a 1,4% .

Tabela VII.1. Granulometria inicial das pelotas A e B no carregamento

Peneira	%
+19,0 mm	0,7
-19+16 mm	7,0
-16+14mm	9,3
-14+12,5mm	34,4
-12,5+9 mm	42,9
-9+8 mm	3,0
-8,0+6,3 mm	1,3
-6,3+5,0 mm	0,4
-5,0+3,15 mm	0,3
-3,15+0,5 mm	0,2
-0,5 mm	0,5

Além das características físicas baseadas em normas ISO, as pelotas A e B foram caracterizadas através de ensaios de fragmentação realizados no LTM (Laboratório de Tecnologia Mineral), na UFRJ. A Tabela x mostra os principais parâmetros de quebra das pelotas A e B.

VI.2 DEFINIÇÃO DOS CIRCUITOS DE MANUSEIO

Sabe-se que a característica do sistema de manuseio influencia significativamente na degradação das pelotas. Com isso, foi considerado nas simulações dois tipos de circuito de manuseio, sendo um Fluxo A, com menor quantidade de chutes de transferência e menor magnitude de altura, e Fluxo B, com maior quantidade de manuseio e alturas mais severas, incluindo um sistema de transferência de parte da carga para navios menores (Lighterage). A Figura VII.1 mostra as características dos dois fluxos de manuseio utilizados nas simulações.

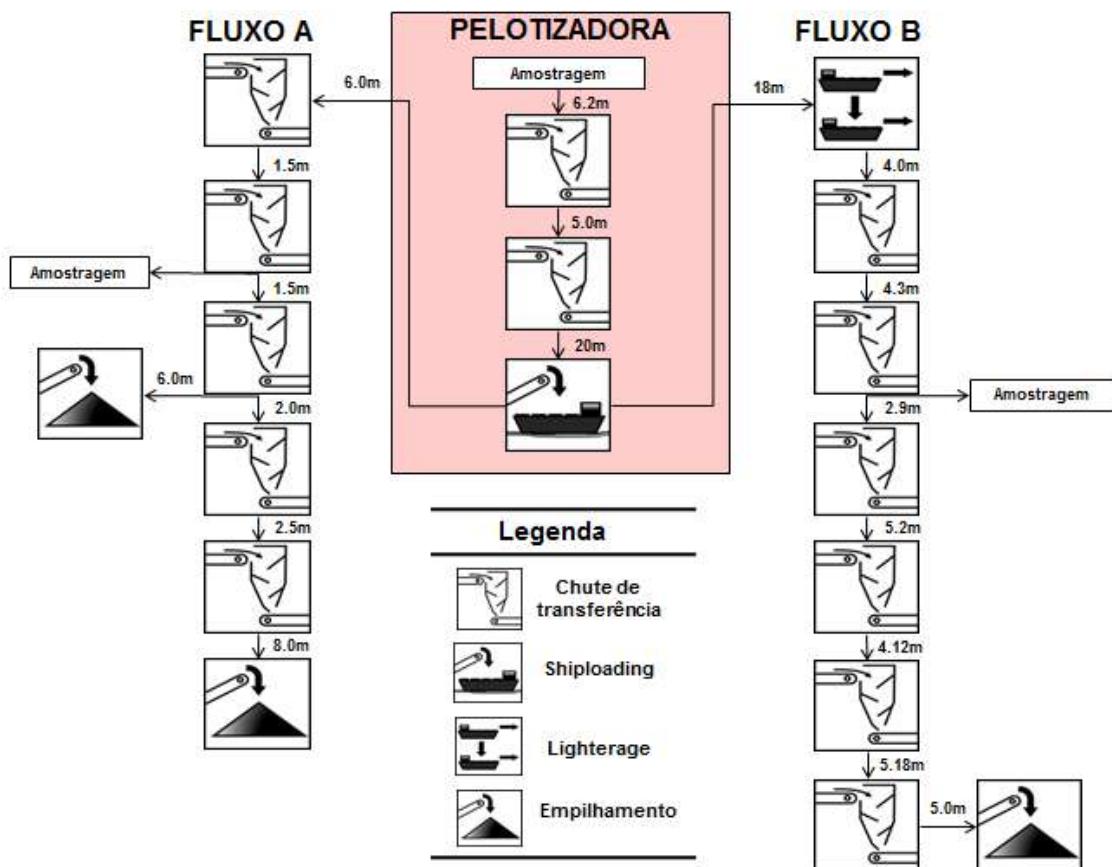


Figura VII.1 – Desenho esquemático dos fluxos de manuseio A e B.

Para a simulação da etapa de carregamento, foi considerado no Fluxo A o carregamento de um navio de menor porte (Panamax) e no Fluxo B um navio de grande porte (Capesize).

VI. REFERÊNCIAS

- ALFREDINE, P. Obras e gestão de portos e costas. Editora Edgard Blucher, Companhia Vale do Rio Doce. 2005
- ATHAYDE, M., Modelamento Fluidodinâmico da Zona de Queima de Fornos de Grelha Móvel para Pelotização de Minério de Ferro, Belo Horizonte: UFMG, 2013, 83p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).
- 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.
- BARRIOS, G. K. P; CARVALHO R. M.; KWADE, A.; TAVARES, L. M.. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. Powder Technology, v. 248, p. 84–93, nov. 2013.
- BOECHAT, F. O.; PEREIRA, P. M.; SIMÕES, H. O.; PASSIGATTI, V. P.; MAGNAGO, D.; BAILON, A. M. G.; MOREIRA, J. L. Influência da distribuição granulométrica do calcário e carvão na qualidade física e metalúrgica das pelotas de minério de ferro. 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 12º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Anais. Vitória – ES. .2010
- 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
- CAVALCANTI, P. P. S., 2015, Calibração e validação de modelo matemático de degradação de pelotas queimadas de minério de ferro durante manuseio e transporte. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.
- 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.
- DANIEL, D. R. Estudo da influência da relação granulométrica no envelhecimento da pelota de minério de ferro, Vila Velha: Universidade Vila Velha, 2013. 50p. (Monografia, Bacharelado de Engenharia Metalúrgica e de Materiais).
- 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.

FERREIRA, F.M., 1989, Otimização do projeto de pátio de homogeneização através do método da simulação computacional – Escola Politécnica da USP.

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.

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. Anais...Ouro Preto - MG.

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.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Valor da produção mineral brasileira. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005475.pdf/>

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

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.

MATOS, A. P. Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas, Ouro Preto: REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. 131p. (Dissertação, Mestrado de Engenharia de Materiais).

MONTGOMERY, D. C, 1997, Introduction to statistical quality control. 3rd. ed. New York: Wile

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

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

NUNES S.F., Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 133p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

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.

PERINI, C.A. Estudo do Sistema de Gestão de Limpeza Industrial no Porto de Tubarão. Monografia do Curso de Pós Graduação em Engenharia Portuária da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Vitória, 2010.

ROCHA J. M., VIEIRA M. B. H., ANDRADE V. L. L.. Apostila do curso de Geometalurgia de Minério de Ferro. Contribuição técnica ao 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROCK, A. D.; ZHANG, R.; WILKINSON, D. NUMERICAL MODELING. In: Velocity Variations in Cross-Hole Sonic Logging Surveys - Causes and Impacts in Drilled Shafts. Chapter 3. 2008. p. 27-48.

SÁ K. G. - *Estudo da influência da mineralogia dos tipos de minério da samarco mineração sobre a resistência a compressão de pelotas para processos de redução direta* – 86 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT - Ouro Preto, 2003.

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.

SAMARCO. Apostila de Pelotização de Minério de Ferro. Acervo Técnico. Propriedade Samarco, 2014.

SCHÖNERT, K. (1986). Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in Mineral Processing (Ed. P. Somasundaran), Society of Mining Engineers, pp. 19-32.

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.

Site: <http://www.vale.com/EN/business/mining/iron-ore-pellets/Pages/Iron-Ore-Indices.aspx> Acessado em 01 de abril de 2016

STOPFORD, M.. Maritime economics. London: Routledge ,1997.

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

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., 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. (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., 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., 2011, Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics, International Journal of Mineral Processing, v. 101, p. 21-27.

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

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

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., 1988, The effect of drop height and particle size on the extent of degradation of agglomerates, CHEMICA'88, Australian Bicentennial Int. Conf. for the Process Industries, Sydney, 665–670.

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.

WYNNYCKYJ J. R. and FAHIDY T. Z., Solid state sintering in the induration of iron ore pellets, Metallurgical Transactions, May 1974, Volume 5, p. 991-999.

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^a 1. p. 193-208. Canadá, 1991

DRAPER, N. R., LIN, D. K. J., 1996, "Response Surface Designs", In: Ghosh, S., Rao, C. R., "Handbook of Statistics: Design and Analysis Experiments", Elsevier Science, v. 13, cap. 11, New York, USA, p. 343-375.