

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS VERDES DE
MINÉRIO DE FERRO EM OPERAÇÕES DE PELOTIZAÇÃO PELO MÉTODO DE
ELEMENTOS DISCRETOS

ANDERSON DENADAI THOMAZINI

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
Dezembro de 2020

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS VERDES DE
MINÉRIO DE FERRO EM OPERAÇÕES DE PELOTIZAÇÃO PELO MÉTODO DE
ELEMENTOS DISCRETOS

ANDERSON DENADAI THOMAZINI

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

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Aprovada por: Prof. Luís Marcelo Marques Tavares

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho

Dr. Maycon Athayde

Dra. Valdirene Gonzaga de Resende

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2020

Thomazini, Anderson Denadai

Modelagem e simulação da degradação de pelotas verdes de minério de ferro em operações de pelotização pelo método de elementos discretos/ Anderson Denadai Thomazini. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020.

XVII, 144p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 139-144.

1. Método dos elementos discretos. 2. Pelotas verdes. 3. Degradação. I. Tavares, Luís Marcelo Marques; Carvalho, Rodrigo Magalhães de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por se fazer presente na minha vida.

Aos meus pais Anna Maria Denadai e Leonides Thomazini pela minha educação, e minhas irmãs Neide Aparecida Thomazini e Marcela Thomazini pela união de nossa família.

A minha esposa Jéssica Zandomênico Thomazini por me apoiar nos momentos de fraqueza e cansaço.

Ao meu gerente Frederico Mayerhofer pela oportunidade oferecida para realização deste mestrado e acreditar na parceria entre empresa e universidade.

Aos meus orientadores, professor Luís Marcelo Marques Tavares e Rodrigo Magalhães de Carvalho, pelos ensinamentos e participação imensurável na construção desse projeto.

Aos amigos Gilvandro Bueno pelo companheirismo perante os desafios enfrentados durante as disciplinas, e ao Emerson Reikdal da Cunha pelo comprometimento neste projeto, e paciência nas explicações sobre simulações no EDEM.

À colega de pesquisa Rafaela Almeida por aceitar o desafio e fazer parte dessa equipe de pesquisa.

À toda equipe da planta piloto, sem exceção.

Aos meus colegas de trabalho pelo companheirismo e ajuda nos momentos em que estive ausente assistindo aulas do mestrado.

À VALE S.A. e UFRJ por acreditarem nesse “casamento” perfeito entre Empresa e Universidade.

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

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS VERDES DE
MINÉRIO DE FERRO EM OPERAÇÕES DE PELOTIZAÇÃO PELO MÉTODO DE
ELEMENTOS DISCRETOS

Anderson Denadai Thomazini

Dezembro/2020

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

As operações de manuseio e transporte das pelotas verdes de minério de ferro, desde a saída dos discos ou tambores até o forno de endurecimento, são suficientes para induzir danos à sua integridade, e impactar negativamente na qualidade física das pelotas queimadas. Qualquer degradação nas pelotas formadas, além de aumentar a taxa de retorno do pelotamento, dificulta a permeabilidade do leito dentro do forno, gerando aumento no consumo de combustível e de energia elétrica dos ventiladores. Embora seja sabido que a redução da severidade dos impactos durante o manuseio contribui para redução da degradação mecânica das pelotas, a inexistência de um modelo matemático de degradação de pelotas verdes torna difícil a tomada de decisão acerca de modificações no *layout* de usinas existentes. O trabalho tratou do desenvolvimento de um modelo matemático de degradação de pelotas verdes (MDPV) e uma metodologia de simulação capaz de prever a degradação dessas pelotas durante o manuseio e transporte, bem como da realização de estudos de caso de simulação usando o MDPV para diferentes configurações do circuito de pelotamento. Os resultados de degradação gerados pelo MDPV se mostraram aderentes quando comparados com a amostragem industrial no circuito do disco de pelotização. Sendo assim, o MDPV permitiu demonstrar que somente o uso da peneira duplo *deck* na entrada do forno, com os devidos ajustes, seria suficiente para operar o pelotamento, reduzindo os gastos com manutenção. As simulações indicaram uma redução no retorno total do pelotamento, aumentando a alíquota de pelotas no forno. Com isso seria possível aumentar a produção da usina, ou reduzir a alimentação de minério nos discos, priorizando a qualidade das pelotas verdes e queimadas pelo aumento no tempo de rolamento.

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

MODELING AND SIMULATION OF DEGRADATION OF GREEN IRON ORE
PELLETS IN PELLETIZING OPERATIONS USING THE DISCRETE ELEMENT
METHOD

Anderson Denadai Thomazini

December/2020

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Rodrigo Magalhães de Carvalho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The handling and transport operations of green iron ore pellets from the discharge of disks or drums to the induration furnace are sufficient to induce damage to their integrity, and negatively impact the physical quality of the fired pellets. Any degradation in the formed pellets, in addition to increasing the recirculation load of the pellets, is detrimental to the permeability of the bed inside the furnace thus, generating an increase in the fuel and electricity consumption of the fans. Although it is known that the reduction of the severity of impacts during handling contributes to the reduction of mechanical degradation of the pellets, the lack of a mathematical model of degradation of green pellets, makes it difficult to make decisions about changes in the layout of existing plants. The work dealt with the development of a mathematical model for the degradation of green pellets (MDPV, from Portuguese) and a simulation methodology capable of predicting the degradation of these pellets during handling and transportation, as well as carrying out simulation case studies using the MDPV for different pellet circuit configurations. The degradation results generated by the MDPV proved to have good agreement to industrial sampling results from a pelletizing disc circuit. Thus, the MDPV showed that only the double deck screen at the entrance of the furnace, with the necessary adjustments, would be sufficient to guarantee good operation, reducing maintenance costs. The simulations indicated a reduction in the total pellet return, increasing the rate of on-sized pellets in the furnace. With that, it would be possible to increase the plant's production, or reduce the ore feed rate to the disks, prioritizing the quality of the green and fired pellets by increasing the rolling time.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	5
2.1 Objetivo geral	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Pelotização de minério de ferro	6
3.2 Formação de granulados	20
3.3 Pelotas verdes de minério de ferro	25
3.4 DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS VERDES	44
3.5 Fragmentação de partículas	54
3.6 Degradação de materiais granulados	56
3.7 Modelamento matemático e simulação computacional.....	58
3.8 Método dos Elementos Discretos	61
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	68
4.1 Verificação dos parâmetros de contato utilizados na simulação	69
4.2 Ensaio de degradação (degradômetro)	71
4.3 Amostragem industrial	73
4.4 Preparação das simulações industriais com o método dos elementos discretos.....	78
4.5 Parâmetros utilizados nas simulações com o DEM.....	86
4.6 Configurações de circuitos simulados	89
4.7 Pós-processamento das simulações DEM	101
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
5.1 Verificação dos parâmetros de contato.....	102
5.2 Balanços de massa simulados desconsiderando a degradação das pelotas	103
5.3 Simulação da peneira do forno de único <i>deck</i>	105
5.4 Modelo de degradação de pelotas verdes (MDPV)	110
5.5 Estudos de casos industriais usando o MDPV.....	125
6. CONCLUSÕES.....	135
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
8. REFERÊNCIAS	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático dos Complexos Itabira, Minas Centrais, Mariana e Minas Oeste	2
Figura 2 - Minérios supergênicos (CASAGRANDE <i>et al.</i> , 2017)	6
Figura 3 - Minérios tectônico-hidrotermais (CASAGRANDE <i>et al.</i> , 2017).....	7
Figura 4 - Fluxograma típico de um processo de pelotização	9
Figura 5 - Empilhadeira formando uma pilha de finos de minério de ferro	10
Figura 6 - Pilhas de finos de minério de ferro recuperando para usina de pelotização	10
Figura 7 - Moinhos de bolas instalados na usina de pelotização da Vale S.A.	11
Figura 8 – Espessador de polpa de minério de ferro	12
Figura 9 - Polpa de minério de ferro homogeneizada com carvão mineral.....	13
Figura 10 - Tanques homogeneizadores na usina de pelotização da Vale S.A.	13
Figura 11 - Filtro de disco a vácuo na usina de pelotização da Vale S.A.	14
Figura 12 - Prensa de rolos na usina de pelotização da Vale S.A.	15
Figura 13 - Misturador cilíndrico rotativo na usina de pelotização da Vale S.A.	15
Figura 14 - Tambor de pelotamento em usina de pelotização da Vale S.A.	16
Figura 15 - Disco de pelotamento na usina de pelotização da Vale S.A.	17
Figura 16 - Esquemático do forno de endurecimento de uma usina de pelotização	18
Figura 17 - Peneira de pelotas queimadas na usina de pelotização da Vale S.A.....	20
Figura 18 - Pilhas de pelotas queimadas com empilhadeira ao fundo.....	20
Figura 19 - Distribuição de líquido entre as partículas durante sua formação e secagem (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973)	21
Figura 20 - Desenho esquemático da granulação via úmida (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973).....	22
Figura 21 - Mecanismos de crescimento de grânulos durante a granulação (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973).....	24
Figura 22 - Curva de taxa de crescimento diferencial para concentrado de taconito (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973).....	24
Figura 23 - Pelotas verdes formadas no disco do pelotamento	26
Figura 24 - Fluxo de pelotas verdes em correia transportadora que recebe a descarga do disco de pelotamento.....	26
Figura 25 - Disco de pelotamento indicando a alimentação de minério e descarga das pelotas verdes.....	27
Figura 26 - Influência da água na formação da pelota verde (MEYER, 1980).....	27
Figura 27 - Estágios de formação da pelota verde (MEYER, 1980).....	28

Figura 28 - Ângulo de contato entre o líquido e a superfície sólida (CASEY, 2016).....	29
Figura 29 - Evolução do diâmetro médio dos núcleos em função da rotação do tambor para diferentes percentuais de umidade (% volume) (adaptado de KAPUR e FUERSTENAU, 1964)	29
Figura 30 - Aumento na granulometria das pelotas verdes com a elevação do teor de umidade na mistura (adaptado de ATHAYDE <i>et al.</i> , 2018)	30
Figura 31 - Circuito de pelotamento tradicional sem peneira de rolos na saída do disco	31
Figura 32 - Circuito de pelotamento com peneira de rolos na saída do disco.....	32
Figura 33 - Peneira de rolos na saída do disco (vista frontal)	33
Figura 34 - Peneira de rolos na saída do disco (vista superior).....	33
Figura 35 – Eficiência global do peneiramento de pelotas verdes em peneira de rolos (modificado de SILVA <i>et al.</i> , 2020).....	35
Figura 36 - Peneira de rolos com um único <i>deck</i>	36
Figura 37 - Transporte de pelotas verdes por meio de correias transportadoras de borracha ..	36
Figura 38 - Transferência de pelotas verdes entre correias em queda livre	37
Figura 39 - Transferência de pelotas verdes com o auxílio de defletores de PEAD	37
Figura 40 - Vista frontal do chute móvel.....	38
Figura 41 - Vista superior do chute móvel	38
Figura 42 - Representação de uma peneira de rolos com duplo <i>deck</i>	39
Figura 43 - Peneira de rolos duplo <i>deck</i> , mostrando a alimentação de pelotas verdes.....	39
Figura 44 - Vista inferior da peneira de rolos duplo <i>deck</i> , mostrando a retirada de finos de pelotas verdes	40
Figura 45 - Representação esquemática do circuito de pelotamento da Usina C mostrando as alturas de quedas, em centímetros, numeradas de 1 até 6	41
Figura 46 - Representação esquemática do circuito de pelotamento da Usina G mostrando as alturas de quedas, em centímetros, numeradas de 1 até 8	42
Figura 47 - Influência da altura de quedas na geração de trincas nas pelotas verdes (VALE S.A., 2008b).....	43
Figura 48 - Influência do tamanho das pelotas verdes na geração de trincas (ATHAYDE <i>et al.</i> , 2018).....	44
Figura 49 – Quedas de pelotas verdes na faixa de 10-12,5 mm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	45
Figura 50 - Alternância das alturas de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para a fratura de pelotas (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	46

Figura 51 - Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas a diferentes alturas de queda no aço: a) alturas de 46, 75 e 100 cm; b) altura de 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	47
Figura 52 - Efeito da superfície de impacto para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm nas diferentes alturas de queda: a) 25 cm; b) 46, 75 e 100 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020).....	48
Figura 53 - Número de queda para cada tipo de superfície para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm (TAVARES e ALMEIDA, 2020).....	49
Figura 54 - Resultados do número de queda para os ângulos de 45°, 60° e 90° para pelotas verdes na faixa de 10-12,5 mm (ALMEIDA, 2019).....	50
Figura 55 - Efeito do ângulo de impacto na proporção de pelotas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	51
Figura 56 - Quebra cumulativa das pelotas verdes de 10–12,5 mm em relação à altura cumulativa de queda para cada tipo de superfície, alturas extremas a) 100 cm b) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020).....	52
Figura 57 - Quebra cumulativa em relação à altura cumulativa de queda para diferentes angulações nas quatro alturas de queda a) 100 cm b) 75 cm c) 46 cm d) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	53
Figura 58 - Decomposição da componente de força exercida pela pelota à superfície com inclinação (TAVARES e ALMEIDA, 2020)	54
Figura 59 - Energia específica de fratura média em função do tamanho da partícula (TAVARES, 1997).....	56
Figura 60 - Fluxo básico de funcionamento do DEM (CUNDALL e STRACK, 1979).....	62
Figura 61 - Sequência de quedas de pelotas verdes em uma placa de borracha (SILVA <i>et al.</i> , 2018).....	66
Figura 62 – Curva interpolada da distribuição de tamanhos de pelotas verdes (Silva <i>et al.</i> 2020)	67
Figura 63 - Fluxograma da sequência de trabalhos realizados para realização das simulações e validação do MDPV	68
Figura 64 - Posição dos equipamentos para filmagem das pelotas verdes dentro da peneira circular rotativa localizada na Vale S.A.	70
Figura 65 - Modelo tridimensional da peneira circular rotativa indicando o ângulo de trabalho e o sentido de rotação	70

Figura 66 – Esquema do dispositivo para medição de degradação em massa (degradômetro)	71
Figura 67 - Peneira de rolos na saída do disco indicando em vermelho as alturas de quedas das pelotas verdes que foram referência para o ensaio no degradômetro.....	72
Figura 68 – Peneira circular rotativa. Vista lateral (esquerda) e frontal (direita).....	72
Figura 69 - Fluxo para o teste de degradação em massa por meio do degradômetro.....	73
Figura 70 - Circuito de peneiramento de pelotas verdes do disco 5P20B indicando as correias 5P21B e 5P27	74
Figura 71 - Ponto de coleta sobre a correia 5P21B, de onde foi retirada amostra contendo 26 kg de pelotas verdes.....	74
Figura 72 - Ponto de coleta sobre a correia 5P27 onde foram retiradas 18,5 kg de pelotas verdes	75
Figura 73 - Recipientes fechados para o transporte das pelotas verdes até o local onde foi realizado o peneiramento.....	75
Figura 74 - Peneiramento manual em peneiras com aberturas quadradas.....	76
Figura 75 - Representação esquemática do controle granulométrico do disco de pelotamento	77
Figura 76 - Tela de controle indicando que a balança 5P34 mede a massa de finos classificada na peneira do forno, enquanto a 5P37 mede o retorno total do pelotamento	78
Figura 77 - Scanner Faro Focus 70 utilizado no escaneamento da estrutura da Usina 5	80
Figura 78 - Esquema ilustrativo das operações envolvidas no escaneamento 3D.....	80
Figura 79 - Nuvem de pontos referente ao escaneamento do circuito de pelotamento da Usina 5	81
Figura 80 - Imagem dos principais equipamentos do pelotamento da Usina 5 após tratamento em CAD.....	81
Figura 81 - Rota de manuseio e transporte das pelotas verdes ao saírem dos discos de pelotamento	82
Figura 82 - Peneira de rolos na entrada no forno de endurecimento da Usina 5, com destaque para a alimentação de pelotas e para a diferença de nível no <i>deck</i>	82
Figura 83 – Diagrama esquemático do sistema de manuseio de pelotas verdes partindo da correia do disco de pelotamento (5P21) até a peneira de rolos do forno (5P32).....	83
Figura 84 - Imagem em CAD da rota selecionada. As setas em amarelo indicam o caminho percorrido pelas pelotas verdes ao sair do disco.....	84

Figura 85 - Detalhes dos ajustes realizados na geometria implementada no EDEM: o retângulo superior mostra em vermelho os ajustes nos defletores, no retângulo abaixo a mesa da peneira com os rolos inseridos manualmente.....	85
Figura 86 - Geometria selecionada para as simulações no EDEM, as setas em vermelho indicam o trajeto das pelotas verdes ao sair do disco até o forno.....	85
Figura 87 - Distribuições de tamanhos das pelotas verdes na saída dos disco (distribuição base) e após a classificação na peneira de rolos (distribuição classificada)	87
Figura 88 - Esquema da simulação do degradômetro com DEM: as partículas em azul são pelotas com tamanhos entre 10-12,5 e em vermelho de 12,5-16 mm	89
Figura 89 - Representação das quedas analisadas no circuito de pelotamento da Usina 5 e os grupos de simulações DEM.....	90
Figura 90 - Simulação da Usina 5, do disco até a alimentação da peneira do forno, as partículas em preto são aquelas de menor diâmetro.....	92
Figura 91 - Imagem da simulação do Caso 2 em regime permanente.....	92
Figura 92 - Simulação da Queda 5, realizada a partir da descarga da peneira do disco.....	93
Figura 93 - Simulação da Queda 6, realizada a partir da correia.....	93
Figura 94 - Dados para a dinâmica do chute móvel (5P30)	94
Figura 95 - As setas vermelhas indicam a direção de movimento do chute móvel e da correia 5P30. O perfil de carga na 5P31 é o resultado dos movimentos oscilatórios do conjunto correia-chute	95
Figura 96 - Simulação do chute móvel mostrando o tempo de residência das partículas. Em detalhe a fábrica de partículas	96
Figura 97 - Simulação da peneira único <i>deck</i> do forno da Usina 5	97
Figura 98 - Simulação DEM de uma fatia de 50 cm de largura da peneira duplo <i>deck</i> da Usina 6 visando o rastreamento de colisões	98
Figura 99 - Sobreposição das geometrias do sistema de manuseio da Usina 5. Original em amarelo; sem a peneira de rolos proposto neste estudo de caso 8, em azul	99
Figura 100 - Simulação sem peneira de rolos após o disco para avaliação da degradação. Os retângulos numerados indicam as regiões de análises das quedas equivalentes	100
Figura 101 - Imagens comparativas das simulações com ensaios executados na planta piloto Vale S.A.	102
Figura 102 - Pelotas na peneira do disco de pelotamento. As cores representam as velocidades, verdes mais lentas chegando a vermelho, mais rápidas (Caso 2).....	103

Figura 103 - Recuperações por classe de tamanho obtidas por simulação DEM da peneira 5P22 do disco de pelotamento	104
Figura 104 - Distribuições granulométricas da alimentação da peneira e do produto <i>onsize</i> na correia 5P27	104
Figura 105 - Curva de partição para a peneira 5P22 obtida por simulação DEM.....	105
Figura 106 - Imagem da simulação da peneira do forno da Usina 5 (Caso 6)	106
Figura 107 - Evolução dos fluxos mássicos globais na simulação DEM da peneira 5P32 da Usina 5.....	107
Figura 108 - Curva de partição para a peneira 5P32 obtida por simulação DEM.....	107
Figura 109 - Simulação da peneira duplo <i>deck</i> do forno da Usina 6 (Caso 7)	108
Figura 110 - Evolução dos fluxos mássicos globais na simulação DEM da peneira de duplo <i>deck</i>	109
Figura 111 - Recuperação mássica em cada um dos três fluxos de produto na peneira de duplo <i>deck</i> (simulado).....	109
Figura 112 - Curva de partição para a peneira duplo <i>deck</i> obtida por simulação DEM.....	110
Figura 113 - Algoritmo do modelo de degradação de pelotas verdes aplicado à uma única pelota verde virtual PVV	114
Figura 114 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas, com pelotas de 12,5x10,0 mm e ângulo de impacto de 90° ...	116
Figura 115 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 12,5x10,0mm e ângulo de impacto de 90°.....	117
Figura 116 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 12,5x10,0mm e ângulo de impacto de 60° e 45°	118
Figura 117 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 10x8 mm e ângulo de impacto de 90°	119
Figura 118 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 16,0x12,5 mm e ângulo de impacto de 90°.....	119
Figura 119 - Comparação entre simulações e experimentos de queda individual com pelotas industriais e ajuste do modelo com os parâmetros da Tabela 19.....	121

Figura 120 - Espectros de energia de colisão para as pelotas verdes simuladas nos ensaios com o degradômetro para alturas de queda de 500 mm (a) e 800 mm (b).....	123
Figura 121 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro com altura de queda de 500 mm (condições 1 e 3)	123
Figura 122 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro com altura de queda de 800 mm (condições 2 e 4)	124
Figura 123 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro no primeiro impacto de 800 mm de altura e seguida por quedas de 500 mm (condições 5 e 6).....	125
Figura 124 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro do condição 7 (3 quedas de 500 mm e 2 quedas de 800 mm) e condição 8 (3 quedas de 800 mm e 2 quedas de 500 mm).....	125
Figura 125 – Distribuição granulométrica das pelotas verdes medida no <i>onsize</i> da peneira do disco obtida por amostragem, comparada com o resultado da simulação com o MDPV	126
Figura 126 – Diagrama de Pareto dos percentuais de finos totais gerados nas diversas quedas durante a passagem das pelotas pelo circuito da Usina 5, obtidos por simulação.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do minério de ferro por tamanho e aplicação (MOURÃO, 2007)	3
Tabela 2 - Principais diferenças entre os circuitos de pelotamento das usinas	41
Tabela 3 - Estudos relacionados à manuseio e degradação de granulados e pelotas de minério de ferro.....	61
Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de contato do modelo Hertz-Mindlin JKR usado nas simulações de DEM (SILVA <i>et al.</i> 2018)	66
Tabela 5 - Velocidades de movimentação das correias transportadoras configuradas nas simulações DEM	87
Tabela 6 - Velocidades dos rolos das peneiras do disco e do forno simuladas no DEM	88
Tabela 7 - Detalhes das simulações realizadas para o degradômetro.....	88
Tabela 8 - Parâmetros de movimentação do chute móvel.....	94
Tabela 9 - Movimentos aplicados no EDEM relativos à velocidade de movimento do chute móvel	95
Tabela 10 - Parâmetros dos materiais e dos modelos de contato usados nas simulações DEM com o coeficiente de restituição pelota-borracha corrigido.....	102
Tabela 11 - Rendimentos da peneira em relação à alimentação para os fluxos de <i>undersize</i> , <i>onsize</i> e <i>oversize</i> obtidos por simulação DEM	105
Tabela 12 - Rendimentos em relação à alimentação dos fluxos de <i>undersize</i> , <i>onsize</i> e <i>oversize</i> da simulação das peneiras do forno	107
Tabela 13 - Parâmetros do modelo de degradação de pelotas verdes ajustados para as pelotas produzidas no LTM	115
Tabela 14 - Parâmetros do modelo de degradação de pelotas verdes ajustados para as pelotas coletadas na Usina 5	121
Tabela 15 - Características químicas e físicas da mistura com <i>pellet feed</i> no disco de pelotamento	122
Tabela 16 - Retorno das peneiras de rolos da Usina 5.....	126
Tabela 17 - Resumo dos casos de simulação usando o MDPV em função do tipo de peneira na saída do disco e na entrada do forno.....	127
Tabela 18 – Percentual de finos gerados em cada queda e sua granulometria de origem.....	128
Tabela 19 – Distribuições granulométricas do circuito atual da Usina 5, com peneira de rolos na saída dos discos (<i>undersize</i> 9 mm e <i>oversize</i> 16 mm), e com um único <i>deck</i> na entrada do forno com <i>undersize</i> em 9 mm (BM01)	130

Tabela 20 – Distribuições granulométricas do circuito modificado da Usina 5, sem a peneira na saída dos discos e com duplo <i>deck</i> na entrada do forno (<i>undersize</i> com 9 mm e <i>oversize</i> com 16 mm) (BM05).....	131
Tabela 21 - Circuitos de pelotas verdes simulados com o MDPV	132
Tabela 22 - Rendimentos do processo considerando uma base de produção de pelotas em um único disco igual a 100 t/h.....	133

LISTA DE SÍMBOLOS

E	.....	Energia de impacto (J/kg)
E_{50}	.....	Energia de fratura mediana (J/kg)
E_N	.....	Energia dissipada na componente normal da colisão (J/kg)
E_T	.....	Energia dissipada na componente tangencial da colisão (J/kg)
E_n	.....	Energia de fratura (J/kg)
E_s	.....	Energia específica de ativação (J/kg)
h	.....	Altura de queda (m)
h^*	.....	Altura acumulada de queda (m)
$f(h^*)$	.....	Função da altura de queda
D	.....	Equação de acúmulo do dano
k	.....	Evento de impacto
a	.....	Parâmetro de ajuste
b	.....	Parâmetro de ajuste
σ	.....	Desvio padrão da energia específica de fratura
γ_s	.....	Tensão superficial do sólido (N/m)
γ_{sl}	.....	Tensão superficial da interface sólido-líquido (N/m)
γ_l	.....	Tensão superficial do líquido (N/m)
θ	.....	Ângulo de impacto (°)
γ	.....	Parâmetro de retardo na degradação

1. INTRODUÇÃO

O aço é uma liga metálica formada majoritariamente por ferro e carbono, essencial para o desenvolvimento econômico. Este material é amplamente utilizado na construção civil, bem como na fabricação de veículos e de utensílios domésticos. A principal matéria-prima, o minério de ferro, no passado só era extraído na natureza, quando encontrado em elevados teores de ferro. Segundo Heydari *et al.* (2016) devido ao empobrecimento das minas, as empresas concentram o minério extraído para aumentar o teor de óxido de ferro destinado à produção de ferro metálico. Atualmente os países, especialmente aqueles que não têm reservas apreciáveis de minério de ferro, competem uns contra os outros pela segurança no fornecimento desse recurso (HAO *et al.*, 2018). Com o rápido desenvolvimento da economia chinesa, a importação e uso de recursos a base de ferro aumentaram significativamente, principalmente entre os anos de 2000 e 2015. Conforme descrito por Qiangfeng *et al.* (2018), em anos recentes as importações de minério de ferro na China aumentaram de 70 para 953 milhões de toneladas (Mt), e o consumo de minério de ferro aumentou de 175 para 1190 (Mt), ou seja, a dependência externa aumentou de 40 para 80 %. Este alto e rápido consumo de ferro introduziu uma série de desafios para a China e uma grande oportunidade para países produtores de minério de ferro.

No Brasil, o minério de ferro é um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico. O país se destaca entre os maiores produtores, por possuir as maiores jazidas de minério de ferro do mundo. Conforme destacado na Figura 1, as maiores jazidas estão localizadas na porção central de Minas Gerais, chamada de Quadrilátero Ferrífero. Essa região possui importantes depósitos de minério de ferro, alguns dos quais com teores acima de 60 % de ferro (PAVANI *et al.*, 2018).



Figura 1 - Esquemático dos Complexos Itabira, Minas Centrais, Mariana e Minas Oeste

Além dos granulados, as jazidas de minério de ferro contêm naturalmente uma parcela de finos de tamanho inferior a 6,3 mm. Além disso, durante o beneficiamento, manuseio e transporte desse mineral, são geradas grandes quantidades de partículas finas e ultrafinas, cuja aplicação direta nos reatores de redução seria impraticável. A utilização do minério nesse estado tornaria a carga pouco permeável à passagem dos gases redutores, diminuindo a eficiência operacional (MEYER, 1980).

Até o ano de 1950, pilhas de finos de minério com altos teores de ferro eram formadas sem utilização comercial. Essas pilhas eram consideradas rejeitos nas minerações, gerando graves problemas ambientais. Com o propósito comercial e de minimização do impacto ambiental causado pelos finos e particulados, surgiram os processos de aglomeração. Os meios empregados para formação de aglomerados de finos foram baseados em processamentos térmicos a altas temperaturas. Surgiram assim, os processos de sinterização, no final do século 19 e pelletização no início do século 20 (MEYER, 1980). Com esses processos, todos os finos gerados na mineração eram classificados por tamanho, aplicação e produto (Tabela 1), e puderam ser aglomerados para utilização nas usinas siderúrgicas (ARAÚJO, 2005).

Tabela 1 - Classificação do minério de ferro por tamanho e aplicação (MOURÃO, 2007)

MATÉRIA PRIMA	Granulado	<i>Sinter feed</i>	<i>Pellet feed</i>
GRANULOMETRIA	6,35-31,5mm	0,15-6,35mm	Menor 0,15mm
APLICAÇÃO	Alto forno	Sinterização	Pelotização
PRODUTO	Granulado	Sinter	Pelota

O minério de ferro com granulometria entre 6,35 e 31,5 mm é utilizado diretamente nos reatores de redução. Conforme mencionado, os finos de minério (*sinter feed* e *pellet feed*) se forem abastecidos diretamente, reduzem a permeabilidade do forno, o que é essencial para a redução do minério (MOURÃO, 2007). Para ser usado nos reatores, os finos passam por um processo de aglomeração, que pode ser sinterização ou pelotização, dependendo de sua granulometria.

Dentre as mineradoras no mundo, a Vale S.A. se destaca por ser a maior produtora de minério de ferro e pelotas. Ela registrou um aumento de 23 % em suas receitas em comparação com o ano anterior em 2017, contribuindo principalmente pelo segmento de negócios de minerais ferrosos (NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO BRASIL, 2018).

Os estudos conduzidos pela Vale para construção da primeira usina de pelotização começaram em 1961, situada na cidade de Vitória no Espírito Santo, tendo esta usina entrado em operação em 1969. Atualmente a Vale possui treze usinas de pelotização no mundo, sendo que oito delas situam-se na Unidade de pelotização de Tubarão (ES), duas no Quadrilátero Ferrífero (MG), uma em São Luís (MA) e duas em Oman no Oriente Médio.

A produção de pelotas pela Vale em 2017 foi de 50,3 Mt, 9 % maior que 2016. No segundo trimestre de 2018, a Vale alcançou um novo recorde, produzindo 12,8 Mt, ficando 0,6 Mt acima de 2018. Ao entrar em operação com a usina de pelotização de São Luís em 2018, a Vale passou a ter capacidade para 55 Mt/ano (VALE S.A., 2018).

Na pelotização, muitos recursos são gastos durante o processamento de minério até a saída das pelotas queimadas no forno de endurecimento, principalmente na fase de cominuição, a qual demanda altos consumos de energia elétrica. Além disso, os finos e cacos de pelotas verdes que não são removidos durante a etapa de classificação nas peneiras de rolos, entram no forno dificultando a passagem dos gases. Isso tem como resultado o comprometimento de parâmetros de qualidade do produto, bem como a

redução da produtividade e elevação dos custos de produção. Após a sua primeira usina de pelotização em 1969, a Vale instalou outras sete usinas, nos anos de 1973 (Usina II), 1976 (Itabrasco), 1978 (Nibrasco I e II), 1979 (Hispanobras), 1998 (Kobrasco) e 2014 (Usina 8).

Segundo relatório interno da Vale S.A., o período entre as instalações das usinas foi um dos fatores que contribuiu para que ocorressem diferenças construtivas, principalmente no *layout* do pelotamento, fator este que influencia na integridade das pelotas verdes durante o transporte.

Garantir a integridade das pelotas verdes durante o manuseio e transporte até o forno de endurecimento é um grande desafio na pelotização. A relação entre as alturas de queda e a fragmentação das pelotas não foi entendida de maneira adequada no passado. Caso fosse, permitiria tomar decisões sobre alterações de *layout* com o nível de confiança suficiente para a tomada de decisão em cenários de escassez de recursos de investimento. Além disso alterações nas usinas poderiam afetar o rendimento operacional dos equipamentos, prejudicando o programa de produção para atendimento aos clientes.

A escassez de modelos matemáticos preditivos tem sido contratempo, pois permitiriam avaliar circuitos de transporte de pelotas verdes sem intervenção no desempenho das plantas de pelotização.

Com o avanço da modelagem mecanicista, originalmente desenvolvida para granulado de minério de ferro (TAVARES e CARVALHO, 2012) e depois consolidada para pelotas queimadas, tornou-se possível utilizar o Método de Elementos Discretos (DEM) como ferramenta aplicada na avaliação do comportamento das pelotas verdes em circuito de pelotamento. Um exemplo foi a otimização de peneiramento em peneiras de rolos (SILVA *et al.*, 2018), onde foram simulados diversos parâmetros das peneiras para otimização da distribuição granulométrica do produto.

A disponibilidade de um modelo matemático aplicado a degradação de pelotas verdes (MDPV) seria de grande serventia no suporte às equipes de engenharia, pois poderia prever a degradação em diferentes cenários durante o transporte. Além disso, o MDPV também poderia ser utilizado para redução de riscos operacionais durante a implantação de projetos aplicado em circuitos de transporte de pelotas verdes.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo matemático para prever a degradação de pelotas verdes em operações de manuseio no interior da usina de pelotização, com vistas a aplicar na tomada de decisão quanto à pertinência e eficácia de medidas para reduzir a degradação de pelotas.

2.2 Objetivos específicos

Desenvolver ensaio expedito de bancada para avaliar a resposta de pelotas à degradação mecânica.

Demonstrar a utilidade e relevância das ferramentas desenvolvidas pela realização de estudos de casos de manuseio de pelotas em usinas de pelotização, utilizando simulação acoplada ao método dos elementos discretos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pelotização de minério de ferro

Conforme Santos e Brandão (2003) e Casagrande *et al.* (2017), o minério de ferro é a principal matéria prima para a produção de pelotas, com 97 % da composição total, seguida do aglomerante e do combustível sólido. A mineralogia e microestrutura dos minerais são parâmetros importantes em várias etapas do processamento industrial, influenciando o consumo de energia em operações de cominuição, a escolha de método de concentração e o desempenho de usinas de pelotização (GRAÇA *et al.*, 2015). Portanto, conhecer as características do minério é fundamental para a melhoria do desempenho do processo e tomada de decisão nas operações unitárias de uma usina de pelotização.

De uma forma simplificada, pode-se classificar os minérios de ferro das reservas da Vale em dois grandes grupos: minérios supergênicos e minérios tectônicos-hidrotermais (CASAGRANDE *et al.*, 2017).

3.1.1 Minérios supergênicos

Os minérios supergênicos apresentam coloração negro fosco ou marrom devido à presença de hidróxidos de ferro (Figura 2).



Figura 2 - Minérios supergênicos (CASAGRANDE *et al.*, 2017)

As suas principais características são:

- Seu enriquecimento natural ocorre por processos supergênicos (lixiviação da sílica/carbonato e enriquecimento residual de ferro);

- Possuem constituição mineralógica característica com presença marcante das martitas (hematita porosa) e goethitas (maciça e terrosa);
- Suas características químicas apresentam teores elevados de fósforo e óxido de alumínio;
- São de fácil moagem e aglomeração a frio;
- Apresentam dificuldade de filtração;
- Produzem pelotas com alta redutibilidade e baixa resistência física.

3.1.2 Minérios tectônico-hidrotermais

Os minérios tectônico-hidrotermais são predominantemente de cor azulada e brilho intenso (Figura 3).



Figura 3 - Minérios tectônico-hidrotermais (CASAGRANDE *et al.*, 2017)

Suas principais características são:

- Seu enriquecimento natural ocorre por processos tectônicos, metamórficos, e/ ou hidrotermais. Estes processos são principais geradores de minério com alto teor de ferro;
- Em sua constituição mineralógica predomina a hematita “lisa” (especular, lamelar, granular e lobular);
- Suas características químicas apresentam baixos teores de fósforo, óxido de alumínio e PPC (perda por calcinação);
- São de fácil filtração;

- Garantem melhor resistência mecânica nas pelotas queimadas, porém com baixa redutibilidade.

O tipo de minério utilizado na pelletização é de suma importância para o processo produtivo. Além de influenciarem no rendimento das etapas de processo, também impactam na qualidade física e metalúrgica das pelotas produzidas.

Conforme descrito por Meyer (1980), o processo se inicia com a formação de pilhas homogêneas, que são recuperadas e submetidas ao processo de moagem. A filtragem recebe a polpa com distribuição granulométrica e percentual de sólidos adequados ao processo. Nessa fase é controlada o teor de umidade da mistura que pode variar entre 8 e 9 %. Em seguida é adicionado aglomerante para auxiliar o processo de pelletamento e fundentes para auxiliar o tratamento térmico das pelotas. A formação das pelotas verdes é seguida pela classificação granulométrica e um tratamento térmico de queima. O produto de todas estas etapas de processo é uma pelota de minério de ferro que é utilizada nas usinas siderúrgicas.

3.1.3 Fluxograma típico do processo de pelletização em Tubarão

As diversas etapas típicas do processo de pelletização são citadas a seguir, com suas respectivas numerações representadas na Figura 4:

1. Empilhamento e homogeneização de finos;
2. Moagem e classificação;
3. Espessamento;
4. Homogeneização;
5. Filtragem;
6. Prensagem;
7. Mistura (adição de aglomerante / aditivos);
8. Pelotamento;
9. Peneiramento de pelotas verdes;
10. Queima;
11. Peneiramento de pelotas queimadas;
12. Empilhamento de pelotas queimadas.

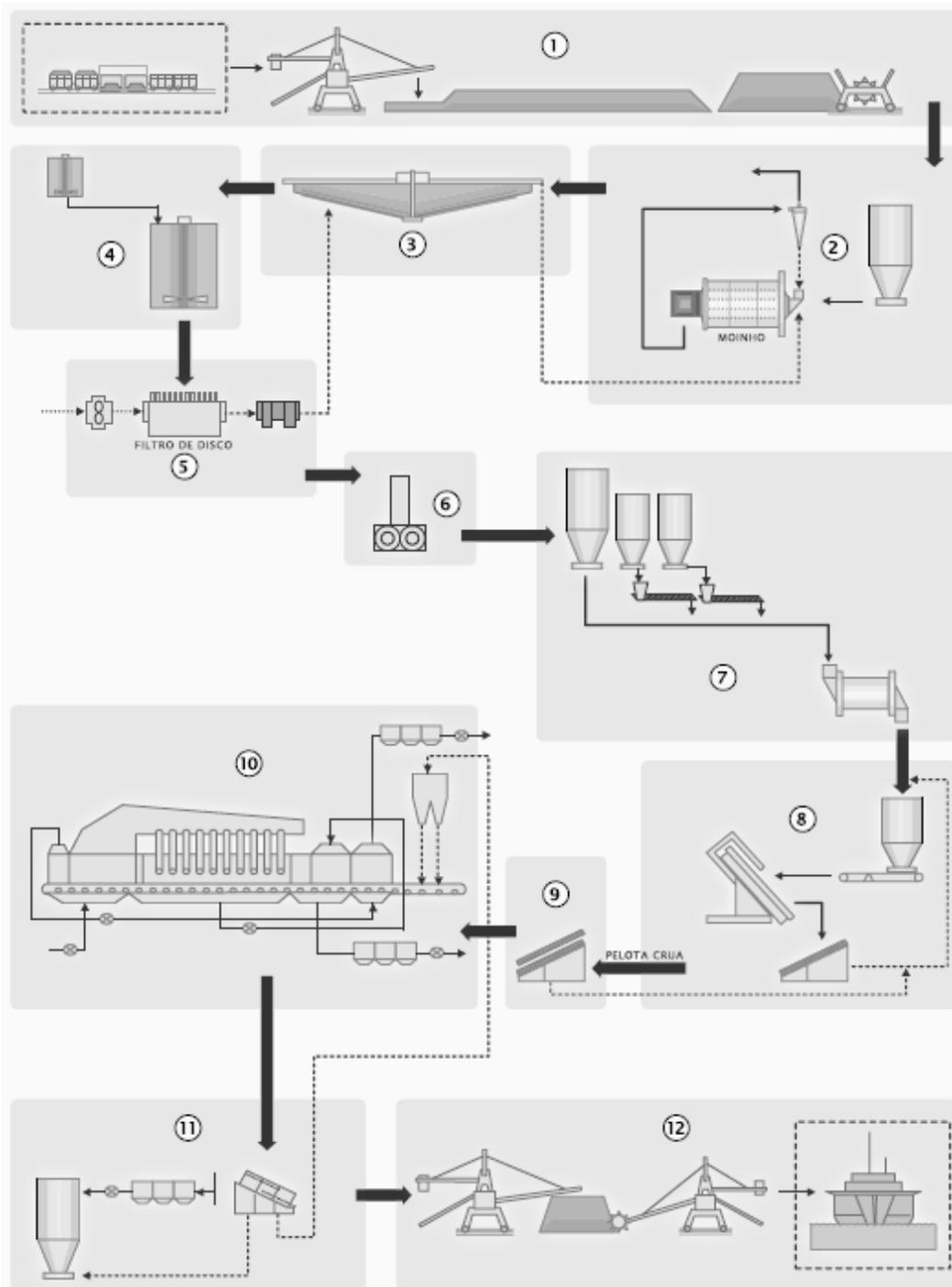


Figura 4 - Fluxograma típico de um processo de pelletização

Para se alcançar uma produção de pelotas com qualidade satisfatória e custo competitivo é necessário que haja eficiência e integração entre todas as etapas do processo.

3.1.4 Pátio de matérias primas

A formação das pilhas de pellet feed é programada em função do tipo de pelotas a serem produzidas. A carga de matérias-primas a ser alimentada ao processo de

pelotização pode ser constituída de diferentes tipos de *pellet feed* e aditivos. Além das flutuações das propriedades físicas e químicas destes constituintes, inerentes à sua gênese, estrutura cristalina, processos de beneficiamento a que foram submetidos, outro fator a dificultar a obtenção de uma carga homogênea consiste na necessidade de misturar-se pequenas quantidades de aditivos a uma enorme massa de finos de minério de ferro.

Portanto, antes de serem introduzidas no circuito de pelotização, as matérias primas são homogeneizadas por meio da formação de grandes pilhas (Figura 5). A recuperação das pilhas é realizada através de caçambas giratórias (Figura 6) que faz um “fatiamento” transversal nas pilhas de forma a homogeneizar ainda mais os insumos.



Figura 5 - Empilhadeira formando uma pilha de finos de minério de ferro

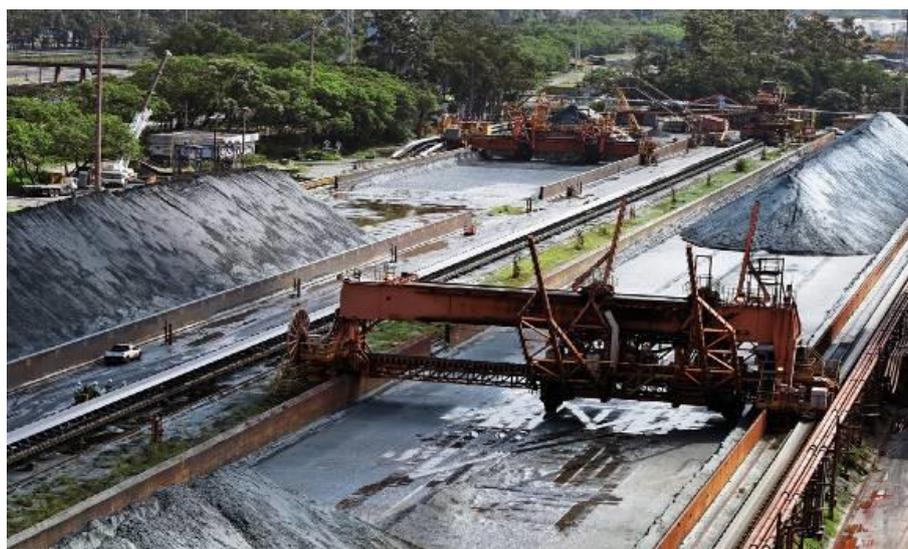


Figura 6 - Pilhas de finos de minério de ferro recuperando para usina de pelotização

A proporção dos componentes da pilha de minério é definida em função de análises

químicas efetuadas na origem dos minérios, características dos insumos e das características do produto desejado (GRAÇA, 2015).

3.1.5 Moagem

O processo de formação de pelotas em usinas de pelotização, tanto no pelotamento quanto na queima, exige que as partículas minerais possuam granulometria fina (MEYER, 1980). Apesar da maioria do *pellet feed* alimentado às usinas possuir pequenas dimensões de partículas, grande parte delas possuem dimensões superiores a 0,044 mm. De acordo com estudos desenvolvidos e comprovações práticas, para uma boa formação de pelotas, espera-se que pelo menos 75 % do material a ser pelotizado possua dimensões individuais de partículas igual ou inferior a 0,044 mm com superfície específica entre 1700 a 1800 cm²/g (Thomazini *et al.*, 2019). Apesar da faixa granulométrica ser padrão de controle, a variável superfície específica é o fator determinante do sucesso na formação de uma boa pelota, pois de forma indireta é a superfície específica que determina a quantidade de micro finos ideal para o alcance dos objetivos. É no processo de moagem do minério, tipicamente realizado em moinhos de bolas (Figura 7), que se alcança os dois parâmetros físicos ótimos (granulometria e superfície específica) (MEYER, 1980).



Figura 7 - Moinhos de bolas instalados na usina de pelotização da Vale S.A.

De acordo com as características de cada tipo de pelota a ser produzida são fixados valores de superfície específica, que de acordo com os padrões atuais variam de 1.830 a 2.100 cm²/g. A moagem geralmente é feita em moinhos de bolas, tendo como corpos moedores esferas ou cylpebs (cones truncados) de aço ou ferro fundido (VALE S.A., 2011).

3.1.6 Espessamento

A função do espessador é aumentar o percentual de sólidos da polpa de minério moído. Este fenômeno ocorre em função da diferença de densidade dos materiais sólidos em relação à densidade da água. A polpa proveniente dos hidrociclones, contendo cerca de 20 % de sólidos é transferida para um espessador circular (Figura 8), onde ocorre a decantação. O material decantado, com uma concentração de sólidos de aproximadamente 70 %, é bombeado para tanques homogeneizadores (Figura 10).



Figura 8 – Espessador de polpa de minério de ferro

3.1.7 Adição de Carvão

A adição de combustíveis sólidos, sempre que ocorrer, poderá ser feita via adição de polpa nos tanques homogeneizadores (Figura 9). O objetivo original para utilização de carvão era obter uma fonte energética alternativa, com menor custo final das pelotas. A utilização do carvão, hoje, não se dá apenas pelo seu custo energético comparado ao gás natural, e sim, pelo efeito benéfico no processo de queima. O combustível sólido contido no interior das pelotas gera uma queima interna e conseqüentemente um melhor aporte térmico no leito dentro do forno.



Figura 9 - Polpa de minério de ferro homogeneizada com carvão mineral

3.1.8 Homogeneização

Os tanques homogeneizadores, além de armazenar a polpa de minério moído, mantêm sua homogeneização. Os sólidos em suspensão minimizam as variações das características físicas e químicas da polpa. O armazenamento de polpa garante um estoque intermediário de minério evitando paralisações nas etapas subseqüentes, o que é fundamental para a estabilidade do processo.



Figura 10 - Tanques homogeneizadores na usina de pelotização da Vale S.A.

3.1.9 Filtragem

A filtragem é uma operação de separação sólido-líquido, empregada nas usinas de processamento mineral, que se caracteriza pela passagem de uma polpa através de um meio poroso de tal forma que haja retenção dos sólidos e passagem do líquido, ou seja,

retira-se a água da polpa tornando o material mais concentrado pronto para a produção de pelotas verdes no pelotamento (ARAÚJO, 2005).

Nas usinas que utilizam moagem a úmido, é necessário um estágio de filtragem, para adequação do material para etapa de pelotamento. A polpa de minério deve ter seu teor de água reduzido de aproximadamente 30 % para valores em torno de 8 a 9 %, a qual é a faixa de umidade considerada adequada para a etapa posterior (formação das pelotas verdes). A filtragem é normalmente realizada em filtros rotativos a vácuo, de disco ou tambor. Os filtros de disco vistos na Figura 11 são os mais usados, por propiciarem a maior capacidade no menor espaço físico. No caso de polpa de minério de ferro filtrada, os filtros de discos a vácuo têm capacidades variando de 0,4 a 1,5 t/h por m² de área filtrante (TAMFELT, 2005).



Figura 11 - Filtro de disco a vácuo na usina de pelotização da Vale S.A.

Para manter a estabilidade no processo de filtragem, é necessário que haja um equilíbrio entre a produção da moagem, a disponibilidade de polpa estocada nos tanques homogeneizadores e o número de filtros em funcionamento. A temperatura da polpa deve ser constante para evitar que este fator influencie negativamente no controle da umidade da polpa retida no filtro.

3.1.10 Prensagem

Nesta etapa o minério sofre cominuição por meio da quebra das partículas com o objetivo de atingir a superfície específica ótima para a etapa subsequente. O minério filtrado com superfície específica em torno 1.600 cm²/g, é prensado em prensas de rolos (Figura 12) para reduzir o tamanho das partículas e obter superfície específica que varia

de 1.900 a 1.950 cm²/g. Vale ressaltar que a umidade é um parâmetro que define o sucesso desse processo, devendo permanecer em um valor médio em torno de 8,0 % (VALE S.A., 2011).



Figura 12 - Prensa de rolos na usina de pelotização da Vale S.A.

3.1.11 Dosagem de Aglomerantes

Os aglomerantes, junto com o minério de ferro filtrado e prensado, entram no misturador após passar por balanças dosadoras. Segundo Meyer (1980), o aglomerante mais utilizado é a bentonita, porém atualmente existem diversos outros aplicados na pelotização. A homogeneização desta mistura de minério com aglomerante é feita em misturadores cilíndricos rotativos (Figura 13). Em seguida, o material segue para os discos de pelotamento, concluindo a etapa de preparação das matérias primas (VALE, 2005).



Figura 13 - Misturador cilíndrico rotativo na usina de pelotização da Vale S.A.

O uso de aglomerantes na pelletização de minério de ferro visa cumprir duas funções básicas: aumentar a resistência da pelota verde antes de entrar no forno de pelletização e evitar o colapso das pelotas durante o processo de queima, quando ocorre a saída dos gases gerados pela vaporização de água. A bentonita é o aglomerante mais utilizado industrialmente, e seu mecanismo de ligação no processo de ganho de resistência da pelota já foi amplamente estudado e compreendido (MEYER, 1980).

3.1.12 Pelotamento

A formação das pelotas verdes, também conhecida como pelotamento, é uma das etapas mais importantes do processo de pelletização, sendo influenciada por diversos fatores, com reflexos diretos sobre a qualidade do produto. A produção das pelotas verdes pode ser realizada em tambores ou discos de pelotamento. Os tambores são cilindros rotativos com extremidades abertas (Figura 14). A peneira na saída classifica as pelotas e retorna as menores, que servem de núcleos para formação de novas pelotas.



Figura 14 - Tambor de pelotamento em usina de pelletização da Vale S.A.

A carga de material, previamente preparada, é alimentada na extremidade mais elevada do tambor. Quando necessário, ocorre aspersão de água em determinados pontos, a fim de garantir as melhores condições para a formação das pelotas verdes. As partículas de minério sofrem rolamentos sucessivos numa trajetória espiral até atingirem a extremidade de descarga. De acordo com o comprimento, inclinação, velocidade de rotação e quantidade de carga alimentada, são produzidas pelotas verdes com uma determinada distribuição de tamanhos, a uma taxa de produção que depende do tipo de

minério utilizado. Para a produção de pelotas verdes numa faixa de tamanhos estreita e definida, os tambores operam em circuito fechado com peneiras de rolos na saída do tambor.

O disco de pelotamento (Figura 15) é, atualmente, o mais utilizado para a produção de pelotas verdes. São dotados de dispositivos que permitem a regulação da velocidade de rotação e o ângulo de inclinação. O disco possui internamente raspadores de fundo para o controle de espessura da camada de minério úmido que se forma no fundo do disco, de forma a garantir boas condições para o rolamento do material. Os raspadores laterais têm por função formar uma camada lateral no interior do disco com o objetivo de reduzir o desgaste das pelotas por abrasão e facilitar o escoamento do material na saída do disco. A capacidade de produção dos discos pode variar de 90 a 170 t/h, dependendo da concepção do projeto e da distribuição granulométrica do produto (VALE S.A., 2011).



Figura 15 - Disco de pelotamento na usina de pelotização da Vale S.A.

De acordo com Pandey *et al.* (2012) a distribuição de tamanho das pelotas formadas nos discos de pelotamento depende principalmente da natureza das matérias-primas, da taxa de alimentação, da posição de alimentação, da altura do raspador, da velocidade de rotação do disco, da posição dos raspadores, da inclinação do disco, da vazão de água adicionada e do tempo de residência. Meyer (1980) destaca que a variável que apresenta maior influência e que pode ser controlada no disco de pelotamento é o tempo de residência do material dentro do disco.

3.1.13 Queima

A área de queima, ou endurecimento das pelotas, é praticamente a etapa final do processo de pelletização que trata da qualidade física da pelota queimada. As características adquiridas pelas pelotas no processo de queima são irreversíveis, ou seja, não é possível requeimar uma pelota, no intuito de melhorar suas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. Segundo Meyer (1980), o tratamento térmico a que são submetidas as pelotas pode ser dividido nas etapas a seguir, com suas respectivas numerações representadas na Figura 16.

1. Secagem;
2. Pré-queima;
3. Queima;
4. Pós-queima;
5. Resfriamento.

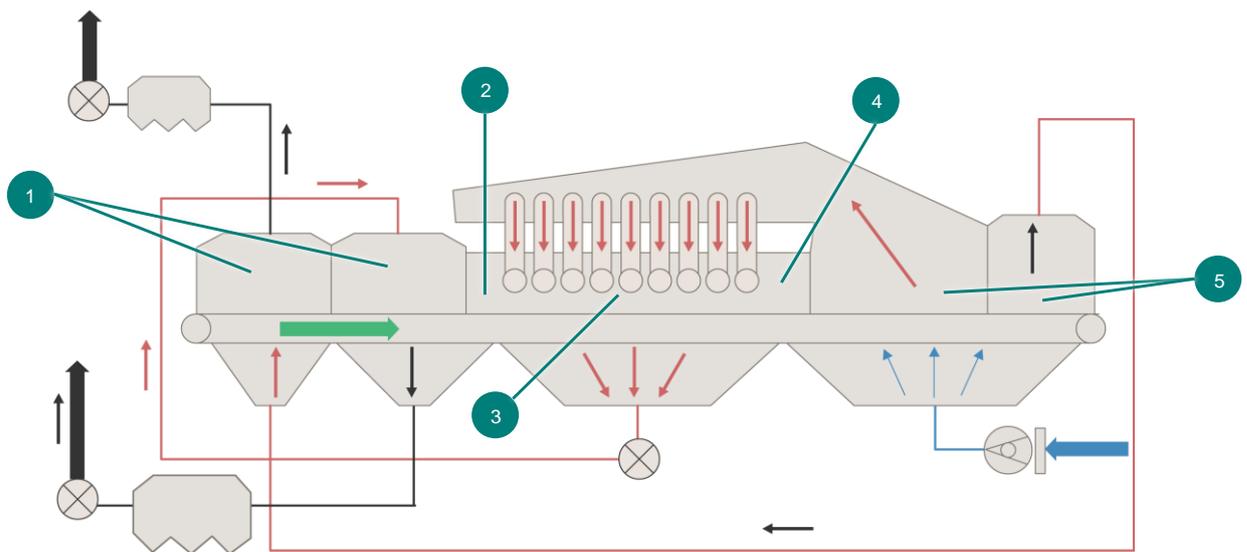


Figura 16 – Esquema do forno de endurecimento de uma usina de pelletização

Secagem: as pelotas com umidade em torno de 8 a 9 % são expostas bruscamente à ação de gases quentes, a temperaturas entre 320 a 400°C. Nesta etapa, as pelotas devem perder seu conteúdo de água, preservando sua integridade física, resistindo a tensões internas que surgem em função da evaporação da água contida nos poros, e às pressões dinâmica e estática dos gases quentes.

Pré-queima: as pelotas secas são pré-aquecidas a uma temperatura aproximada de 900°C, de forma a garantir o máximo tempo de exposição das pelotas à temperatura de

queima, na etapa subsequente. Nesta etapa é grande o risco de choque térmico, devido à brusca e acelerada elevação da temperatura. A resistência mecânica das pelotas deve ser suficiente para suportar este impacto sem a ocorrência de choque térmico, que leva a fissuras, trincas e à própria desintegração das pelotas.

Queima: Nesta etapa as pelotas são submetidas à máxima temperatura do ciclo térmico, que atinge valores da ordem de 1300 a 1350°C, dependendo do tipo de minério de ferro e da composição química da pelota que está sendo produzida. Sob estas condições ocorre a consolidação final do produto, com o estabelecimento de pontes de óxido de ferro e das reações envolvendo componentes de ganga (formação da escória). As ligações que se estabelecem entre os grãos são diretamente influenciadas pela temperatura, pelo tempo de permanência nesta temperatura e pela natureza da atmosfera do forno.

Pós-Queima: Esta etapa tem por objetivo favorecer a homogeneização térmica do leito de pelotas. É uma etapa de curta duração na qual o calor é transferido ao longo do leito, melhorando as condições de queima das pelotas das camadas inferiores.

Resfriamento: A última etapa do ciclo, o resfriamento, é de grande importância, pois influencia no rendimento térmico do forno, que depende da capacidade de recuperação do calor absorvido pelas pelotas ao longo do processamento térmico. A recuperação do calor é feita por meio do aquecimento de ar frio que, em seguida, é utilizado nas etapas de secagem, pré-queima e queima (MEYER, 1980).

A produtividade do forno e o endurecimento das pelotas de cima para o fundo são fortemente influenciados pela permeabilidade do leito de pelotas verdes e pela altura da camada de pelotas verdes. A altura da camada pode ser controlada pela manipulação da velocidade da grelha do forno (SUSHANTA *et al.*, 2009).

3.1.14 Peneiramento de pelotas queimadas

Concluída a etapa de tratamento térmico, as pelotas queimadas são levadas por correias transportadoras até a peneira de pelotas queimadas (Figura 17). Nesta etapa os finos (material menor que 5 mm) gerados durante os processos de pelotamento e queima são separados do produto pelo peneiramento vibratório.



Figura 17 - Peneira de pelotas queimadas na usina de pelletização da Vale S.A.

3.1.15 Empilhamento das pelotas queimadas

A produção de pelotas queimadas é estocada em pilhas formadas em pátios por meio de máquinas denominadas empilhadeiras (Figura 18). Em geral, após a estocagem, as pelotas são retomadas com o auxílio de máquinas recuperadoras de caçambas e embarcadas em navios, que as transportam ao seu destino.



Figura 18 - Pilhas de pelotas queimadas com empilhadeira ao fundo

3.2 Formação de granulados

Embora a ideia de rolar pós umedecidos tenha sido reportada no século 19, pesquisas avançadas relacionadas aos fundamentos da pelota tornaram-se importantes somente quarenta anos depois. A resistência da pelota foi devido à compactação resultante da força da pelota umedecida em repouso sobre as partículas individuais. Mais tarde, foi introduzida a teoria da capilaridade para colar e dar resistência às pelotas úmidas. Foi

relatado também que a resistência da pelota está relacionada à superfície específica do material a ser pelletizado, ao teor de umidade e à porosidade das pelotas (ABOUZEID e SEDDIK, 1981).

Para entender e quantificar o processo de formação das pelotas é indispensável que se tenha conhecimento sobre os mecanismos que envolvem o crescimento desses grânulos. As forças que contribuem para a formação das pelotas a partir de partículas sólidas podem ser classificadas como naturais ou físicas, aplicadas ou mecânicas. Quando a aglomeração se dá por ação natural, ocorrem entre as partículas interações instantâneas do tipo Van der Waals e forças magnéticas (KAWATRA e RIPKE, 2002).

No processo de granulação via úmida o líquido é adicionado à mistura de pós, geralmente por meio de aparatos que permitem a pulverização, e será distribuído como um filme ao redor e entre as partículas. Esse líquido deve ser adicionado em quantidade suficiente a ponto de exceder a quantidade mínima necessária para a formação de uma camada imóvel e produzir um filme móvel. Há três estágios de distribuição de água entre partículas, que são ilustrados na Figura 19 e representados na Figura 20. O estágio pendular apresenta-se com baixos níveis de umidade, sendo que as partículas são unidas pelo líquido em forma de anéis. Ocorre uma adesão devido às forças de tensão superficial da interface líquido-ar e devido à pressão de sucção hidrostática nas pontes de líquido. Quando todo o ar entre as partículas for deslocado, tem-se o estágio capilar e as partículas se mantêm unidas devido à sucção.

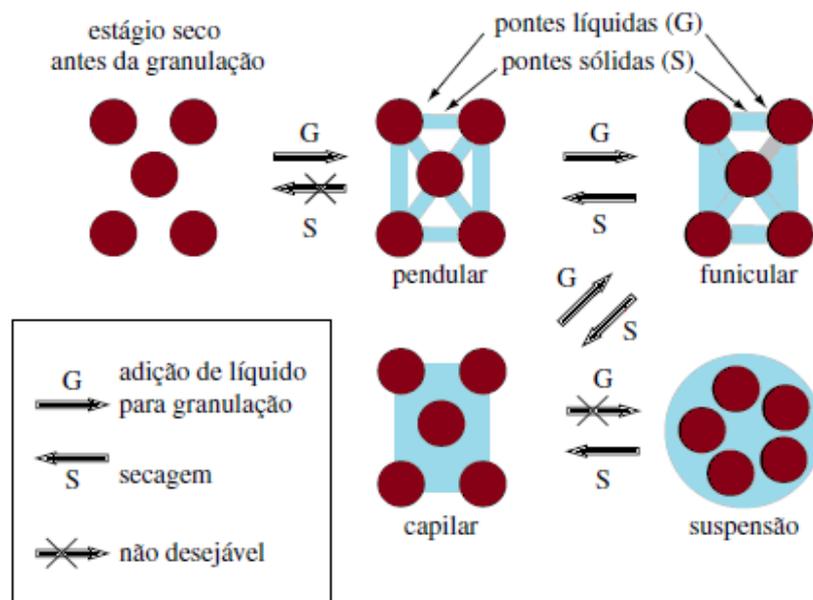


Figura 19 - Distribuição de líquido entre as partículas durante sua formação e secagem (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973)

A adesão das partículas se inicia como resultado da atuação do filme líquido, sendo que a agitação e/ou adição de mais líquido promove mais adesão de partículas. O mecanismo pelo qual um pó seco é transformado em uma massa granulada varia de acordo com o tipo de equipamento, escolha e quantidade de aditivos, tempos e métodos de operação.

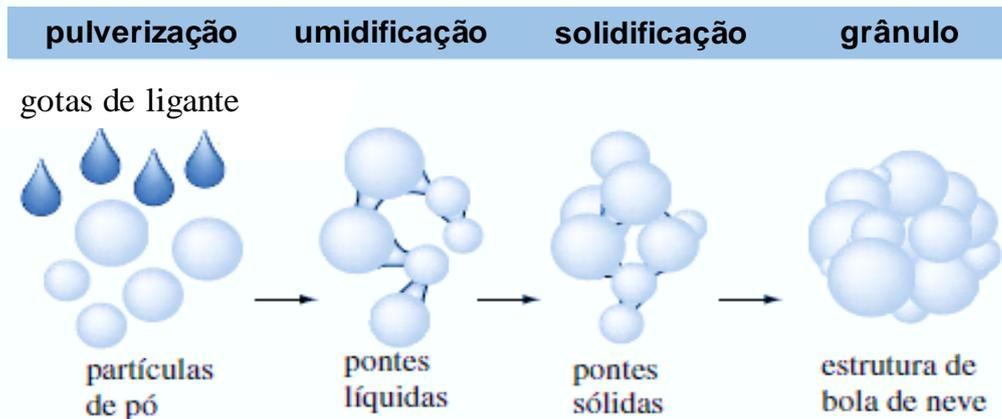


Figura 20 - Desenho esquemático da granulação via úmida (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973)

O mecanismo apresentado mostra uma generalização bastante didática e útil do processo de granulação, que pode ser dividido nas fases a seguir (SASTRY e FUERSTENAU, 1973).

- **Nucleação**

A granulação inicia com a adesão de partículas através das pontes líquidas. Várias partículas se unem para a formação do estágio pendular, como é ilustrado na Figura 19. Posteriormente, com a agitação desses pequenos corpos granulados, o estágio capilar é alcançado e esses corpos agem como núcleos, favorecendo o crescimento do grânulo.

A distribuição de tamanho destes núcleos iniciais depende dos processos que acontecerão na zona de nucleação do granulador, tais como a mistura mecânica, que pode posteriormente alterar esta distribuição. Dois processos são importantes na zona de nucleação. Em primeiro lugar, existe uma formação de núcleos, que é uma função da termodinâmica e da cinética de umidificação. Em segundo lugar, há dispersão ligante, ou mistura eficaz de pó, que é uma função das variáveis de processo (IVESON *et al.*, 2001).

A combinação dos núcleos das pelotas ocorre pela agitação da massa granulada. Esta fase é caracterizada pela presença de muitos grânulos pequenos, mas com uma ampla distribuição granulométrica. Desde que essa distribuição granulométrica não seja

excessivamente ampla, este é o ponto adequado do processo de granulação (IVESON *et al.*, 2001). Este estágio de granulação é bastante aplicado em processos que requerem uma compactação em moldes definidos, como é o caso de comprimidos da indústria farmacêutica ou de revestimentos cerâmicos.

- **Crescimento do grânulo**

Na sequência da granulação ocorre o crescimento do grânulo, geralmente produzindo grânulos esféricos, sendo que o tamanho médio dos granulados pode aumentar com o tempo. Se for mantida a agitação da massa, a coalescência do grânulo continuará ocorrendo e pode produzir uma massa granulada inutilizável, embora isso também dependa da quantidade de líquido e de propriedades reológicas do sistema a ser granulado (PETROVICK *et al.*, 2006). A obtenção de grânulos grandes pode não ser muito adequada para propósitos farmacêuticos ou cerâmicos, mas é uma ocorrência interessante para outras aplicações industriais. Os possíveis mecanismos de crescimento de grânulos são:

- **Coalescência**

Dois ou mais grânulos se unem para formar um grânulo maior.

- **Quebra**

Grânulos se desfazem em fragmentos que se unem a outros grânulos, formando camadas sobrepostas nos granulados sobreviventes.

- **Transferência por abrasão**

A agitação da massa granulada gera fragmentos finos entre os grânulos. Esse fenômeno proporciona uma transferência de massa, aumentando o tamanho dos grânulos.

- **Formação de camadas**

Quando pós secos ou uma mistura de pós são adicionados à massa granulada original, que foi obtida anteriormente e se encontra dentro do equipamento, esses pós aderem aos grânulos, formando uma camada sobre a superfície dos mesmos, aumentando o tamanho médio da massa granulada (Figura 21).

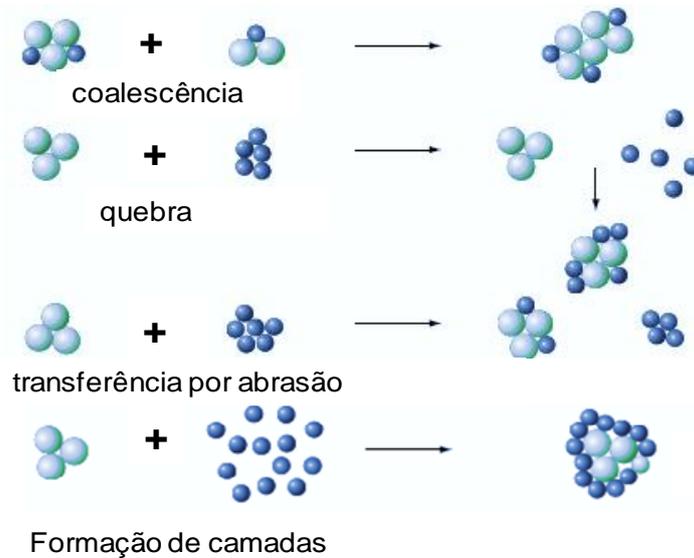


Figura 21 - Mecanismos de crescimento de grânulos durante a granulação (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973)

Alguns autores se propuseram a estudar o crescimento de pelotas de minério de ferro. Silva *et al.* (2018) descreve que a quantidade de finos em camadas varia com a quantidade de finos adicionada e o teor de umidade em um tambor de pelotamento. A taxa de crescimento é rápida no início e depois diminui continuamente, chegando a zero.

Sastry e Fuerstenau (1973) resumiram os regimes de aglomerados com testes em tambor de pelotamento em escala laboratorial, analisando a taxa de variação do diâmetro médio das pelotas produzidas a partir de minério de ferro concentrado (taconita) com 0,5 % de bentonita e 10,8 % de umidade (Figura 22).

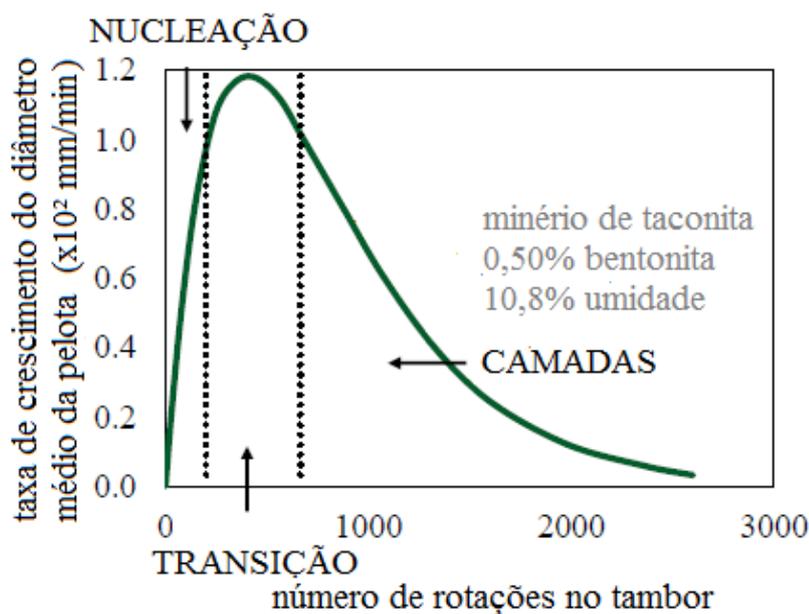


Figura 22 - Curva de taxa de crescimento diferencial para concentrado de taconito (adaptado de SASTRY e FUERSTENAU, 1973)

Segundo Sastry e Fuerstenau (1973) a tarefa mais difícil durante a granulação é analisar em separado cada um dos mecanismos, uma vez que eles acontecem simultaneamente, influenciando-se mutuamente e mudando também quando a compactação ocorre. Apesar de Sastry e Fuerstenau terem identificado a importância em separar os mecanismos de formação das pelotas, ainda hoje, tem-se dificuldade de modelar o processo de pelotamento de forma mecanicista, de modo que desconhece-se a existência de modelos matemáticos preditivos do processo de pelotamento em discos e tambores.

3.3 Pelotas verdes de minério de ferro

3.3.1 Formação

A resistência da pelota verde e a plasticidade são parâmetros importantes para a produtividade de uma usina de pelotização de minério de ferro. A resistência é descrita por dois parâmetros de teste: o número de quedas e a resistência à compressão. O número de quedas descreve a resistência da pelota durante um impacto rápido. O valor do número de queda deve ser grande o suficiente para garantir que as pelotas sobrevivam ao transporte nos circuitos de pelotamento para forno, indicando, portanto, que as pelotas são capazes de sobreviver a um número de impactos, ou quedas, sem a perda de sua integridade. O número de quedas é, no entanto, influenciado por alterações na plasticidade e elasticidade que aumentam com o teor de umidade e com a dosagem de bentonita (FORSMO *et al.*, 2008).

Os ligantes ou aglomerantes são adicionados para melhorar a qualidade da pelota e manter sua esfericidade (Figura 23). O aglomerante mais comum para este fim é a argila bentonítica (bentonita), a qual é adicionada a uma taxa de aproximadamente 0,5 a 1,0 % em peso de concentrado úmido (KAWATRA e RIPKE, 2002).



Figura 23 - Pelotas verdes formadas no disco do pelotamento

Dentre os parâmetros de ajuste no disco de pelotamento, a velocidade rotacional é o recurso mais utilizado para controle da granulometria pelotas verdes. O fluxo de pelotas verdes na saída dos discos (Figura 24) ocorre por transbordo e como resultado da ação das forças da gravidade e centrífuga. Na região de descarga das pelotas, situada na parte inferior do disco e no lado oposto à sua alimentação, observa-se a segregação natural por tamanho das pelotas, devido à movimentação da carga no interior do disco quando em movimento de rotação, exemplificada pelas setas tracejadas (Figura 25).



Figura 24 - Fluxo de pelotas verdes em correia transportadora que recebe a descarga do disco de pelotamento

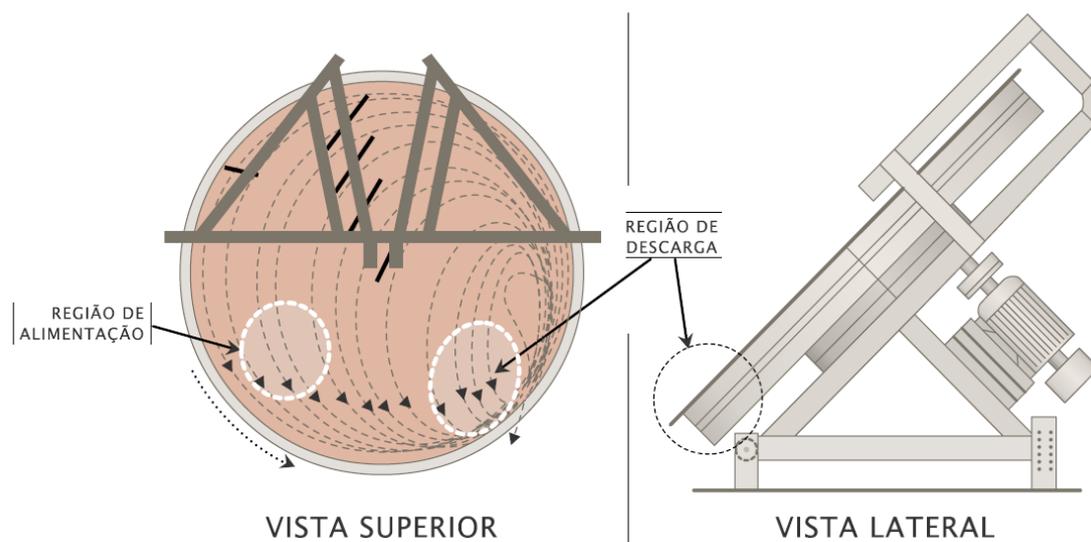


Figura 25 - Disco de pelotamento indicando a alimentação de minério e descarga das pelotas verdes

O processo de formação de pelotas verdes envolve uma fase sólida, sendo essa uma mistura de finos de minérios, aditivos e agentes aglomerantes e uma fase líquida, a água, que representa um importante papel nesse processo. As forças que se estabelecem nas interfaces sólido-líquido têm um efeito coesivo sobre o sistema partículas sólidas, líquido e ar. Estas forças interfaciais consistem na tensão superficial do líquido e nas forças capilares atuantes sobre as superfícies côncavas das pontes líquidas formadas entre as partículas de minério (SASTRY e FUERSTENAU, 1973). A água preenche os vazios intersticiais entre as partículas sólidas, formando um sistema capilar com múltiplas ramificações, como ilustrado esquematicamente na Figura 26. Nas situações em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota, a sucção capilar desenvolvida na interface ar-água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas unidas (MEYER, 1980).

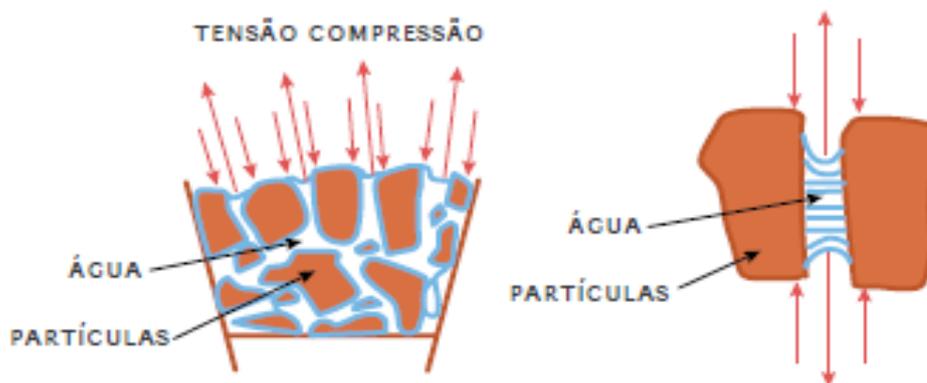


Figura 26 - Influência da água na formação da pelota verde (MEYER, 1980)

Os movimentos relativos entre as partículas irão favorecer a interação entre elas, através do aparecimento de diversos pontos de contato entre grãos e superfícies, nos quais o maior número possível de capilares deve ser formado. As partículas que constituem o *pellet feed* e que estão envolvidas por um filme de água tocam umas nas outras devido à tensão superficial do filme de água. Neste estágio pontes de líquido são formadas e, como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelotamento e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (MEYER, 1980). A Figura 27 mostra as fases de formação das pelotas verdes divididas em cinco estágios:

- 1) Partícula sólida coberta por um filme de água;
- 2) Início da formação das pontes líquidas;
- 3) Formação do aglomerado;
- 4) Aumento na densidade do aglomerado;
- 5) Formação da pelota verde.

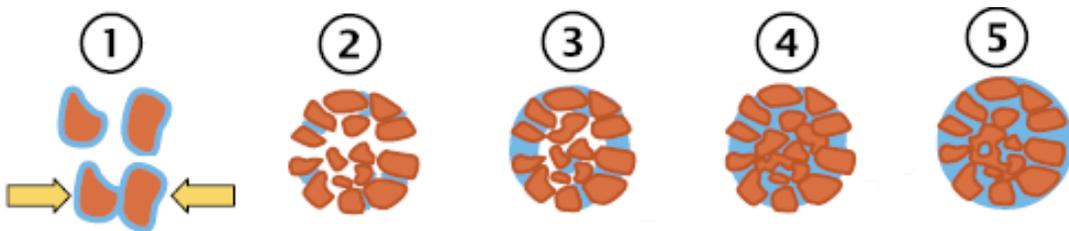


Figura 27 - Estágios de formação da pelota verde (MEYER, 1980)

Para uma boa formação das pelotas, é importante que se tenha um controle da adição de água, pois o teor de umidade tem influência direta na plasticidade das pelotas verdes. O teor de umidade depende em grande parte da distribuição granulométrica das partículas que alimentam o disco e da quantidade de aglomerantes utilizada. A aspersão de água deve ser o mínimo capaz de formar pelotas compactas e com baixa geração de finos, sem que a mistura fique supersaturada de água. As relações entre o ângulo de contato e as forças atuantes entre a água e o sólido podem ser expressas pela Equação 1, a qual relaciona as tensões superficiais entre sólido, líquido, ângulo de contato e a interface sólida (MEYER, 1980):

$$\gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_l \cos \theta \quad (1)$$

na qual γ_s é a tensão superficial do sólido, γ_{sl} é a interface sólido-líquido, γ_l é a tensão

superficial do líquido e θ é o ângulo de contato. O líquido entra em contato com o sólido, onde a tangente da superfície é chamada de ângulo de contato (Figura 28). Líquidos com ângulos de contato baixo espalham-se sobre a superfície do sólido, molhando-a; já os ângulos de contato alto levam o líquido a formar grânulos (CASEY, 2016).

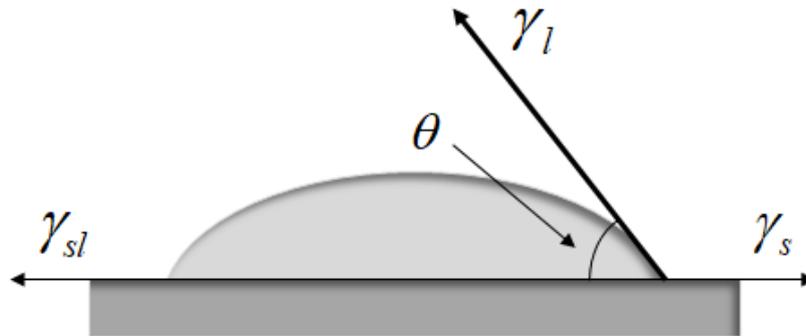


Figura 28 - Ângulo de contato entre o líquido e a superfície sólida (CASEY, 2016)

Kapur e Fuerstenau (1964) descreveram a cinética de crescimento das pelotas verdes e a influência do teor de umidade em volume na nucleação. Eles demonstraram que o tamanho e o crescimento dos núcleos são proporcionais ao teor de umidade da mistura de alimentação do tambor de pelotamento (Figura 29). Quanto menor o teor de umidade maior o número de revoluções necessárias para obtenção dos mesmos diâmetros de núcleos formados.

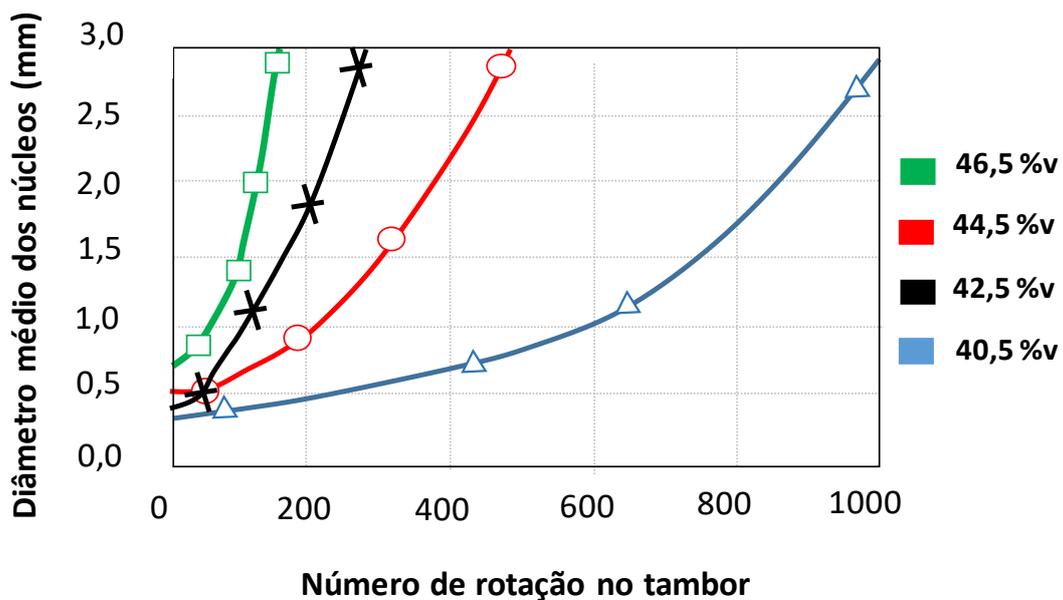


Figura 29 - Evolução do diâmetro médio dos núcleos em função da rotação do tambor para diferentes percentuais de umidade (% volume) (adaptado de KAPUR e FUERSTENAU, 1964)

Se o teor de umidade na mistura for inferior ao limite crítico, a distribuição granulométrica das pelotas formadas não será uniforme, além de gerar maior quantidade de finos no disco de pelotamento. Se o teor de umidade for maior que o limite crítico, aumentará a taxa de crescimento das pelotas e a deformação, devido à elevação da plasticidade (PANDEY *et al.*, 2012). Excesso de umidade resulta em um aumento do tamanho médio das pelotas verdes, pois substitui o ar no sistema ar-sólido-líquido e fornece mais pontos de contato entre as fases sólido-sólido e sólido-líquido. Por isso, a umidade deve ser otimizada para que o efeito de colisão das pelotas com as paredes do disco e com elas próprias seja menos relevante que as propriedades visco-elásticas das pelotas verdes (PANDEY *et al.*, 2012). A Figura 30 mostra uma correlação de aumento na granulometria das pelotas verdes à medida que se eleva o teor de umidade na mistura.

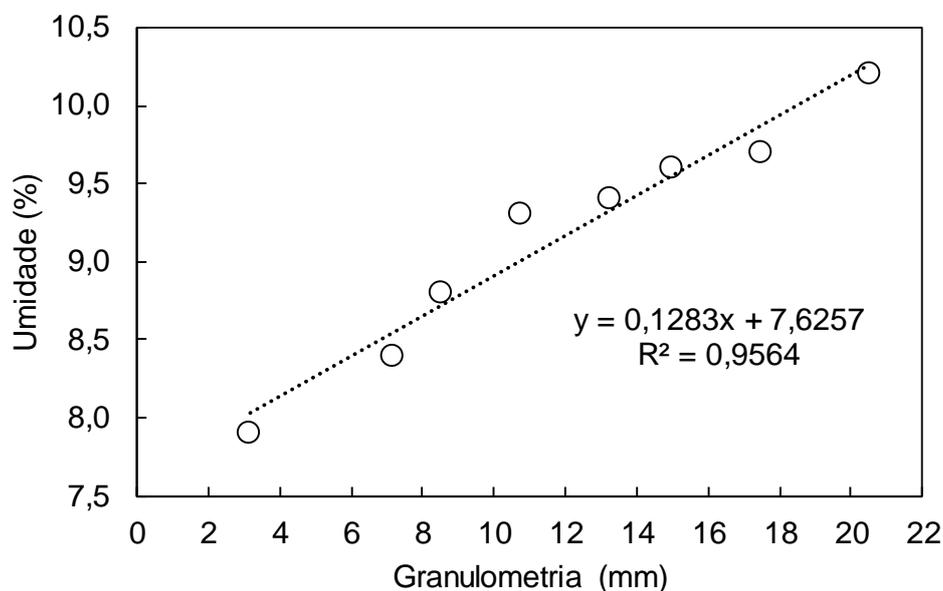


Figura 30 - Aumento na granulometria das pelotas verdes com a elevação do teor de umidade na mistura (adaptado de ATHAYDE *et al.*, 2018)

O uso de aglomerantes e aditivos na formação das pelotas verdes visa cumprir duas funções básicas: aumentar a resistência para evitar a degradação antes de entrar no forno de endurecimento e evitar o colapso das pelotas durante as etapas de secagem que ocorrem dentro do forno, quando ocorre a saída dos gases gerados pela vaporização de água. Moraes *et al.* (2015) avaliaram, por meio de ensaios de bancada, a influência dos agentes coloidisantes em comparação ao aglomerante bentonita. Foi verificado que quanto maior a disponibilidade de finos menores que 4 μm , principalmente os finos menores que 1 μm (colóides), melhor o empacotamento dos grãos e maior a resistência das pelotas verdes formadas.

3.3.2 Transporte e manuseio

O transporte das pelotas verdes consiste em um conjunto de equipamentos que executam essa tarefa: correias transportadoras de borracha, defletores de polietileno de alta densidade (PEAD) e rolos metálicos rotativos que constituem a peneira de rolos. Estes equipamentos têm a função de transportar as pelotas formadas nos discos de pelotamento até a entrada no forno de endurecimento. Exceção são as peneiras de rolos que, conforme mencionado anteriormente, realizam a classificação granulométrica das pelotas verdes. As pelotas com granulometria fora da faixa de tamanho especificada retornam ao disco para formação de novas pelotas. Nas usinas de pelotização, cada circuito de pelotamento tem sua particularidade. Basicamente os circuitos são divididos em dois grupos: os que não possuem peneira de rolos na saída dos discos (Figura 31) e os que possuem peneira de rolos na saída dos discos (Figura 32).

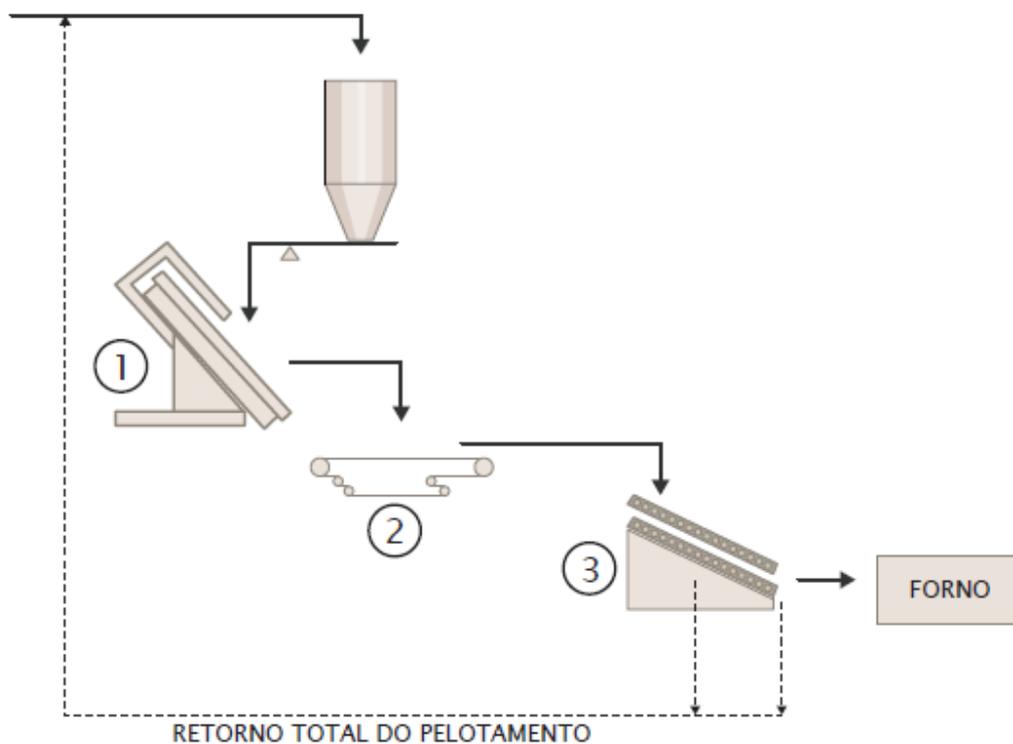


Figura 31 - Circuito de pelotamento tradicional sem peneira de rolos na saída do disco

No circuito ilustrado na Figura 31, sem peneira da saída do disco, tem-se em sequência:

1. Disco de pelotamento para formação das pelotas;
2. Como não há peneiras de rolos nas descargas dos discos, as pelotas verdes são direcionadas para as correias transportadoras subsequentes.

3. Peneira de rolos na entrada do forno, que pode ser de único *deck* para retirada somente de finos, ou de duplo *deck*, para separação dos aglomerados maiores na parte superior e remoção dos finos na parte inferior.

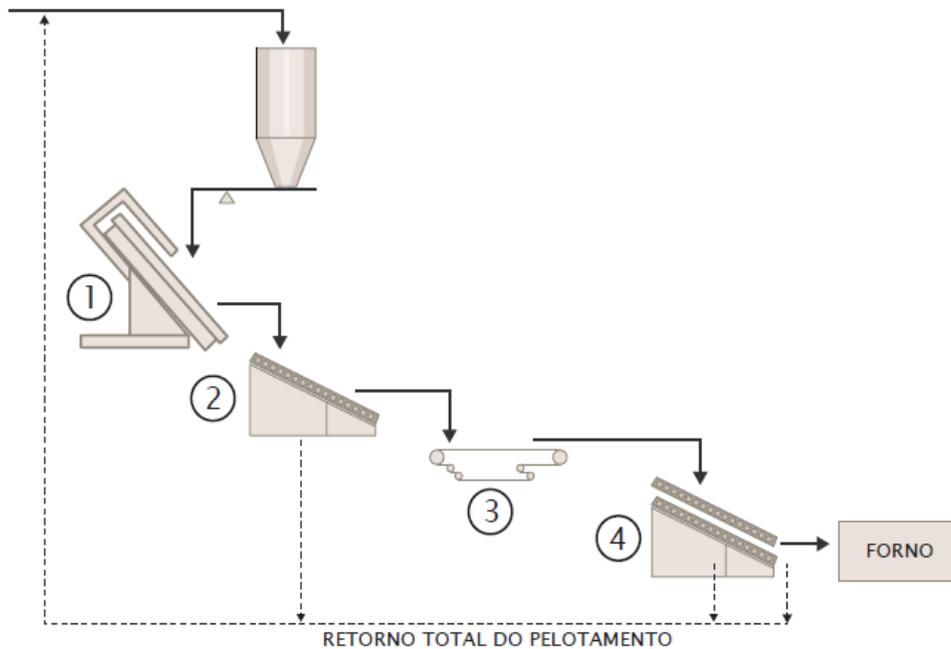


Figura 32 - Circuito de pelotamento com peneira de rolos na saída do disco

No circuito ilustrado com peneira na saída dos disco (Figura 32), tem-se em seqüência:

1. Discos de pelotização para formação das pelotas verdes;
2. Peneira de rolos na descarga de cada disco (único *deck*), onde os aglomerados são classificados para retorno daqueles com tamanhos inadequados, normalmente abaixo de 9 mm e acima de 16 mm;
3. Correias transportadoras subsequentes;
4. Peneira de rolos na entrada do forno, que pode ser de único *deck* para retirada somente de finos, a exemplo da usina de número 5 na Vale em Vitória/ES, ou duplo *deck* cujo objetivo é garantir a classificação mais eficiente dos aglomerados quanto ao seu tamanho.

O tempo decorrido entre as instalações das usinas de pelotização contribui para que ocorram diferenças construtivas, mesmo que sutis, de um circuito para o outro, principalmente na fase de pelotamento. Isso acaba impactando diretamente no desempenho das usinas de pelotização.

3.3.3 Peneiramento na saída do disco (único *deck*)

A peneira de rolos na saída de discos ou tambores consiste em um sistema inclinado de um *deck*, formado por diversos rolos de aço que giram transferindo as pelotas através de movimentos de rolamento contínuo, como mostra a Figura 33 (vista frontal) e a Figura 34 (vista superior). As peneiras de rolos são aplicadas mundialmente na classificação de pelotas verdes. No Brasil, esses equipamentos começaram a ser usados na década de 70 e substituíram rapidamente as peneiras vibratórias, que apresentavam menor eficiência de separação, e eram responsáveis pela quebra indesejada das pelotas verdes. A peneira de rolos consiste em uma estrutura levemente inclinada em relação à horizontal (normalmente de 10° a 19°) constituída por rolos paralelos meticulosamente abertos para separar finos, produtos (pelotas na faixa ideal) e aglomerados grosseiros (SILVA *et al.*, 2018).

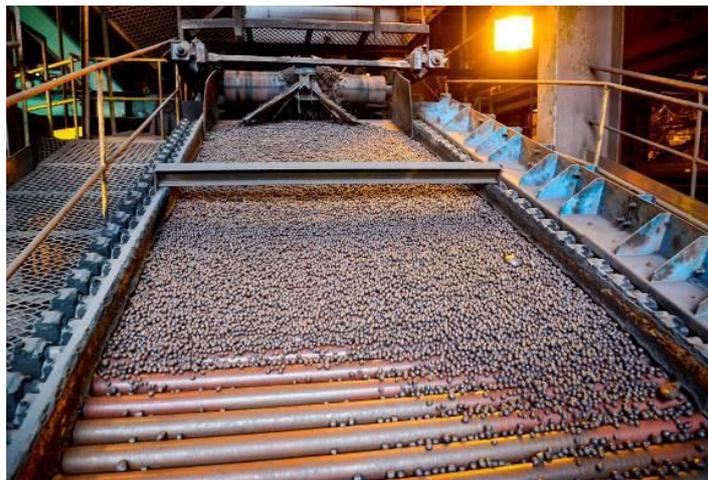


Figura 33 - Peneira de rolos na saída do disco (vista frontal)

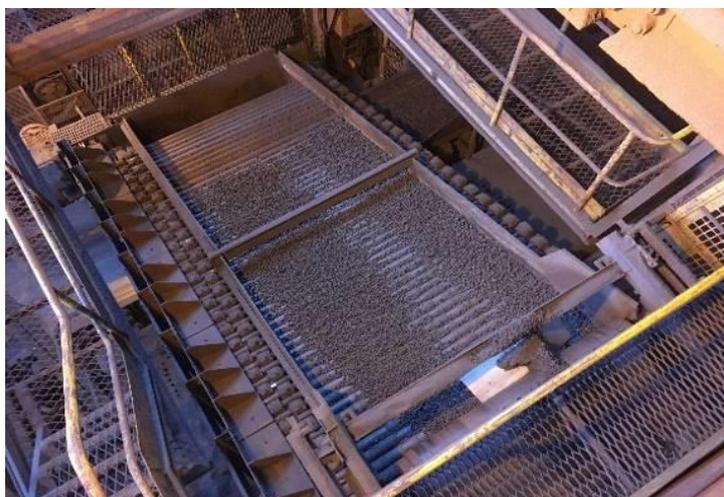


Figura 34 - Peneira de rolos na saída do disco (vista superior)

Durante o transporte as pelotas são classificadas por tamanho, retornando ao circuito de pelotamento os aglomerados que não estiverem nos tamanhos especificados. A inclinação da peneira, o diâmetro e rotação dos rolos, e o espaçamento entre eles estão relacionados ao diâmetro médio das pelotas requeridas como produto (MOURÃO, 2007; SILVA *et al.*, 2018).

As peneiras de rolos instaladas logo após a saída do tambor ou disco normalmente têm somente um único *deck* (Figura 36), ou seja, apenas um conjunto de rolos, podendo, mesmo assim, conter mais de uma abertura de classificação.

Silva *et al.* (2020) fizeram experimentos de simulação computacional da operação de peneiramento em peneira de rolos na saída de um disco de pelotamento com o método dos elementos discretos, com foco em aumentar a eficiência de separação das pelotas na faixa de produto (*onsize*), variando-se parâmetros operacionais como granulometria da alimentação da peneira, taxa de alimentação, inclinação do *deck*, diâmetro e velocidade de rotação dos rolos e o espaçamento entre os rolos (*gaps*).

Os resultados obtidos por Silva *et al.* (2020) permitiram o desenvolvimento de modelos de superfícies de resposta para eficiência global do peneiramento. Em seu estudo, considerou-se os principais parâmetros de controle da peneira de rolos sobre a eficiência de peneiramento global, e na contaminação com finos na produção (*onsize*) (Figura 35).

Um ajuste ótimo das variáveis de processo foi encontrado para a faixa de condições analisadas, que consistiu na redução do diâmetro dos rolos de 75,0 mm, do caso base, para o menor diâmetro simulado, igual a 57,8 mm, aumento na frequência de rotação dos rolos de 80 rpm para a velocidade mais alta simulada, igual a 140 rpm, redução da inclinação de 15° para o valor mais baixo simulado, 9° e o abertura de finos de 8,8 a 8,4 mm.

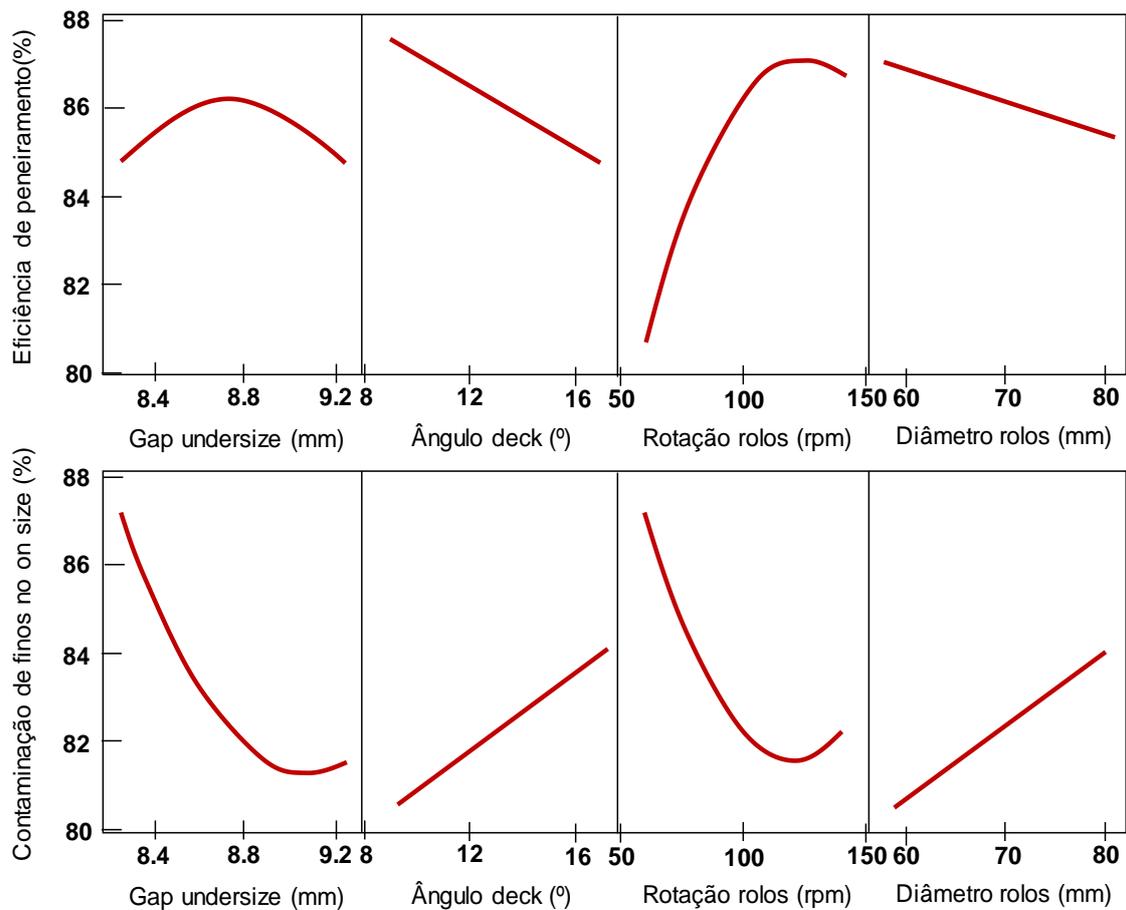


Figura 35 – Eficiência global do peneiramento de pelotas verdes em peneira de rolos (modificado de SILVA *et al.*, 2020)

A simulação da configuração ideal obtida por Silva *et al.* (2020), prevê para a operação estudada, um aumento na eficiência da remoção de finos de 5,7%, ou seja, de 91,4% (caso base) para 97,1% (caso otimizado). Embora às custas de um aumento modesto na perda de pelotas de *onsize* para o tamanho *oversize*, a configuração ótima prevista por Silva *et al.* (2020) também demonstrou ser significativamente mais robusta para variações na taxa de alimentação de pelotas verdes na peneira do que o caso base.

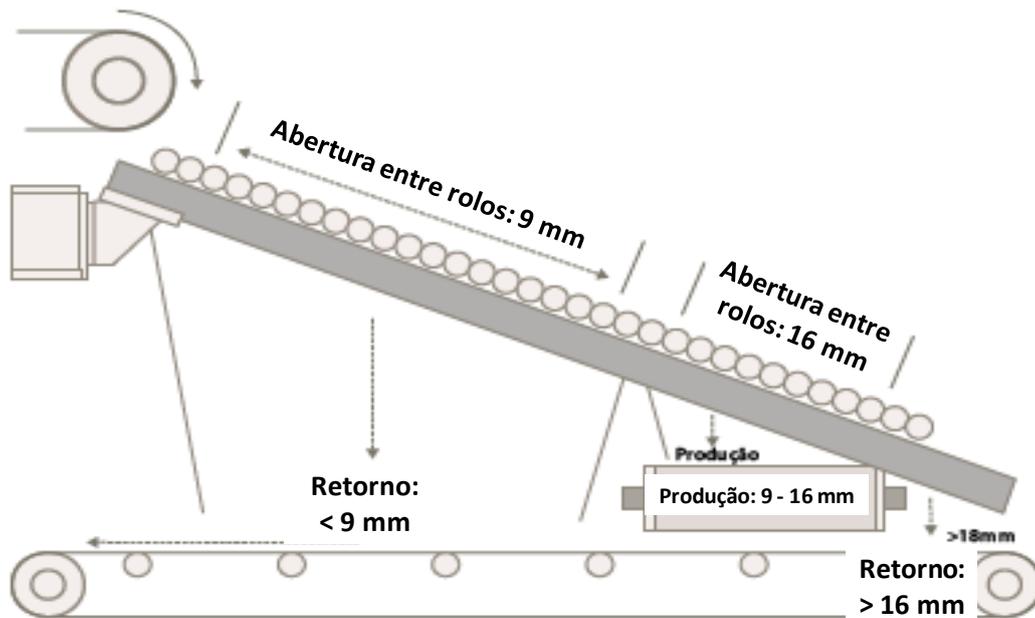


Figura 36 - Peneira de rolos com um único *deck*

3.3.4 Transporte das pelotas até a peneira de rolos na entrada do forno

Após o primeiro peneiramento na saída dos discos, um sistema de correias transportadoras (Figura 37) recebe as pelotas verdes produzidas nos discos de pelotamento e as transporta para os próximos pontos de transferência.

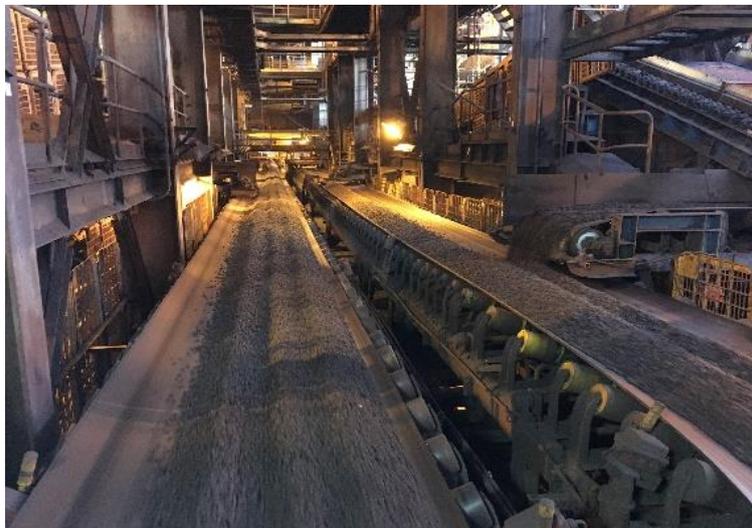


Figura 37 - Transporte de pelotas verdes por meio de correias transportadoras de borracha

A transferência dessas pelotas pode ser em queda livre (Figura 38) ou por meio de defletores de polietileno de alta densidade (PEAD) com regulagem específica (Figura 39). As quedas ocorrem sucessivamente no sistema de transporte até que as pelotas verdes cheguem ao seu destino, que é o forno de endurecimento.



Figura 38 - Transferência de pelotas verdes entre correias em queda livre



Figura 39 - Transferência de pelotas verdes com o auxílio de defletores de PEAD

A uniformidade da camada de pelotas verdes dentro do forno influencia diretamente na produtividade e consumo de combustível utilizado para o tratamento térmico das pelotas. Portanto é desejável que se tenha um controle na distribuição da camada de pelotas que são alimentadas no forno. Esse controle é feito principalmente por uma correia que oscila sobre um chute móvel, que possui velocidade e tempo de frenagem bem ajustados (MEYER, 1980).

O chute móvel, apresentado na Figura 40 (vista frontal) e na Figura 41 (vista superior), tem a função de distribuir uniformemente as pelotas verdes, tanto no sentido transversal quanto longitudinal, para entrada no carro de grelha. Os recursos disponíveis para tal são o posicionamento correto dos defletores nas descargas das correias e o

sincronismo da velocidade do chute móvel, buscando sempre uma camada uniforme. Esta condição melhora o desempenho do peneiramento na entrada do forno e, conseqüentemente, a permeabilidade do leito.

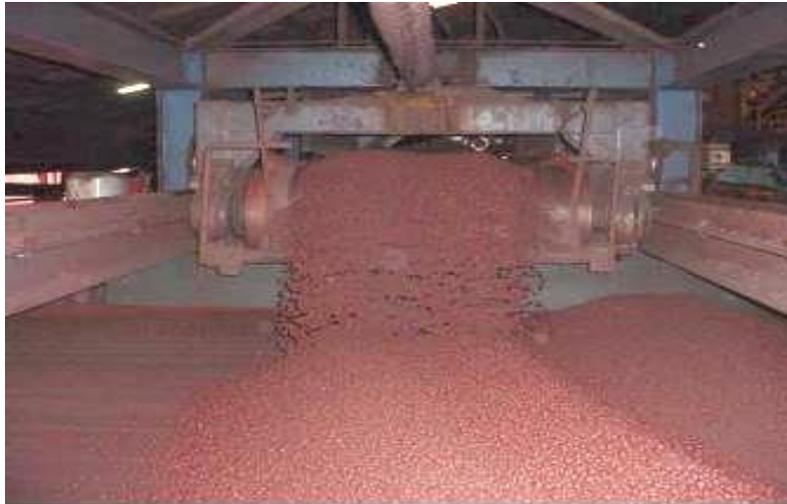


Figura 40 - Vista frontal do chute móvel



Figura 41 - Vista superior do chute móvel

3.3.5 Peneiramento na entrada do forno (duplo *deck*)

A peneira de rolos na entrada do forno normalmente possui rolos mais longos e é configurada em dois *decks* (Figura 42). O objetivo é garantir uma melhor classificação dos aglomerados quanto ao seu tamanho, e retirar os finos gerados durante o transporte das pelotas verdes nas etapas antecedentes.

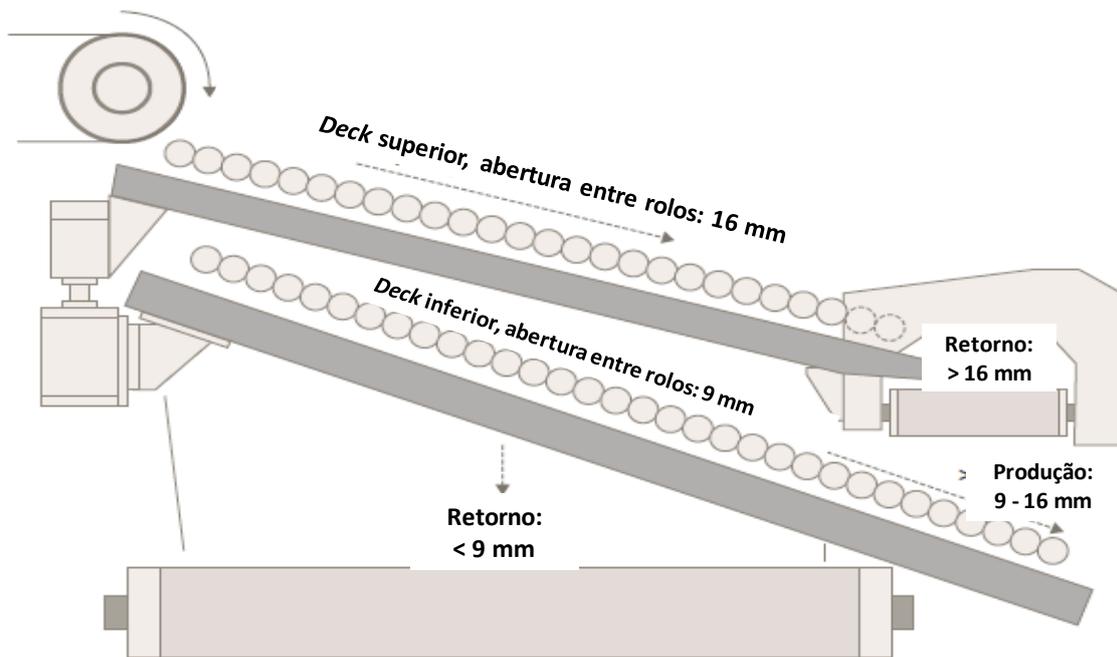


Figura 42 - Representação de uma peneira de rolos com duplo *deck*

O *deck* superior (Figura 43), além de separar os “cachos” de pelotas verdes também faz a retirada das partículas grosseiras. O *deck* inferior (Figura 44), promove a retirada das pelotas com tamanhos abaixo da especificação, bem como retira os finos de minério que prejudicam a permeabilidade do leito no interior do forno de endurecimento.



Figura 43 - Peneira de rolos duplo *deck*, mostrando a alimentação de pelotas verdes



Figura 44 - Vista inferior da peneira de rolos duplo *deck*, mostrando a retirada de finos de pelotas verdes

É importante destacar que as pelotas verdes são frágeis, suportando em média uma carga de 0,8 kg por pelota. Segundo diagnóstico feito pela Vale S.A. (2008a), a distância percorrida durante o transporte, a altura e quantidade de quedas sofridas, e as transferências com fluxo transversal, podem gerar danos nas pelotas verdes. Esses danos refletem diretamente na qualidade das pelotas queimadas, gerando trincas e redução na resistência à compressão. Além de comprometer a permeabilidade à passagem dos gases, eleva o consumo energético das usinas (MOURÃO, 2007).

3.3.6 Configurações de circuitos de pelotamento

Um relatório interno (VALE S.A., 2008a) realizou o mapeamento de sete usinas de pelotização da Vale com as particularidades de cada circuito de pelotamento. O foco daquele estudo foi o transporte das pelotas verdes até o forno. Os parâmetros observados foram: altura total de quedas (somatório das alturas de queda), número de quedas (quantidade de quedas considerando a saída do disco até o forno), número de transferências com fluxo transversal (correias transversais) e distância do disco até o forno. Foi considerada transferência com fluxo transversal, quando o ângulo de transferência de pelotas de um equipamento para o outro é igual a 90°, pois mudanças bruscas de direção podem fragilizar as pelotas durante o transporte. Além disso, quanto maior a altura total de quedas, o número de quedas, as transferências com fluxo transversal e a distância total, mais sujeitas à degradação estão as pelotas verdes.

A Tabela 2 mostra as principais diferenças entre os circuitos de pelotamento das usinas A, B, C, D, E, F e G, considerando todas as transferências das pelotas verdes, desde

a saída do disco até imediatamente antes da entrada no forno de endurecimento. Destaca-se positivamente o circuito da usina C (Figura 45), o qual tem a menor altura total de quedas e o menor número de transferências com fluxo transversal.

Tabela 2 - Principais diferenças entre os circuitos de pelotamento das usinas

	Usina						
	A	B	C	D	E	F	G
Número de quedas	5	9	6	6	7	8	8
Altura total de quedas (cm)	330	510	320	350	380	420	420
Transferências com fluxo transversal	0	3	0	1	9	9	9
Distância do forno (m)	40	83	48	58	98	98	116

Nos quesitos número de quedas e percurso, esse circuito também se destaca entre os que menos submetem pelotas a impactos (VALE S.A., 2008a).

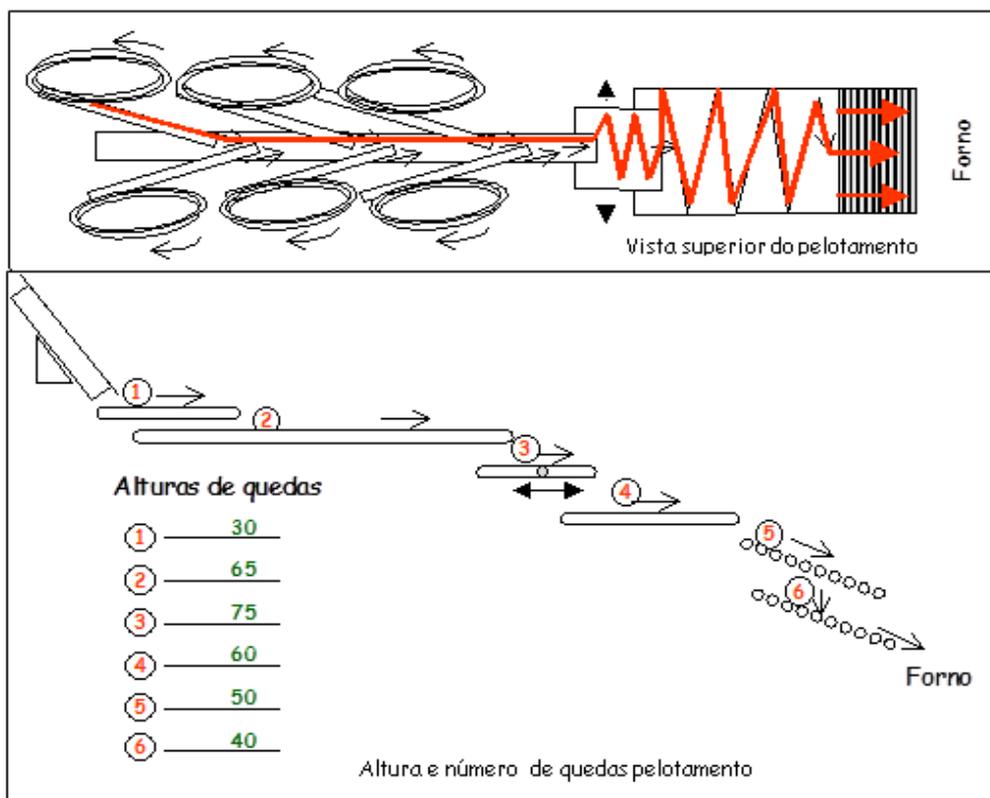


Figura 45 - Representação esquemática do circuito de pelotamento da Usina C mostrando as alturas de quedas, em centímetros, numeradas de 1 até 6

A usina G possui um circuito favorável à intensificação da degradação de pelotas verdes. Esse circuito, que tem a maior distância do disco até o forno, também está entre

os piores nos quesitos número de transferências com fluxo transversal, altura total de quedas e número de quedas (Tabela 2). A representação esquemática do circuito G é apresentada na Figura 46. Assemelham-se a esse circuito aqueles das usinas E e F (VALE S.A., 2008a).

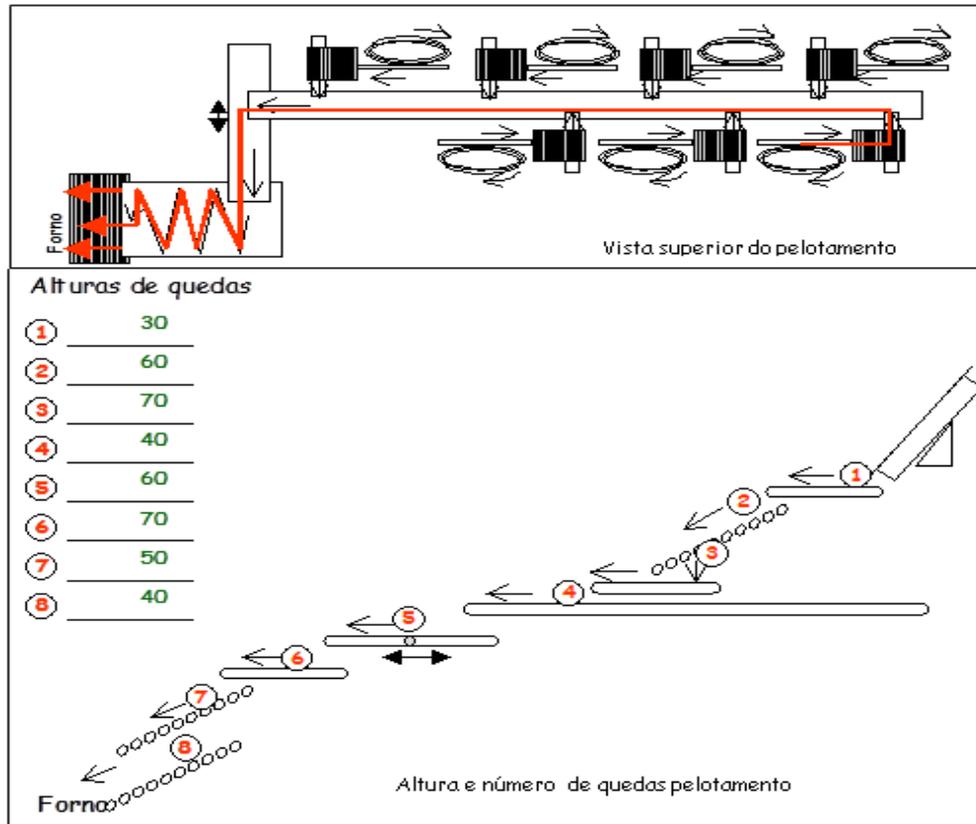


Figura 46 - Representação esquemática do circuito de pelotamento da Usina G mostrando as alturas de quedas, em centímetros, numeradas de 1 até 8

3.3.7 Queda de pelotas verdes

O principal efeito nocivo do aumento de quedas das pelotas verdes é a geração de trincas que fragilizam as pelotas durante o transporte, gerando finos e/ou reduzindo a resistência física após a queima. Para verificar o efeito da geração de trincas com a variação das alturas de quedas foram realizados ensaios com pelotas verdes das usinas de pelotização H e I (VALE S.A., 2008b). A variação da altura de queda durante os ensaios foi de 200 mm a 1200 mm, com intervalos a cada 100 mm. Para os testes foram selecionadas 15 pelotas peneiradas da faixa granulométrica de 12 mm a 16 mm (Usinas H e I). Também foram realizados testes com pelotas menores na fração granulométrica de 9,5 mm a 12 mm, somente na Usina H, a fim de verificar se havia diferença na geração

de trincas entre pelotas de diferentes tamanhos.

As pelotas das Usinas H e I continham, aproximadamente, o mesmo teor de umidade (10,8 %), embora as dosagens de bentonita fossem bem distintas: 6,2 kg/t para a Usina H e 4 kg/t para a Usina I.

A Figura 47 mostra que a queda das pelotas de uma altura de 600 mm foi considerada crítica, já que neste patamar a maioria das pelotas de 12 mm a 16 mm quebram na segunda queda (VALE S.A., 2008b).

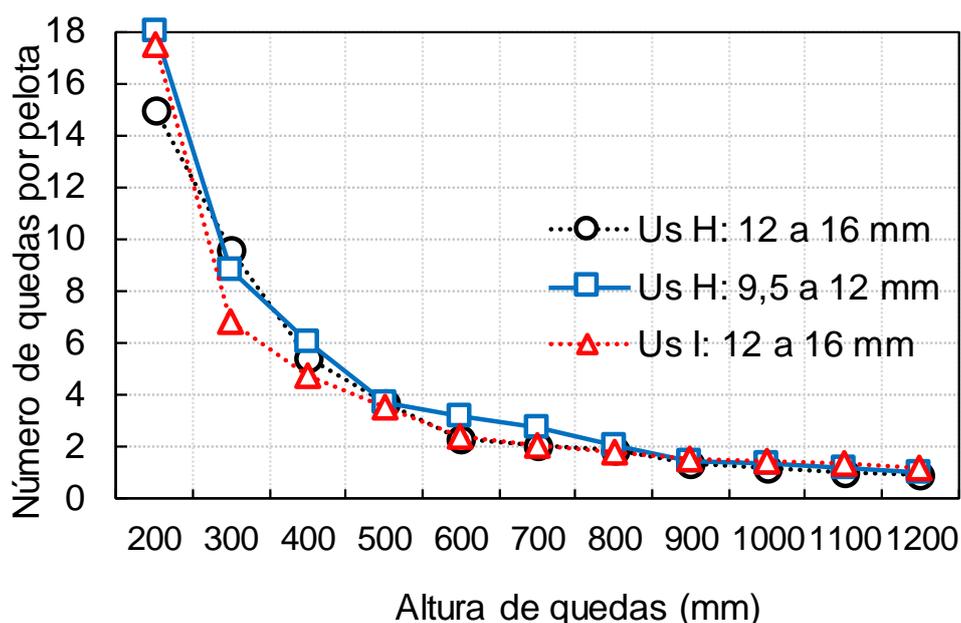


Figura 47 - Influência da altura de quedas na geração de trincas nas pelotas verdes (VALE S.A., 2008b)

As pelotas da Usina H apresentaram trincas em 44% da população quando submetidas a uma única queda de 700 mm de altura. Da Usina I, 51 % das pelotas apresentaram trincas com uma única queda a partir de 700 mm de altura. Quanto à geração de trincas, não foram percebidas alterações na faixa granulométrica mais fina (9,5 mm), quando se variava a altura de queda. Com altura de 500 mm observou-se somente o aparecimento de trincas após a quarta queda, ou seja, quanto menor era a altura de queda maior era o número de quedas que as pelotas puderam suportar (VALE S.A., 2008b).

Athayde *et al.* (2018) verificaram que o transporte através do circuito de pelotamento requer das pelotas verdes uma força mínima, medida através de testes em bancada, onde verifica-se a quantidade de quedas que cada pelota suporta até a sua degradação. Assim, quanto menor o número de quedas que cada pelota suporta, maior a tendência das pelotas quebrarem durante o transporte até o forno. O mais provável é que

quanto maior o diâmetro das pelotas, maior a geração de finos. Isso levará a uma baixa permeabilidade do leito da pelota ao fluxo de ar, se não forem adequadamente eliminados pela peneira de rolos. Estes resultados são mostrados na Figura 48: as pelotas que sofrem danos pelos impactos sofridos, mas não se separam completamente no transporte, podem apresentar trincas após completar o ciclo térmico. Essas pelotas são queimadas com a presença dessas trincas na estrutura, o que aumenta a probabilidade de geração de finos e/ou pelotas queimadas fora dos padrões de qualidade.

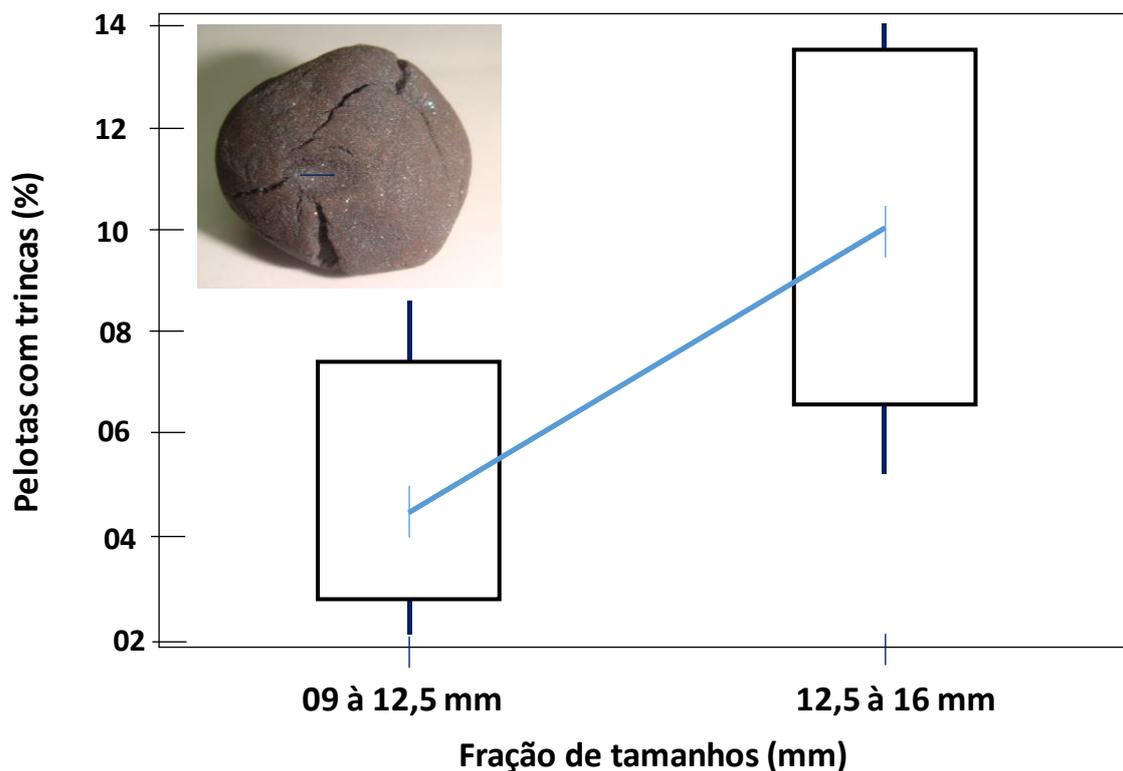


Figura 48 - Influência do tamanho das pelotas verdes na geração de trincas (ATHAYDE *et al.*, 2018)

3.4 DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS VERDES

Tavares e Almeida (2020) estudaram a degradação mecânica de pelotas verdes de minério de ferro. Neste trabalho foram investigados de forma experimental os efeitos do tamanho da pelota, altura de queda, ângulo de impacto e tipo de superfície em resposta a múltiplos impactos, analisando não apenas a condição crítica para o aparecimento de uma fissura na superfície, mas também para sua desintegração. Os autores observaram que o efeito do tamanho da pelota é limitado, enquanto os efeitos da altura da queda, velocidade, ângulo e tipo de superfície influenciam significativamente a degradação, conforme detalhado nas seções 3.4.1 a 3.4.4.

3.4.1 Efeito da altura de queda

A Figura 49 apresenta os resultados obtidos por Tavares e Almeida (2020) com uma única faixa de tamanhos de pelotas (10–12,5 mm) impactadas repetidamente em superfície de aço com alturas de queda de 200 cm a 15 cm.

Observa-se que, à medida que a altura de queda aumenta e maior é a energia de impacto, mais intensa se torna a degradação das pelotas. Por outro lado, ao passo que as alturas diminuem, mais as pelotas resistem aos impactos repetidos, o que fica ainda mais evidente no caso dos ensaios nas alturas de queda de 25 e 15 cm. É interessante notar que, apenas com a exceção da altura de queda de 200 cm, nenhuma pelota se quebrou ao sofrer o primeiro impacto.

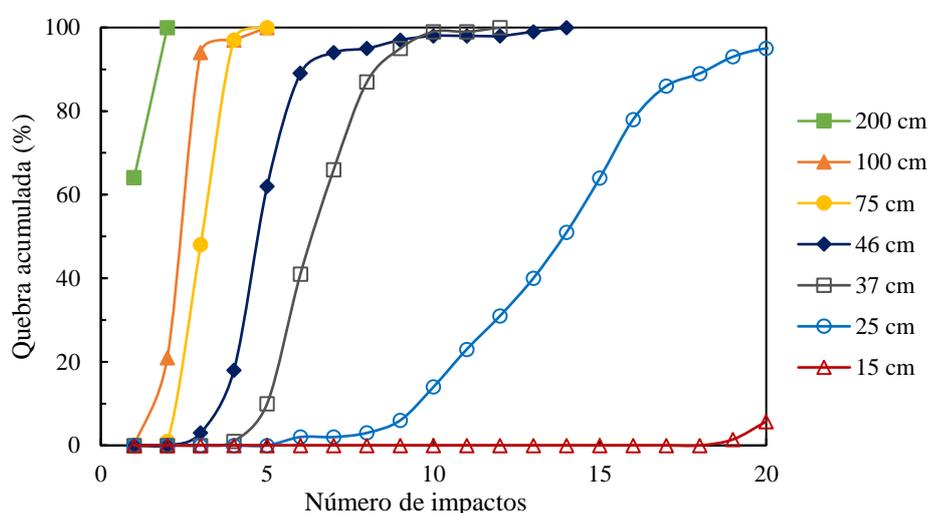


Figura 49 – Quedas de pelotas verdes na faixa de 10-12,5 mm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

A Figura 50 apresenta os resultados de ensaios de queda realizados nos quais as alturas de queda foram alternadas. A primeira combinação é a alternância entre as alturas de 46 e 25 cm, na qual as pelotas foram submetidas inicialmente a quatro choques a 46 cm e o restante à altura de 25 cm até seu instante de quebra. Já na segunda combinação as pelotas foram soltas primeiramente da altura de 100 cm e, em seguida, da altura de 25 cm até a quebra. Nota-se que o comportamento dessas combinações converge com o resultado da altura de 46 cm, por ter praticamente a mesma energia de impacto (TAVARES e ALMEIDA, 2020).

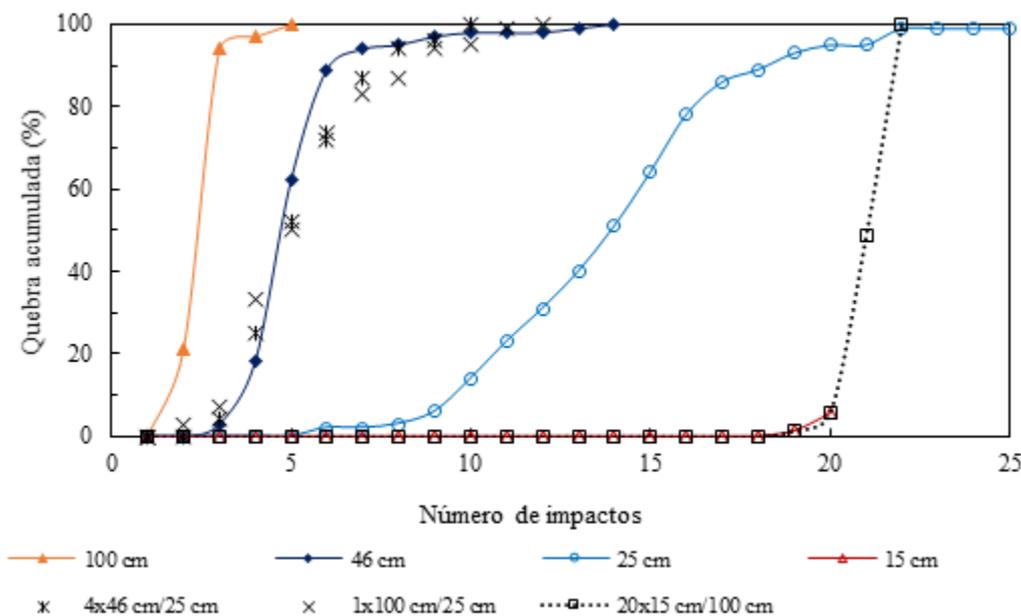
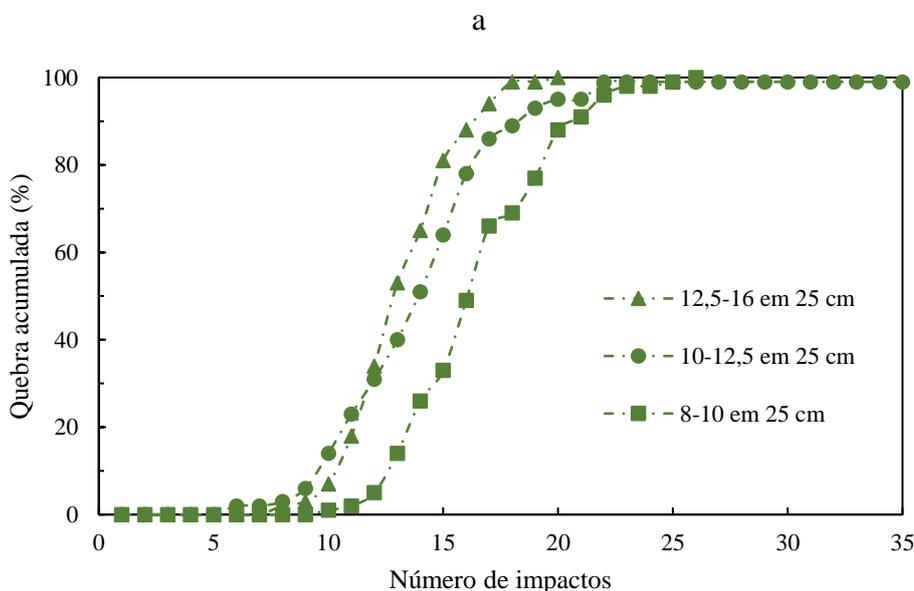
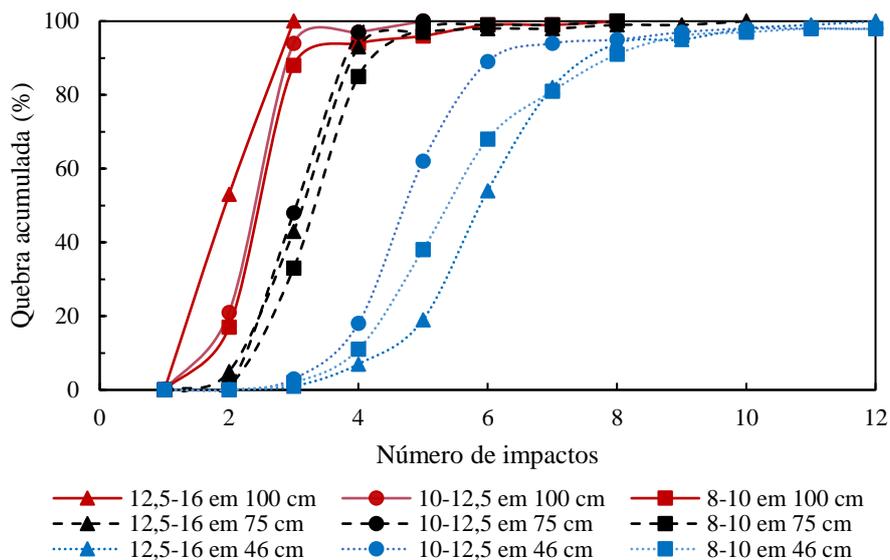


Figura 50 - Alternância das alturas de queda para pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm para a fratura de pelotas (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

Por outro lado, as alturas menores às quais as pelotas foram submetidas nas combinações são responsáveis pela redução da proporção quebrada. Na terceira combinação, as pelotas foram soltas 20 vezes da altura de 15 cm e, posteriormente, a alturas de 100 cm até atingir a quebra (Figura 50). Esta alternância reforçou a ideia de que em alturas menores maior o número de eventos de impactos necessários para causar dano à pelota e, então, quando submetida à uma energia de impacto maior ela se degrada rapidamente (TAVARES e ALMEIDA, 2020). Este fenômeno também foi observado na Figura 47: para quedas de 200 mm as pelotas sofreram aproximadamente 14 impactos para que a primeira trinca aparecesse na superfície.

3.4.2 Efeito do tamanho das pelotas

A Figura 51 mostra a porcentagem de quebra acumulada em relação ao número de impactos para pelotas contidas nas três faixas de tamanho (8–10; 10–12,5 e 12,5–16 mm) das pelotas verdes no aço como superfície de queda. Observa-se que não há uma clara influência do tamanho das pelotas quando se trata de alturas de queda maiores (Figura 51a). Entretanto, tomando como base 15° o impacto na altura de 25 cm (Figura 51b) as proporções de pelotas quebradas foram 33 % para pelotas de 8–10 mm; 64% de 10–12,5 mm e 81% para pelotas de 12,5–16 mm. Assim, há uma tendência do aumento da resistência à quebra com a diminuição do seu tamanho, porém isso se mostra mais evidente apenas para a altura de queda de 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020).



b

Figura 51 - Efeito do tamanho das pelotas verdes na proporção de pelotas quebradas a diferentes alturas de queda no aço: a) alturas de 46, 75 e 100 cm; b) altura de 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

3.4.3 Efeito da superfície de impacto

Neste caso Tavares e Almeida (2019) submeteram pelotas a impactos em dois tipos de superfícies: aço e borracha utilizada em correias transportadoras utilizadas para o transporte de pelota em usinas de pelletização. Pelotas contidas na faixa de tamanho de 10–12,5 mm foram impactadas nas duas superfícies e os resultados são apresentados na

Figura 52. À medida que a altura aumentou, maior foi a degradação das pelotas, independentemente do tipo de superfície (Figura 52b). Na menor altura de queda estudada (Figura 52a), 25 cm, percebe-se a diferença da resistência das pelotas em função da superfície de impacto. Essa afirmação pode ser reforçada pela Figura 53 a qual apresenta os números de queda obtidos para cada tipo de material nas alturas testadas.

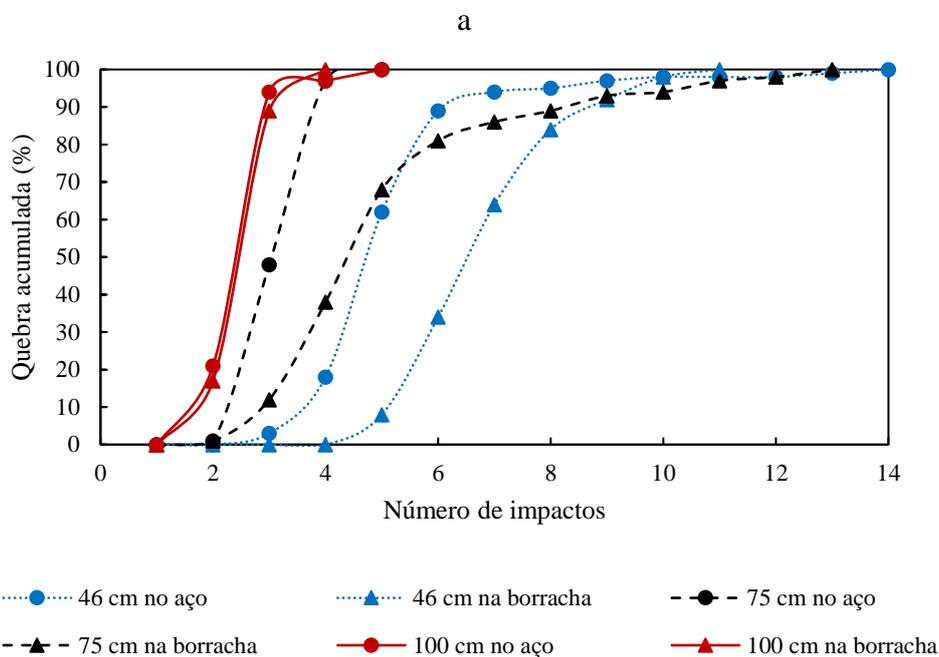
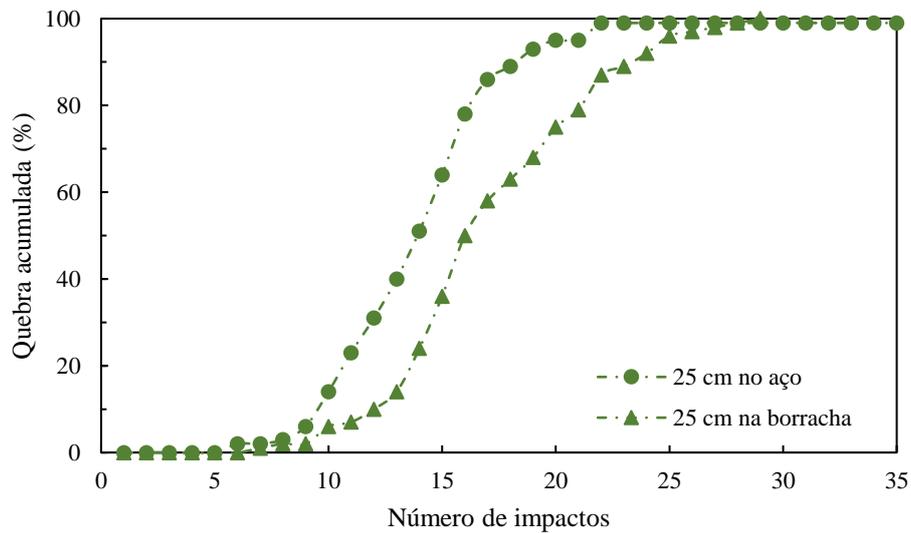


Figura 52 - Efeito da superfície de impacto para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm nas diferentes alturas de queda: a) 25 cm; b) 46, 75 e 100 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

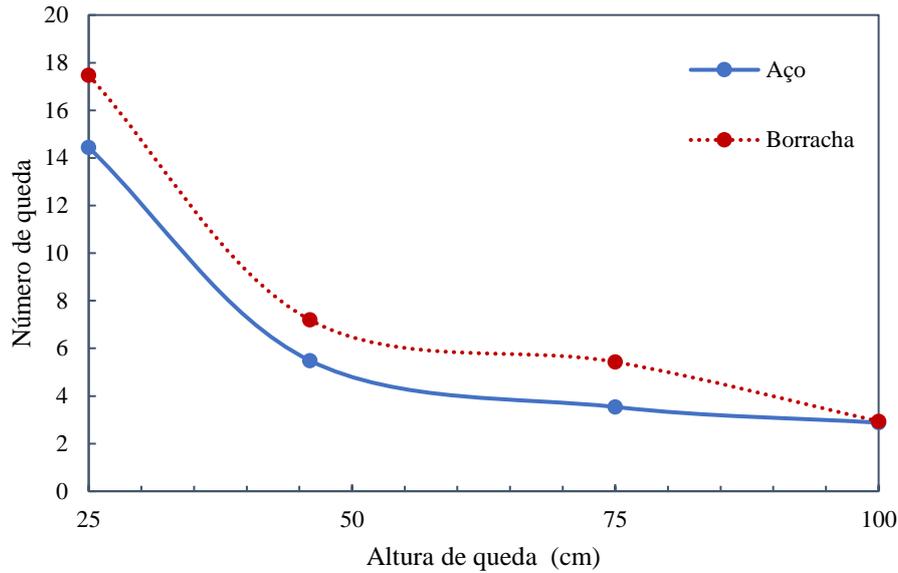


Figura 53 - Número de queda para cada tipo de superfície para fratura de pelotas contidas na faixa de 10–12,5 mm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

Observa-se que número de queda foi mais alto quando pelotas foram impactadas contra borracha.

3.4.4 Efeito do ângulo de impacto

A fim de estudar o efeito da componente tangencial no impacto das pelotas contidas na faixa de 10 a 12,5 mm, Almeida (2019) estudou o efeito de queda das pelotas em superfície de aço com angulação variada (Figura 54). Nota-se que para a altura de 25 cm a degradação aumenta uma vez que somente a componente normal está atuando (90°). À medida que a componente tangencial no impacto aumenta, as pelotas suportam um maior número de impacto antes da quebra. O efeito da inclinação desaparece conforme o aumento da altura de queda e, conseqüentemente, o número de queda diminui.

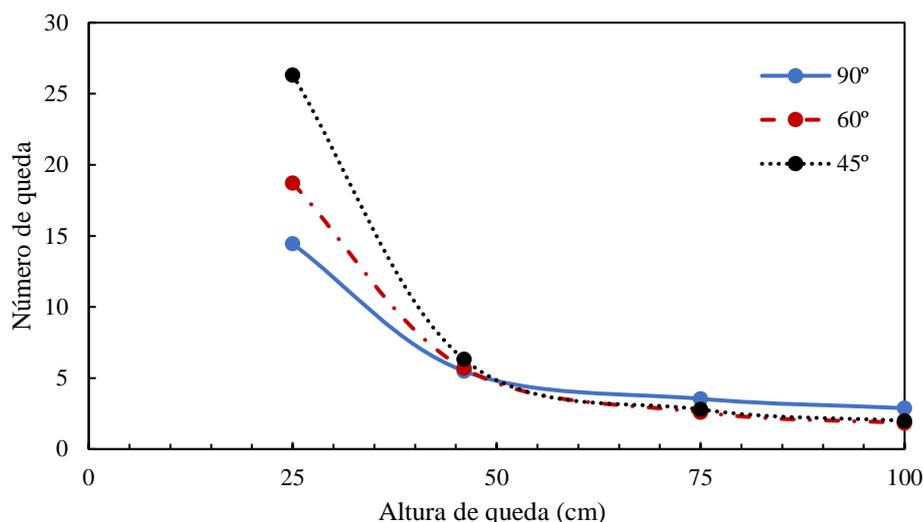
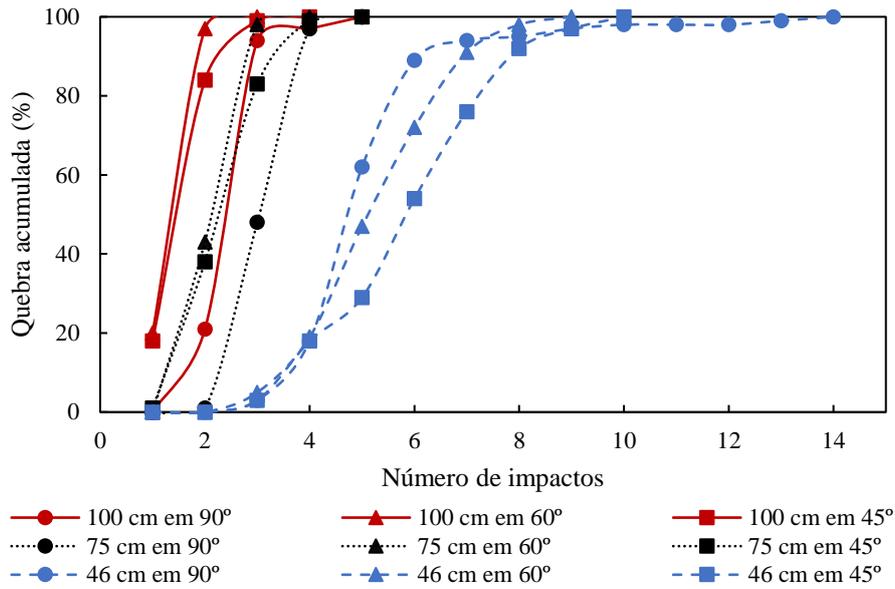


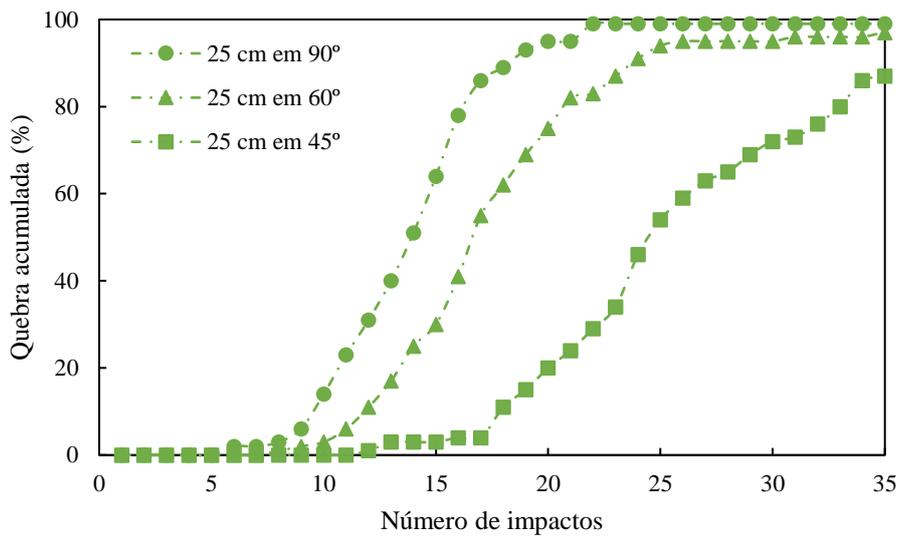
Figura 54 - Resultados do número de queda para os ângulos de 45°, 60° e 90° para pelotas verdes na faixa de 10-12,5 mm (ALMEIDA, 2019)

Analisando as proporções de pelotas degradadas em relação ao tipo de superfície (Figura 55), observa-se pela Figura 55a que para as maiores alturas, o efeito do ângulo não é muito claro. Já para a menor altura (25 cm) (Figura 55b), nota-se a influência do ângulo. Por exemplo, no 20º impacto, 20% das pelotas quebraram na angulação de 45°, 75% no ângulo de 60° e 95% no de 90°.

Segundo Tavares e Almeida (2020) ao alterar a superfície de queda, analisa-se a altura cumulativa de queda em relação à quebra acumulativa (Figura 56) em condições extremas analisadas: nas alturas de 100 cm (Figura 56a) e 25 cm (Figura 56b). Observa-se que para maior altura, a mesma altura cumulativa para ambas as superfícies é necessária para início da fragmentação das pelotas, de maneira que o efeito da superfície de impacto se mostrou secundário. Já para a menor altura, a mesma altura total também é necessária para início da fragmentação das pelotas, porém a borracha tende a diminuir a degradação devido ao fato que parte da energia de impacto também ser absorvida pela superfície.

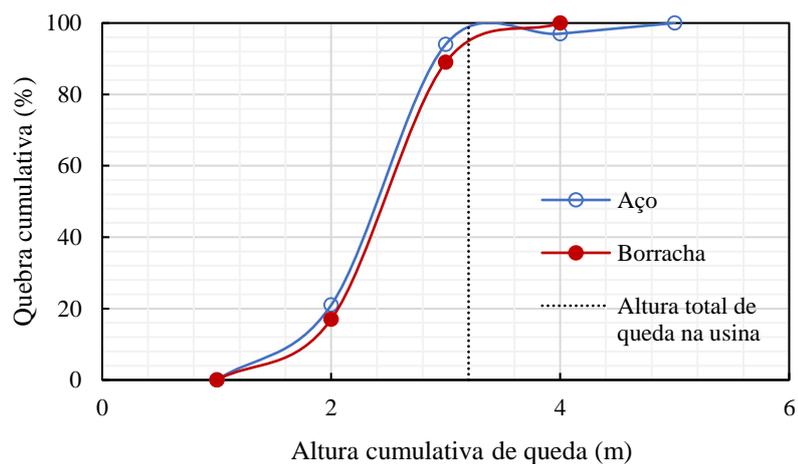


a

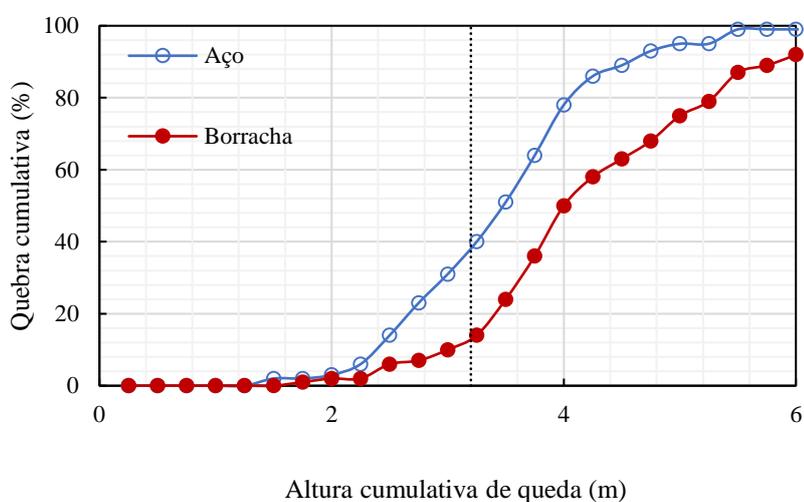


b

Figura 55 - Efeito do ângulo de impacto na proporção de bolas fraturadas em função das alturas de queda na borracha: a) 46, 75 e 100 cm; b) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)



a

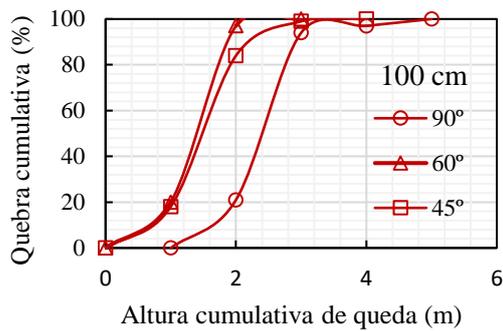


b

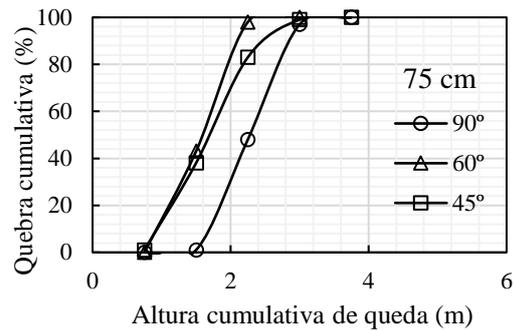
Figura 56 - Quebra cumulativa das pelotas verdes de 10–12,5 mm em relação à altura cumulativa de queda para cada tipo de superfície, alturas extremas a) 100 cm b) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

A Figura 57 apresenta o efeito do ângulo de impacto na fragmentação das pelotas verdes. Observa-se que a maiores alturas de queda (100 e 75 cm) fragmentação marginalmente mais intensa ocorreu com o ângulo de 60° em comparação aos demais. No caso das menores alturas (46 e 25 cm), por outro lado, a redução do ângulo de impacto resultou na diminuição da intensidade da fragmentação, conforme já observado em estudos anteriores para pelotas queimadas (TAVARES *et al.*, 2018). Esse comportamento pode ser analisado à luz das componentes da velocidade de queda e, conseqüentemente, da energia de impacto. No caso do impacto normal, a totalidade da energia de impacto corresponde a energia dissipada na componente normal da colisão (Figura 58). Por outro lado, a contribuição da componente normal reduz para 75% e 50%, para os ângulos de 60 e 45°, respectivamente, sendo o complemento representado pela componente tangencial da energia dissipada na colisão. Assim, pode-se inferir que a proporção de 25% da energia

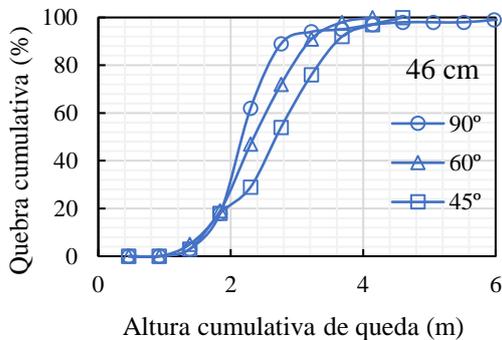
tangencial dissipada na colisão foi responsável pelo maior dano às pelotas, demonstrando que ela tende a mais facilmente induzir dano por tração às pelotas. No caso do impacto a 45°, a redução da componente normal da energia de impacto resultou na diminuição da severidade do impacto, mesmo com o aumento da componente tangencial, mas ainda assim sendo responsável por induzir maior dano que o impacto normal (TAVARES e ALMEIDA, 2020). Esses resultados demonstram a complexidade da resposta mecânica de pelotas verdes ao carregamento por impacto.



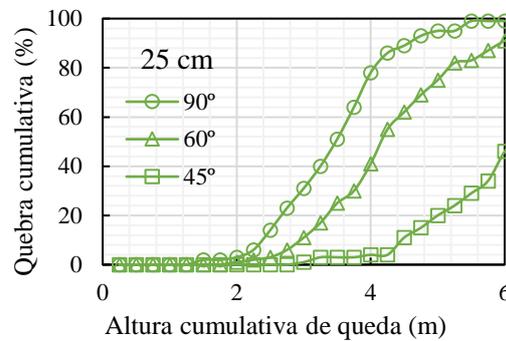
a



b



c



d

Figura 57 - Quebra cumulativa em relação à altura cumulativa de queda para diferentes angulações nas quatro alturas de queda a) 100 cm b) 75 cm c) 46 cm d) 25 cm (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

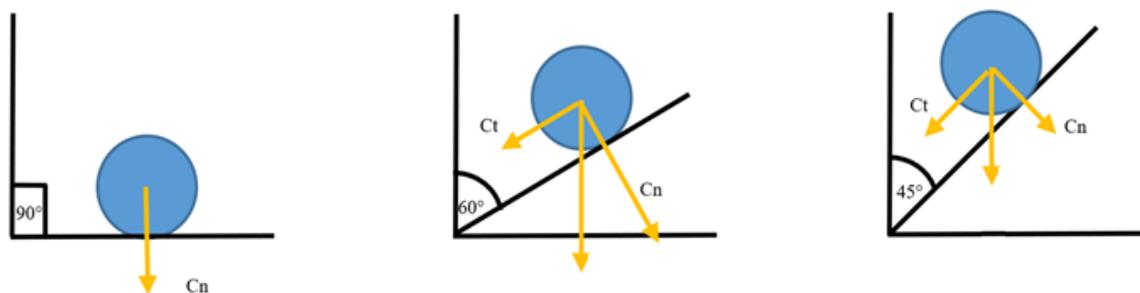


Figura 58 - Decomposição da componente de força exercida pela pelota à superfície com inclinação (TAVARES e ALMEIDA, 2020)

3.5 Fragmentação de partículas

Durante a fragmentação, através da qual as partículas estão susceptíveis à fratura, relativamente pouco controle existe sobre eventos de impacto individuais, de modo que, em muitos casos, a energia aplicada a uma partícula pode ser menor do que o mínimo necessário para causar fratura (TAVARES e KING, 2002). Vários estudos foram realizados com base em análises da fratura das partículas minerais, aplicando conceitos de mecânica da fratura e do dano, permitindo estimar o comportamento mecânico das partículas a partir dos mecanismos de fragmentação aos quais elas são submetidas (TAVARES *et al.*, 2018).

As partículas minerais são fraturadas como resultado da ação de esforços que podem ser classificados como normais ou tangenciais. Esforços normais podem ser de compressão ou de tração, enquanto os tangenciais correspondem aos de cisalhamento (TAVARES, 1997). Todo esforço aplicado em sólidos faz com que eles sofram uma deformação, que pode ser classificada de dois tipos: deformações elásticas e deformações inelásticas. As deformações elásticas e inelásticas são o meio que a estrutura interna dos sólidos dispõe de armazenar ou dissipar a energia mecânica aplicada sob a forma de esforços. Quando os esforços aumentam além de certo ponto, o sólido não é mais capaz de resistir os esforços e a ruptura ocorre (TAVARES e KING, 1998).

Tavares e Lima (2006) observaram que parâmetros de fratura de partículas geralmente apresentam uma grande variabilidade, a qual deve ser descrita estatisticamente. Essa variabilidade é influenciada pelos diferentes formatos de partícula na amostra, mas ela é, principalmente, determinada pela distribuição de tamanhos de defeitos.

A abordagem sobre os materiais particulados é diferente das usadas na mecânica da

fratura e resistência dos materiais. As partículas não possuem estruturas internas regulares, dificultando o conhecimento das distribuições internas dos esforços. Em processos industriais de fragmentação, as partículas são fraturadas, principalmente, por esmagamento gerado pelos impactos, que alteram a estrutura interna da partícula, provocando fragmentação e/ou deformações inelásticas. Existe uma região de alta densidade de energia de deformação da partícula onde, abaixo desta, surgem esforços de tração que se estendem até o lado oposto de aplicação da carga. É nesse ponto, ou em uma trinca já existente, que se inicia a propagação de uma ou mais fraturas na partícula (TAVARES e KING, 2002).

O comportamento de fragmentação de uma partícula individual é fortemente influenciado pela forma, pelo tamanho e pelas condições de carregamento das partículas. Cunha (2014) afirma que a influência da forma da partícula, e as diferenças no comportamento de fratura das partículas são válidas, pois a forma de aplicação de energia, e os tempos de contato mudam com o formato da partícula.

A energia de fratura não depende somente do tamanho da partícula, mas também de como a fragmentação se processa, do número e concentração de trincas presentes. Um mesmo material pode apresentar energias de fratura totalmente diferentes devido ao número de trincas e devido ao modo como as micro trincas se distribuem nas partículas (TAVARES, 1997). A Figura 59 apresenta a relação entre energia de fratura específica e o tamanho da partícula. Quanto menor o tamanho de partícula, maior é a energia específica necessária para fragmentá-la. Isso pode ser explicado pelo fato que quanto menor o tamanho da partícula menor é a probabilidade da existência de trincas ou micro trincas com tamanhos críticos. Esse comportamento está relacionado com o tamanho no qual ocorre a transição de comportamento elástico para plástico (TAVARES e LIMA, 2006; TAVARES *et al.*, 2007). Conclui-se então que quanto menor for o tamanho da partícula mais tenaz ela será. A Figura 59 mostra ainda a variação da energia de fratura para diferentes materiais.

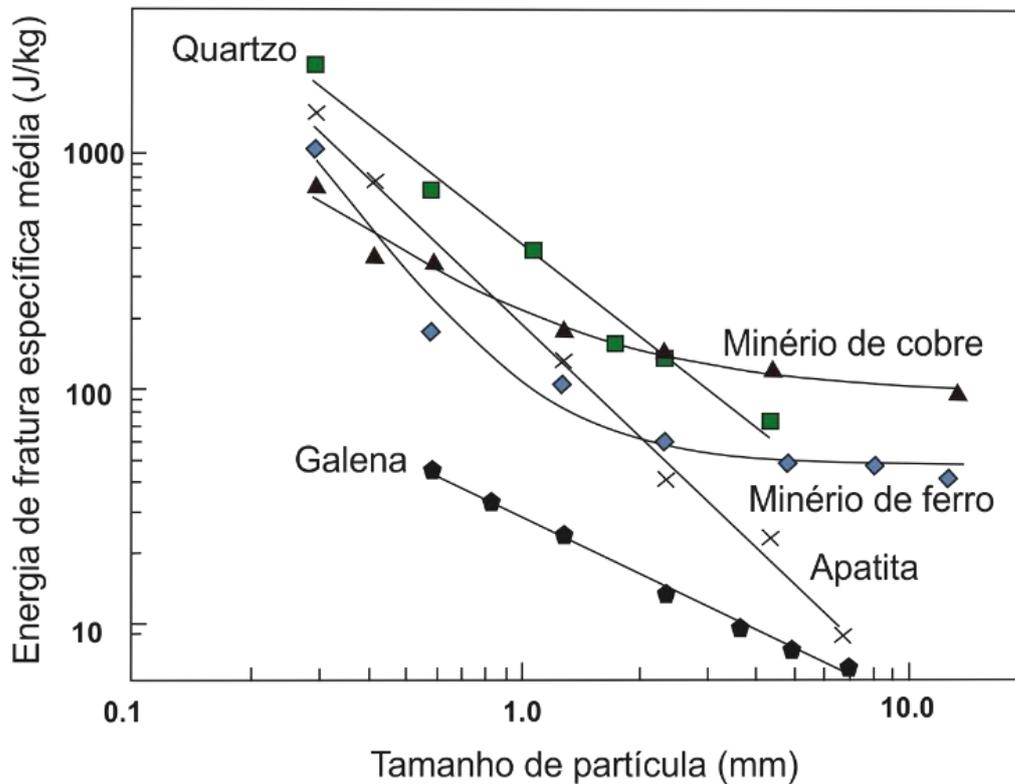


Figura 59 - Energia específica de fratura média em função do tamanho da partícula (TAVARES, 1997)

3.6 Degradação de materiais granulados

A degradação é geralmente descrita como a percentagem de uma fração de tamanho indesejada que resulta do manuseio e transporte do aglomerado. Tal mecanismo também pode ser denominado de fratura ou fragmentação (TEO *et al.*, 1990). A fragmentação das partículas ocorre devido à aplicação de forças de contato capazes de deformar as partículas ocasionando o aparecimento de tensões cuja resposta do material é a geração de trincas ou a deformação inelástica. Esse processo é caracterizado pelos mecanismos de abrasão, estilhaçamento ou clivagem, os quais dependem do nível de energia aplicada sobre as partículas (TAVARES e KING, 1998).

Para melhor entendimento sobre os principais fatores que influenciam na degradação, vários estudos foram realizados em escala laboratorial. O objetivo foi observar o comportamento mecânico dos materiais mediante condições e características específicas.

3.6.1 Influência do número de impactos e da altura total de queda

Weedon e Wilson (2000) mostraram, a partir de ensaios com pêndulo duplo, que a substituição de um impacto por vários impactos de alturas mais baixas, considerando que a soma delas fosse equivalente à altura total para um único impacto, produziria a mesma proporção de finos. Por outro lado, Sahoo (2007) e Tavares e Carvalho (2012) verificaram que a proporção de finos gerados aumenta com a diminuição do número de impactos para uma mesma altura total de queda.

3.6.2 Efeito de amortecimento pela presença de finos

Sahoo (2007) avaliou o efeito do amortecimento 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.

3.6.3 Efeito da superfície de impacto

De acordo com Sahoo (2007), a degradação resultante é diferente quando se muda as superfícies de impacto. Foi verificado que a geração de finos por impacto aumentava mais rapidamente para superfícies mais rígidas a exemplo do aço. Esse efeito também foi observado por Tavares e Carvalho (2012) para minério de ferro.

3.6.4 Efeito do tamanho de partícula

Conforme descrito por Weedon e Wilson (2000) existe uma tendência de aumento da resistência de minérios à quebra com a diminuição do tamanho de uma partícula. Sahoo (2007) cita que a geração de finos como resultado de impactos sucessivos de partículas de carvão mineral a uma altura de 5 metros diminuía com a redução do tamanho de partícula.

3.6.5 Efeito de estabilização e ordem dos eventos de impacto

Tavares e Carvalho (2012) verificaram que, quando uma população de partículas de minério é submetida a repetidas quedas de baixa energia, há a tendência que as partículas mais frágeis deste sejam rapidamente desintegradas já nos primeiros impactos, enquanto que as partículas remanescentes conseguem resistir a um maior número de

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

Norgate *et al.* (1986) verificaram que a quantidade de finos gerados pela degradação depende da ordem dos eventos de impacto. Para uma dada altura total de queda, a degradação será maior nas primeiras operações de um circuito de manuseio do que nas últimas, devido ao fenômeno seletivo de estabilização anteriormente descrito, pois as partículas mais frágeis irão desaparecendo da referida faixa de tamanho manipulada. Esse mesmo efeito foi observado para granulados de minério de ferro por simulação por Tavares e Carvalho (2012).

3.6.6 Influência da composição mineralógica

O comportamento mecânico de qualquer material está associado à sua microestrutura que, no caso de pelotas, envolve também a composição mineralógica (MEYER *et al.*, 2016). Neste contexto, a presença de fayalita na microestrutura tem um efeito negativo na resistência da pelota tratada. Esse efeito foi observado nos testes por Meyer *et al.* (2016) nos quais a redução de resistência à compressão ocorreu na proporção que a fayalita elevou em linha com a identificação desta fase em maiores quantidades.

3.6.7 Influência do tempo de envelhecimento

A condição climática é um fator que exerce influência significativa na mudança do comportamento mecânico para diversos materiais, sobretudo quando estes são armazenadas em pátios de estocagem a céu aberto. Martins (2013) afirma que a energia específica necessária para a fratura de pelotas queimadas diminui com o tempo de estocagem, sendo também influenciada pela umidade presente nas pelotas para redução direta. Esse trabalho mostrou que o ambiente de exposição influencia no comportamento à degradação das pelotas.

3.7 Modelamento matemático e simulação computacional

Um modelo matemático é uma equação ou conjunto de equações que representa um processo real. Tais equações são resolvidas em função de alguns valores conhecidos ou previstos pelo modelo e podem ser testadas através da comparação com os dados conhecidos ou previstos com as medidas realizadas no mundo real (ARIS, 1993).

De acordo com Sodré (2007) as equações matemáticas de um modelo não

proporcionam a própria explicação científica do modelo, mas simplesmente interpretam as hipóteses de um ponto de vista quantitativo, dando-nos a condição de deduzir consequências e mostrar-nos onde estão os detalhes que deverão ser aceitos ou recusados. O objetivo mais importante de um modelo é que ele permite entender o próprio fenômeno de uma forma simples ou então descrever este modelo mais completamente, de modo que o modelo possa ser tão preciso quanto o mundo real.

Em geral, modelos matemáticos podem ser classificados em:

- Empíricos;
- Fenomenológicos;
- Mecanicistas.

Modelos empíricos são baseados exclusivamente em dados experimentais obtidos no próprio processo, sendo correlacionados por meio de técnicas de regressão. Por meio deles são associados parâmetros de desempenho com variáveis operacionais e de projeto. Os modelos fenomenológicos estão relacionados com alguma descrição teórica simplificada do processo, utilizando valores de parâmetros obtidos no próprio processo, representando os fenômenos físicos sem tentar estabelecer uma descrição microscópica ou corpuscular com partículas elementares. Por fim, pode-se afirmar que modelos mecanicistas são os que consideram cada elemento envolvido e são construídos a partir do conhecimento do mecanismo físico básico que relaciona as variáveis do processo (CARVALHO e TAVARES, 2013). Os modelos baseados na mecânica do contínuo são fenomenológicos e estão voltados para a modelagem matemática do fenômeno observado sem preocupar-se com fundamentos físicos significantes. Entretanto, no caso de materiais particulados, forças são transferidas por meio de contatos entre as partículas. A natureza granular de materiais particulados, sua deformação e suas imperfeições são causa de problemas que ocorrem como resultado do pressuposto da continuidade. Este comportamento discreto faz com que seja necessário compreender o meio complexo do particulado e que sejam realizados muitos testes em laboratório antes que possa ser modelado o processo físico (SITHARAM, 2000).

3.7.1 Modelos matemáticos para degradação de materiais

Em usinas de pelotização o controle de qualidade das pelotas queimadas 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. 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 (TAVARES e CARVALHO, 2012). Além disso, novas técnicas de caracterização estão sendo desenvolvidas para a determinação de parâmetros importantes para o modelamento da degradação.

Para melhor entendimento, nos últimos anos vários pesquisadores e empresas têm investido tempo e recursos utilizando modelos matemáticos e simulações computacionais para previsão da degradação de minérios de ferro e seus aglomerados.

Pesquisadores, tais como Teo *et al.* (1990), propuseram metodologias, porém nenhuma delas demonstrou ser capaz de fornecer previsões de degradação que atendessem às necessidades do processo produtivo. Com o intuito de preencher esta lacuna, foi desenvolvido um modelo matemático de degradação no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ, 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 (TAVARES e CARVALHO, 2012). Entretanto, Tavares *et al.* (2018) aplicaram 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 *et al.* (2019, 2020) implementaram diversas melhorias no modelo, considerando parâmetros de quebra em função do tamanho da pelota, um modelo aprimorado para a fragmentação superficial, entre outras. A Tabela 3 mostra a evolução desses estudos, inteiramente voltados para degradação de materiais rígidos.

Tabela 3 - Estudos relacionados à manuseio e degradação de granulados e pelotas de minério de ferro

Material	Autor	Título	Periódico	Ano
Minério	TEO, C. S., WATERS, A. G. S.K. NICOL	Quantification of the breakage of lump materials during handling operations	International Journal of Mineral Processing	1990
Minério	TAVARES, L.M., KING, R.P.	Modeling particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics	Powder Technology	2002
Minério	TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M.	Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics	International Journal of Mineral Processing	2012
Pelota queimada	TAVARES, L.M., CAVALCANTI, P.C., CARVALHO, R.M., SILVEIRA, M.W., BIANCHI, M., OTAVIANO, M.	Fracture probability and fragment size distribution of fired Iron ore pellets by impact	Powder Technology	2018
Pelota queimada	CAVALCANTI, P.P., CARVALHO, R.M., CHAGAS, A.S., SILVEIRA, M.W., TAVARES, L.M.	Surface breakage of fired iron ore pellets by impact	Powder Technology	2019
Pelota queimada	CAVALCANTI, P.P., PETIT, H.A., THOMAZINI, A.D., CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M.	Modeling of degradation by impact of individual iron ore pellets	Powder Technology	2020

No que diz respeito aos estudos sobre parametrização e simulações de pelotas verdes, três merecem destaque. Wang *et al.* (2015) estudou o fluxo de pelotas verdes em descarga de tambor e recentemente Silva *et al.* (2018 e 2020) publicaram estudos voltados ao peneiramento de pelotas verdes sobre peneira de rolos. Cabe ressaltar que sobre modelamento de quebra, não existem na literatura pesquisada, modelos matemáticos que preveem a degradação de pelotas verdes durante manuseio e transporte.

3.8 Método dos Elementos Discretos

No caso de materiais particulados é vantajoso tratar o meio como um conjunto de partículas que permitirá a exploração dos mecanismos reais envolvidos, e não como um

contínuo. Nestes casos, outras técnicas devem ser utilizadas. A principal dessas é o método dos elementos discretos (DEM – do inglês *Discrete Element Method*). Um modelo DEM se resume a um código computacional cíclico que, a cada iteração, a partir da posição das partículas, é capaz de detectar os pontos de contato e as forças atuando em cada partícula e então aplicar as Leis de Newton para calcular as acelerações, velocidades e novas posições de cada partícula na iteração seguinte, conforme fluxo mostrado na Figura 60 (ARIS, 1993).



Figura 60 - Fluxo básico de funcionamento do DEM (CUNDALL e STRACK, 1979)

O DEM consiste em um método de simulação numérica útil na descrição do movimento de grande número de partículas, normalmente modeladas por geometrias simples, dentro de um sistema fixo ou móvel que varia com o tempo. Esse método representa a simulação dinâmica, baseado em um modelo para as forças de contato entre as partículas que leva em consideração as forças elásticas de repulsão, forças de atrito estático e dinâmico, além de forças de dissipação viscosa. Estes elementos discretos podem ser rígidos ou deformáveis e interagem entre si por meio de forças de contato normais e cisalhantes (tangenciais) (CUNDALL e STRACK, 1979).

O método de abordagem de partícula macia originalmente desenvolvido por Cundall e Strack (1979), foi a primeira técnica de simulação de dinâmica de partícula publicado na literatura. Nessa abordagem é permitido que as partículas sofram deformações pequenas, e estas deformações são usadas para estimar forças elásticas, plásticas e de atrito entre as partículas. O movimento das partículas é descrito pelas leis do movimento de Newton. Uma característica dos modelos de partícula macia é que eles são capazes de lidar com múltiplos contatos entre partículas, o que é importante quando se modela sistemas quase estáticos. Em contrapartida, em uma simulação de partículas rígidas, uma sequência de colisões é processada, uma colisão de cada vez e sendo instantânea; frequentemente as forças entre partículas não são explicitamente

consideradas.

O estudo das propriedades elásticas de materiais granulares tem sido abordado por muitos autores desde os trabalhos pioneiros de Mindlin na década de 50 (Mindlin, 1949). Na abordagem mais comum as partículas sólidas são capazes de se sobrepor e a magnitude da sobreposição e as velocidades relativas, normal e tangencial, determinam as forças de colisão. Existe uma série de modelos para a força de contato que aproximam a dinâmica das colisões para várias abordagens. Recentemente com o aumento da capacidade de processamento dos computadores tornou-se possível utilizar um modelo de contato mais realista que é o modelo de contato de Hertz-Mindlin, que está implementado em softwares comerciais como o EDEM[®] (DEM Solutions, 2008).

O EDEM[®] fornece vários modelos de contato para descrever o comportamento dos elementos quando colocados em contato entre si e com a geometria:

- Hertz-Mindlin sem deslizamento;
- Hertz-Mindlin sem deslizamento com fricção de rolagem dependente de velocidade relativa;
- Hertz-Mindlin com colagem;
- Hertz-Mindlin com condução de calor;
- Atualização de temperatura;
- Hertz-Mindlin com coesão de JKR (Johnson-Kendall-Roberts);
- Coesão Linear;
- Histerese de molas.

A escolha entre os modelos é baseada em observações fenomenológicas do movimento de partículas e do objeto de estudo. Da literatura, é possível selecionar quatro modelos de contato em potencial (ou sua combinação) que podem representar sistemas constituídos de pelotas verdes / bastão (Silva *et al.*, 2018).

3.8.1 Calibração de parâmetros (DEM)

Segundo Grima e Wypych (2010), a caracterização do material granular e os testes das propriedades de escoamento fornecem informações valiosas para o correto dimensionamento de um equipamento. De uma mesma forma, com simulações de DEM o modelo de material ou o comportamento mecânico das partículas precisa ser corretamente ajustado para representar com precisão o comportamento físico de uma

única partícula e as características de escoamento do material granular. Alguns desafios em transformar DEM em uma ferramenta preditiva incluem:

1. O desenvolvimento de metodologias eficientes e válidas para quantificar e ajustar os parâmetros;
2. Validação experimental de modelos em larga escala para verificar e estabelecer técnicas para aplicar em modelagem de materiais granulares;
3. Desenvolvimento de técnicas para modelar adequadamente o aumento de escala de equipamentos, sem afetar significativamente a qualidade dos resultados.

O modelo de DEM consiste em um modelo aproximado de um sistema granular real. Desta forma, alguns fatores necessitam de atenção especial para serem corretamente descritos e simulados, podendo até mesmo inviabilizar a simulação dada sua complexidade, deformação permanente, quebra, rugosidade superficial, forma exata de cada partícula. Seus efeitos, porém, são importantes na forma como o meio granular irá se comportar (FAVIER *et al.*, 2001). Assim, estes não podem ser ignorados, e podem ser compensados por meio do ajuste do modelo computacional de DEM a parâmetros experimentais, obtidos a partir de amostras do material a ser simulado. Para modelar o comportamento e alcançar um comportamento granular similar ao material particulado real na aplicação desejada, diversos experimentos em escala piloto podem ser realizados a fim de fazer um ajuste “fino” dos parâmetros de DEM, baseados em parâmetros-chaves selecionados. O objetivo de tais testes de calibração é correlacionar o comportamento físico do material particulado com o comportamento virtual, no que diz respeito ao seu movimento de rolagem, movimento de deslizamento, impacto e restituição e rigidez granular do material, se relevante. Apenas estimar parâmetros, tais como o coeficiente de restituição, coesão, atrito estático e atrito de rolamento, pode ser arriscado e reduzir a confiabilidade na precisão dos resultados se não houver nenhuma verificação experimental (GRIMA e WYPYCH, 2010).

Diferente de simulações com fluidos, onde muitas das propriedades físicas podem ser encontradas na literatura ou estimadas, são menos comuns de serem encontradas literaturas específicas contendo parâmetros de interação necessários para um modelo de DEM. Assim, cada novo material introduzido no modelo de DEM deve ser estudado e calibrado para que suas propriedades sejam encontradas. Da mesma forma, não existe ainda uma padronização sobre quais experimentos devem ser utilizados para obter os dados necessários de forma mais rápida e precisa. Esta é ainda uma área em desenvolvimento, porém muitas técnicas já foram elaboradas, incluindo medida de ângulo

de repouso, medida de ângulo de escorregamento, vazão mássica, entre outros - com bons resultados validados experimentalmente.

De uma forma geral, o experimento a ser utilizado deve ser simples e de rápida reprodução por meio de DEM, a fim de que diversas simulações possam ser feitas deste experimento em um curto período (GRIMA e WYPYCH, 2011). O método regularmente adotado na etapa de calibração é de tentativa e erro, os passos a serem seguidos são:

1. Medir experimentalmente, ou visualmente registrar um dado comportamento;
2. Criar no software de DEM um modelo que irá reproduzir um comportamento semelhante ao realizado no teste experimental;
3. Alimentar o modelo de DEM com um conjunto de valores de parâmetros e rodar a simulação;
4. Verificar os resultados obtidos com aquele conjunto de valores a fim de verificar quão próximo do comportamento real o modelo se encontra;
5. Retornar ao início da simulação, modificar um ou mais parâmetros e repetir a simulação;
6. Repetir os passos 4 e 5 até que os parâmetros ótimos forem obtidos.

Ao calibrar um modelo, o material real é testado e os parâmetros do DEM são variados de forma a aproximar a resposta da simulação à resposta física observada. Em contraste, em um teste de validação experimental um material granular simplificado é considerado, permitindo a correta representação do tamanho das partículas e das propriedades do material na simulação (GRIMA e WYPYCH, 2011). Portanto, em um teste de validação experimental o objetivo é analisar a resposta global do conjunto de partículas, comparando o resultado com um ensaio experimental similar. Testes de validação experimental amplamente utilizados na literatura são a comparação do ângulo de empilhamento da simulação com ensaios físicos com partículas simplificadas (O'SULLIVAN, 2011a). Um exemplo deste tipo de validação foi realizado por Wang *et al.* (2015), os quais observaram o escoamento de pelotas verdes de minério em um circuito de pelotamento. Através da pilha formada sobre uma correia transportadora pode-se medir o perfil da seção transversal, bem como o ângulo de escoamento formado durante a quedas das pelotas. A comparação dos parâmetros medidos na planta de pelotização com o resultado da simulação foi subsídio para validação dos parâmetros de calibração.

Wang *et al.* (2015) simularam a descarga de pelotas verdes de minério de ferro de um tambor rotativo utilizando uma versão DEM denominada *Nonsmooth Discrete Element Method* (NDEM). Essa versão foi utilizada com o intuito de combinar a

estabilidade numérica em grandes passos de integração durante a simulação. Com isso foi possível otimizar o tempo de processamento e modelar a natureza visco elástica das forças de contato entre as partículas. Silva *et al.* (2018) também fizeram simulações com pelotas verdes, nesse caso passando por um sistema de peneiramento com rolos giratórios. Os contatos entre pelotas, e entre pelotas e as geometrias foram descritos usando o modelo de Hertz-Mindlin com correção de JKR (JOHNSON *et al.*, 1971), a fim de explicar a natureza viscosa das pelotas verdes de minério de ferro (SILVA *et al.*, 2018). Nesse estudo foram descritas as interações entre pelota-pelota, pelota-aço e pelota-borracha. A Figura 61 mostra a medição dos parâmetros de restituição durante a queda de pelotas sobre uma superfície de borracha.

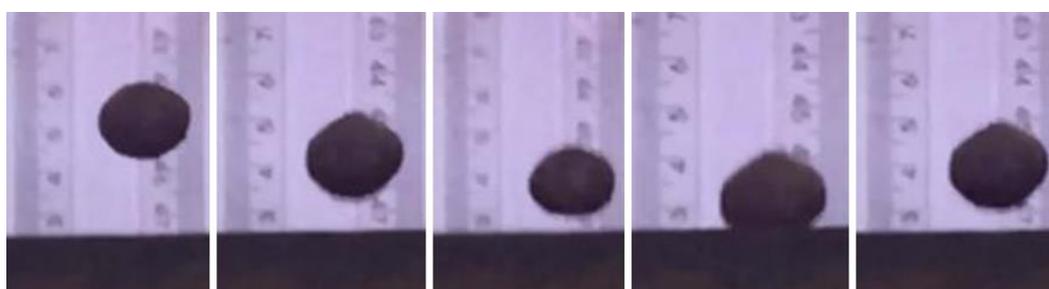


Figura 61 - Sequência de quedas de pelotas verdes em uma placa de borracha (SILVA *et al.*, 2018)

O coeficiente de restituição, razão imediatamente antes e após a colisão, encontrado nos ensaios de queda foi igual a 0,05 para ambos os contatos, pelota-borracha e pelota-pelota, e igual a 0,08 para contatos de pelota-aço. Esses valores são significativamente inferiores aos resultados relatados por Wang *et al.* (2015), por exemplo, igual a 0,18 para contatos de pelota-aço, que são considerados excessivamente altos para tal material. Outros parâmetros de contato também são fornecidos na Tabela 4 (SILVA *et al.*, 2018).

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de contato do modelo Hertz-Mindlin JKR usado nas simulações de DEM (SILVA *et al.* 2018)

Parâmetro	Pelota verde	Aço	Borracha
Razão de Poisson	0,25	0,25	0,25
Módulo de cisalhamento (Pa)	$1,8 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^7$
Densidade (kg/m ³)	3150	7800	860
Interação	Pelota-Pelota	Pelota-Aço	Pelota-Borracha
Coeficiente de restituição	0,10	0,10	0,05
Coeficiente de atrito estático	0,30	0,35	0,71
Coeficiente de atrito de rolamento	0,10	0,25	0,05
Energia específica de coesão (J/m ²)	1,50	0,50	0,50

A distribuição de tamanhos das pelotas foi estimada com base nos dados do sistema de análise de imagens *on-line* instalado na usina de pelotização (SILVA *et al.* 2018). O sistema forneceu medições em porcentagem abaixo de 20, 16, 12,5, 10, 8, 6,3 e 5 mm, sendo esses dados correspondentes ao critério de projeto da usina.

No entanto, para melhor avaliação do balanço de massa durante o peneiramento outras classes de tamanhos intermediários precisaram ser criadas através das granulometrias medidas nas imagens. A distribuição de tamanho das pelotas verdes foi então linearmente discretizada em 36 classes de tamanhos, com a menor classe com 5,9 mm e a maior com 20 mm de diâmetro (Figura 62) a ser usada nas simulações com o DEM (SILVA *et al.*, 2020).

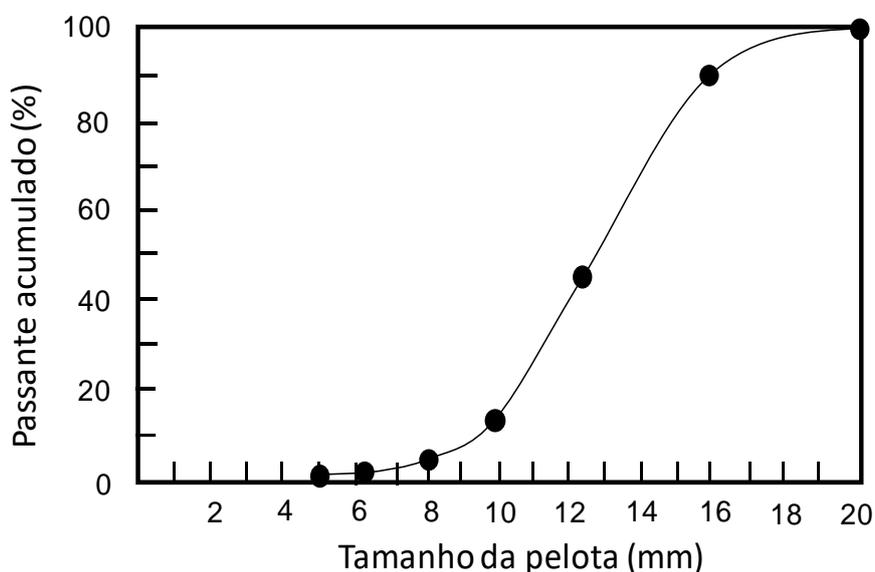


Figura 62 – Curva interpolada da distribuição de tamanhos de pelotas verdes (Silva *et al.* 2020)

Silva *et al.* (2018) realizaram testes estáticos e dinâmicos para caracterização de pelotas verdes de minério de ferro produzidas em laboratório. Neste estudo foi determinado as propriedades individuais e a granel das pelotas verdes em ensaios físicos para calibração e validação comparando com dados industriais de modelos de contato para que reproduzam o movimento destes sólidos.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram utilizadas diversas etapas para construção e calibração do MDPV, para que posteriormente pudesse ser utilizado para realização das simulações em ambiente relevante. Neste caso, a Usina 5, que possui peneira de rolos na saída dos discos e um único *deck* de rolos na entrada do forno, foi selecionada para aplicar o MDPV na avaliação da degradação de pelotas verdes no pelotamento. Inicialmente foram conferidos e ajustados os parâmetros de contato das pelotas obtidos por Silva *et al.* (2018). Esses parâmetros ajustados foram inseridos no software EDEM, em conjunto com as geometrias escaneadas e corrigidas no CAD. Após a realização das simulações, as informações extraídas foram submetidas a uma etapa de pós-processamento, que consiste na compilação e análise dos dados extraídos das simulações.

A amostragem industrial foi necessária para determinação da curva granulométrica das pelotas produzidas na Usina 5. Essa mesma amostra, junto com os ensaios realizados no degradômetro, serviu de referência comparativa para validação do MDPV.

A Figura 63 mostra de forma esquemática as principais etapas da metodologia utilizada neste trabalho.

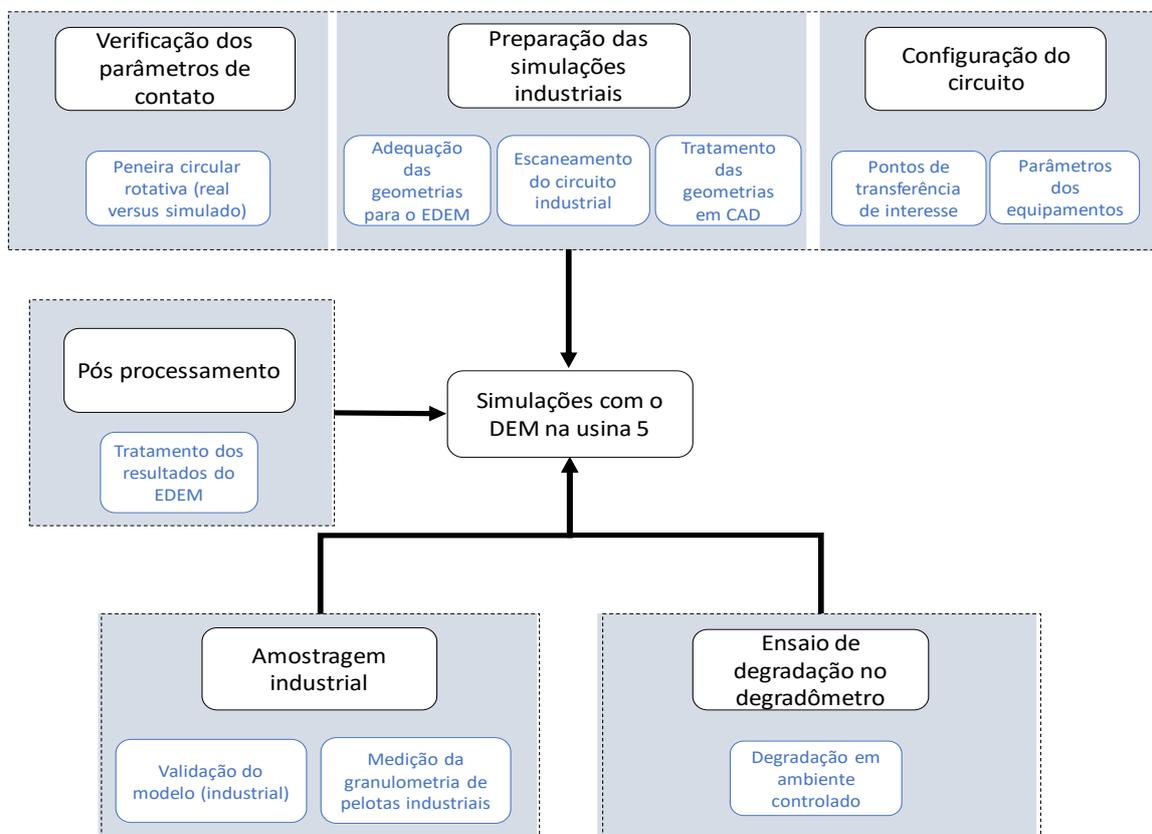


Figura 63 - Fluxograma da sequência de trabalhos realizados para realização das simulações e validação do MDPV

4.1 Verificação dos parâmetros de contato utilizados na simulação

Embora a calibração de parâmetros dos modelos de contato para pelotas verdes simuladas com o método dos elementos discretos tenha sido realizada e documentada previamente no projeto PEMM 19687 (Fundação COPPETEC), e em Silva *et al.* (2018 e 2020), as pelotas utilizadas naquela ocasião tinham origem em outra usina da Vale (Unidade de Vargem Grande/MG). A fim de assegurar que a modelagem das pelotas verdes em DEM para as operações de manuseio da Usina 5 fossem fiéis à realidade, planejou-se uma série de experimentos de manuseio em escala reduzida utilizando a unidade piloto disponível na Vale em Vitória/ES.

Para isso, experimentos de classificação em uma peneira circular rotativa piloto foram realizados. O objetivo foi a reprodução, via simulações DEM, do movimento das pelotas verdes no interior da peneira circular rotativa.

A peneira circular rotativa consiste em um cilindro rotativo disposto a um certo ângulo do plano horizontal. O cilindro possui aberturas que permitem classificar pelotas verdes, entretanto, vale ressaltar que o objetivo deste ensaio piloto é somente a verificação da movimentação das pelotas na peneira rotativa, e não sua classificação na peneira. A peneira circular rotativa possui diâmetro de 380 mm, comprimento de 1100 mm e as aberturas periféricas possuem três valores, sendo: 22 segmentos com 9 mm de abertura, 8 segmentos com 12 mm e, por fim, 7 segmentos com 16 mm de abertura (Figura 64). Sob cada uma das regiões de aberturas existe uma calha para a coleta das pelotas que passam. Destes, a primeira calha é metálica enquanto as demais são constituídas de borracha e plástico. Ao passar pela calha, as pelotas se depositam em recipientes plásticos próprios para a coleta das amostras classificadas.

A movimentação das pelotas no interior do equipamento foi registrada com câmera de alta velocidade de aquisição SONY RX-10 IV, capaz de registrar vídeos em alta resolução a uma taxa de 960 quadros por segundo. A Figura 64 mostra o arranjo de iluminação e da posição da câmera para realização das gravações dos ensaios. Os dados gerados foram utilizados para a validação dos coeficientes das pelotas verdes.

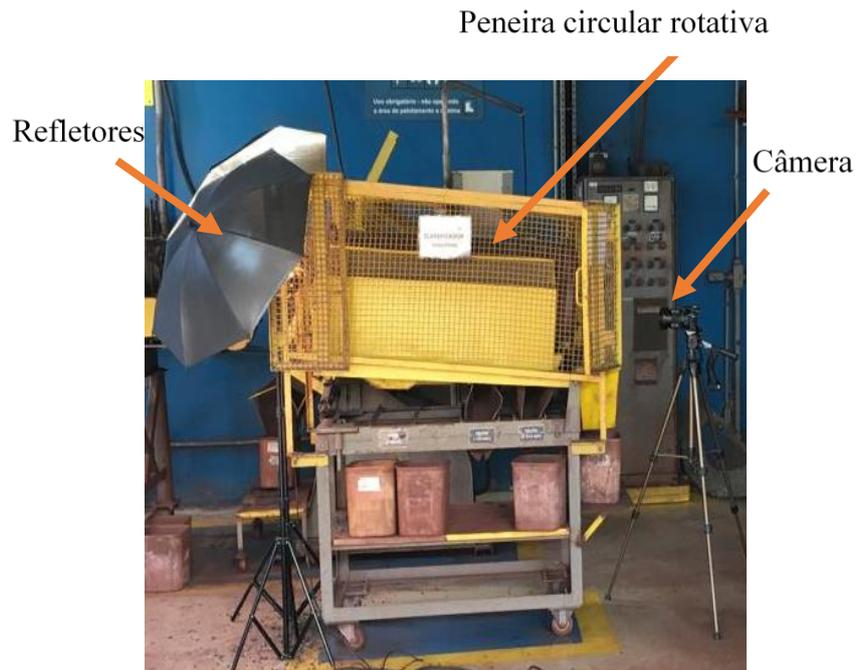


Figura 64 - Posição dos equipamentos para filmagem das pelotas verdes dentro da peneira circular rotativa localizada na Vale S.A.

Para a reprodução do experimento de classificação na peneira rotativa em ambiente DEM fez-se necessário construir a geometria do equipamento em CAD a partir de medições do equipamento realizadas na planta piloto da Vale em Vitória/ES. A geometria digitalizada é apresentada na Figura 65.

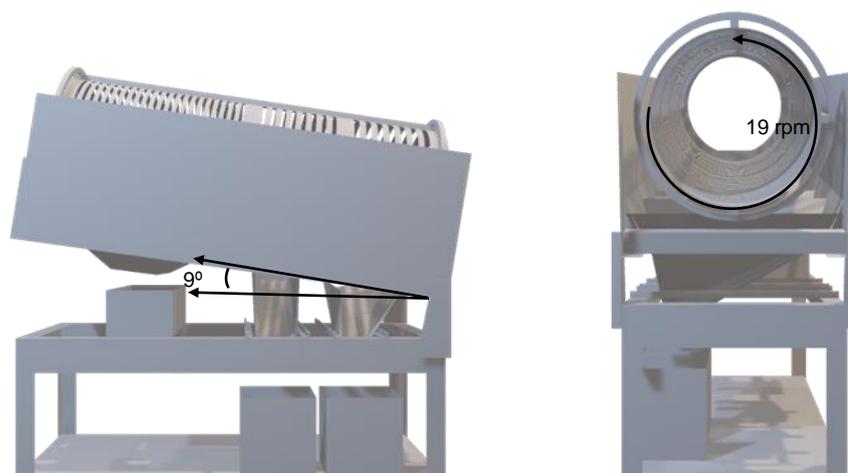


Figura 65 - Modelo tridimensional da peneira circular rotativa indicando o ângulo de trabalho e o sentido de rotação

O experimento consistiu na alimentação cuidadosa de 10 kg de pelotas verdes recém produzidas no disco piloto e alimentadas durante um período de 30 segundos. A

simulação DEM foi realizada com uma distribuição de tamanhos de pelotas denominada “distribuição base” e os parâmetros do modelo usados foram aqueles obtidos por Silva *et al.* (2018) e que são apresentados Tabela 4. A velocidade e a inclinação da peneira circular rotativa foram idênticas às condições experimentais, ou seja, 19 rpm e 9° de inclinação respectivamente.

4.2 Ensaio de degradação (degradômetro)

Para desenvolver formas para calibração do modelo de degradação de pelotas verdes (MDPV), foi desenvolvido um ensaio que possibilita medir a degradação múltipla das pelotas verdes após os impactos repetidos em diferentes alturas. Em função desta necessidade, foi desenvolvido um dispositivo denominado degradômetro para medir a degradação das pelotas verdes após quedas consecutivas em escala de laboratório.

O degradômetro consiste em um sistema composto por um tubo cilíndrico em PVC, com 730 mm de altura e 190 mm de diâmetro, fixado em um suporte metálico por uma presilha. A presilha possibilita o ajuste da inclinação do tubo, bem como a altura da borda do cilindro até a borracha que está fixada em um recipiente que serve para o recolhimento das pelotas submetidas as quedas (Figura 66). O ângulo de inclinação combinado com a altura de fixação do cilindro define a altura de quedas pelotas verdes.

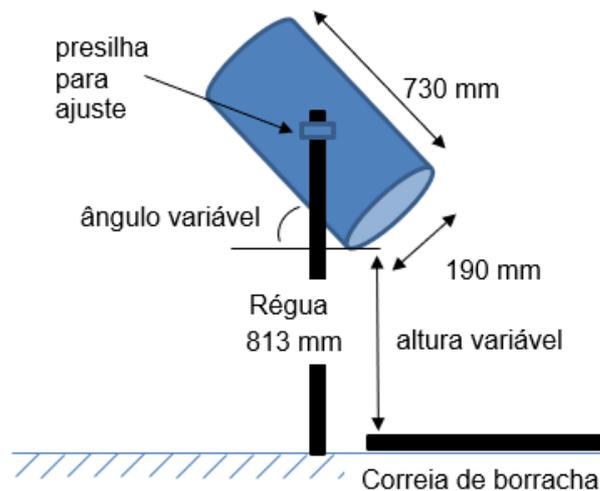


Figura 66 – Esquema do dispositivo para medição de degradação em massa (degradômetro)

Neste projeto, os ensaios realizados no degradômetro se limitaram às alturas de 500 e 800 mm. Essas alturas corresponderam às alturas de queda na saída da peneira de rolos no circuito industrial da Usina 5 (Figura 67).

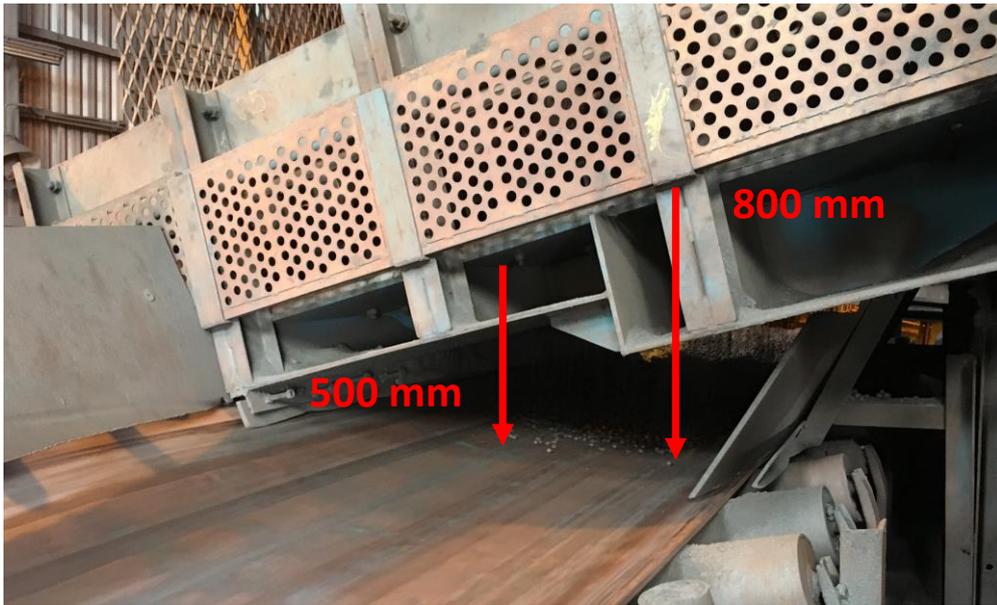


Figura 67 - Peneira de rolos na saída do disco indicando em vermelho as alturas de quedas das pelotas verdes que foram referência para o ensaio no degradômetro

As pelotas foram peneiradas em uma peneira rotativa com formato cilíndrico para separação das pelotas destinadas ao teste e separação dos cacos de pelotas durante o ensaio. A configuração da peneira foi 1100 mm de comprimento e 405 mm de diâmetro, com ângulo de 9° e rotação de 19 RPM. No início são 22 aberturas de 9 mm, seguindo de 8 aberturas de 12 mm e 7 aberturas de 16 mm (Figura 68).



Figura 68 – Peneira circular rotativa. Vista lateral (esquerda) e frontal (direita)

O ensaio foi executado adicionando-se no tubo 4 kg de pelotas verdes recém coletadas na descarga do disco de pelotamento. Essa massa de pelotas foi escolhida de modo a permitir principalmente a avaliação do efeito dos choques das pelotas com a superfície de impacto também com as demais pelotas. Ao abrir a guilhotina de retenção de pelotas no tubo, elas foram liberadas sobre uma superfície de interesse que pode ser de aço ou borracha de correia transportadora.

Uma vez que as pelotas tenham sido liberadas elas são recolhidas e podem ou não serem analisadas ou levadas novamente a um ciclo de queda. A análise granulométrica das pelotas que sofreram queda é realizada na peneira rotativa, onde são recolhidas as massas de pelotas dentro das faixas de corte da peneira que são: >16 mm, 16 x 12,5 mm, 12,5 x 10,0 mm e a fração menor que 10 mm, neste caso denominada como finos.

Após o impacto, as pelotas verdes foram classificadas e analisadas. Em função do ensaio, elas podem ser impactadas uma única vez, ou várias vezes de alturas diferentes. Para evitar a potencial degradação das pelotas durante a classificação granulométrica, a etapa de peneiramento na peneira rotativa foi realizada somente após as pelotas sofrerem um determinado número de quedas. Por exemplo, para um ensaio cujo objetivo foi a realização de cinco quedas repetidas, fez-se necessário preparar cinco lotes de amostras. A Figura 69 apresenta o fluxograma dos testes no degradômetro.

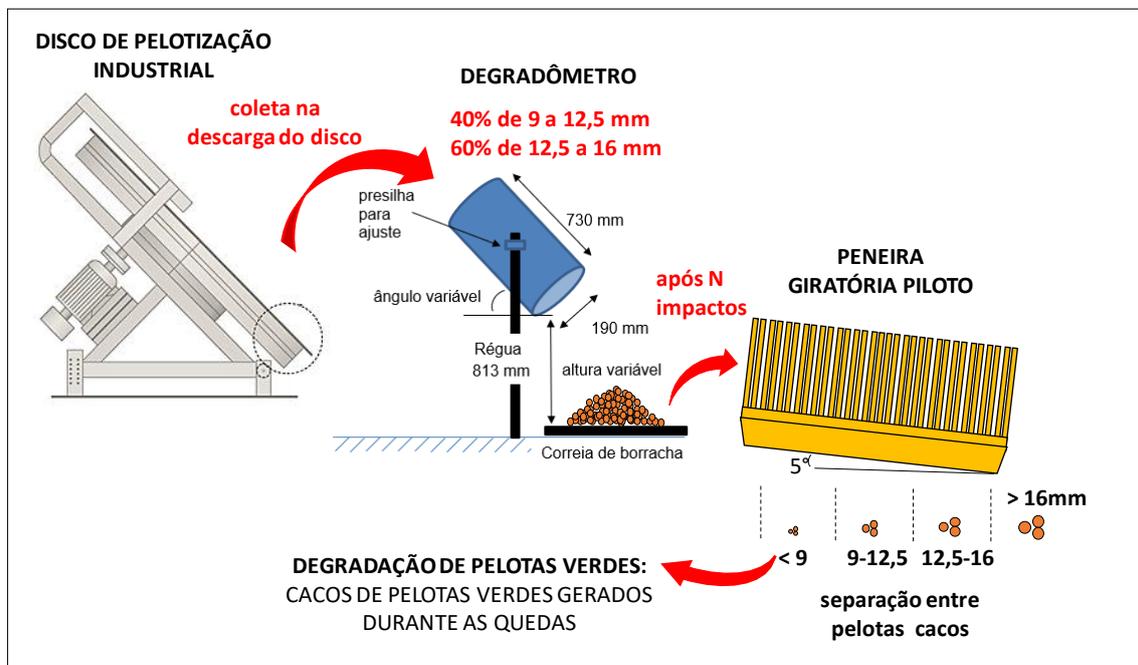


Figura 69 - Fluxo para o teste de degradação em massa por meio do degradômetro

4.3 Amostragem industrial

4.3.1 Granulometria das pelotas verdes coletadas no circuito do disco

Para comparação com os resultados da simulação da peneira de rolos, as pelotas verdes foram coletadas durante uma interrupção de operação programada na Usina 5. Antes desta parada, o disco de pelotamento 5P20B estava com alimentação de minério em 100 t/h, inclinação de 47° e frequência de rotações de 6,35 RPM. As coletas foram

realizadas nas correias 5P21B e 5P27 conforme indicação no circuito de peneiramento (Figura 70).

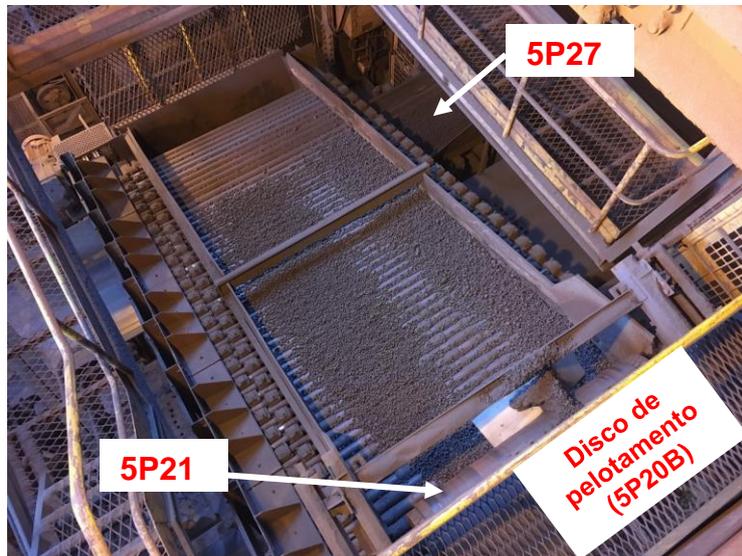


Figura 70 - Circuito de peneiramento de pelotas verdes do disco 5P20B indicando as correias 5P21B e 5P27

A primeira coleta foi de 26 kg de pelotas verdes, realizada na correia 5P21B após a descarga do disco (Figura 71), ou seja, antes da alimentação da peneira de rolos (Figura 70).



Figura 71 - Ponto de coleta sobre a correia 5P21B, de onde foi retirada amostra contendo 26 kg de pelotas verdes

A segunda coleta foi de 18,5 kg, realizada na correia 5P27 (Figura 72), sendo esta correia aquela que recebe as pelotas após o peneiramento. As pelotas com tamanhos na faixa adequada, conforme especificação (*oversize*), caem nessa correia e são transportadas para o forno de endurecimento.



Figura 72 - Ponto de coleta sobre a correia 5P27 onde foram retiradas 18,5 kg de pelotas verdes

No retorno do peneiramento, tanto os finos (*undersize*) quanto as pelotas grandes (*oversize*), se juntam em uma única correia que passa sob o circuito do disco. A distribuição granulométrica do retorno foi calculada pela diferença entre a granulometria da alimentação e do produto da peneira de rolos, ou seja, representa o somatório do *undersize* com o *oversize*.

Após a coleta, as pelotas verdes foram transportadas cuidadosamente em recipientes vedados (Figura 73), até o local onde foram realizados os peneiramentos.



Figura 73 - Recipientes fechados para o transporte das pelotas verdes até o local onde foi realizado o peneiramento

Os peneiramentos foram realizados em dois estágios, sendo que o primeiro foi realizado na peneira giratória conforme mostrado na Figura 68.

A peneira circular rotativa (Figura 68) não classifica pelotas abaixo de 9 mm e

acima de 16 mm. Portanto essas pelotas que saíram da peneira giratória, passaram por segundo peneiramento manual em peneiras com abertura quadradas de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12,5 mm, 16 mm e 18 mm (Figura 74). Após os dois estágios de peneiramento, pôde-se obter o percentual de cada faixa de tamanho de pelotas verdes referente ao *onsize*, *oversize* e *undersize*.



Figura 74 - Peneiramento manual em peneiras com aberturas quadradas

4.3.2 Granulometria das pelotas verdes medidas no granulômetro

Na saída do disco de pelotamento, sobre a correia 5P21, existe uma câmera denominada granulômetro. A função do granulômetro é medir a distribuição granulométrica das pelotas verdes logo na saída do disco de pelotamento, com imagens capturadas das pelotas verdes com a correia em funcionamento (Figura 75).

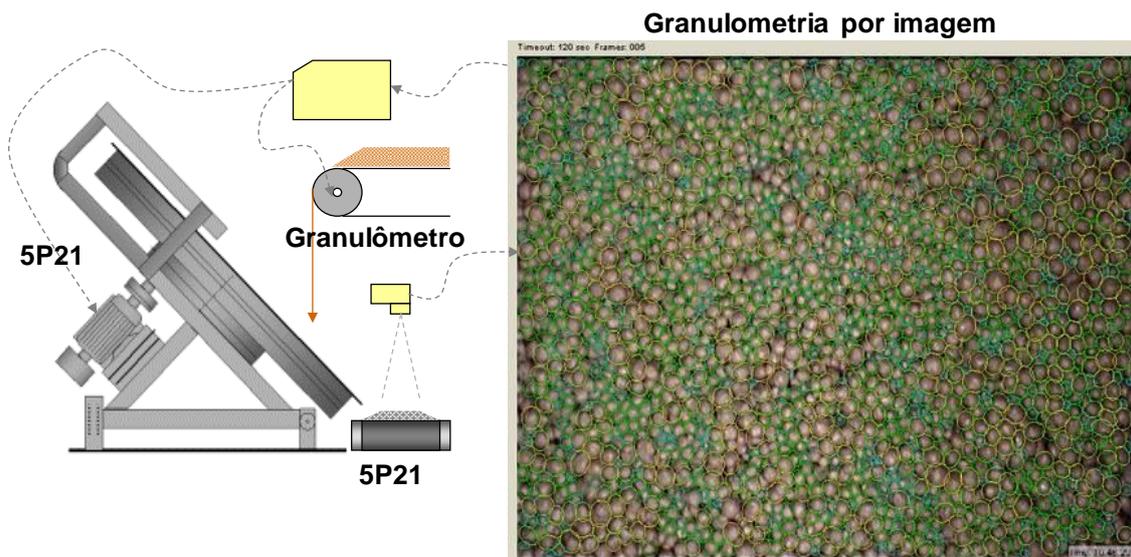


Figura 75 - Representação esquemática do controle granulométrico do disco de pelotamento

Os resultados medidos pelo granulômetro foram obtidos com o *software* PROCESS EXPLORER desenvolvido pela *Microsoft*. A granulometria medida pelo granulômetro cinco minutos antes da parada no disco 5P20B foi comparada com os resultados da amostragem de pelotas verdes após o peneiramento feito em planta piloto conforme descrição na seção 4.3.1.

4.3.3 Medição de retorno da Usina 5

O circuito de pelotamento possui várias correias transportadoras, sendo que algumas delas são equipadas com balanças que medem a massa de pelotas verdes que passa sobre elas durante o seu funcionamento. A Usina 5 possui uma peneira na saída de cada disco e um único *deck* na chegada do forno. A massa de finos abaixo de 9 mm classificada na peneira do forno é medida na balança instalada sob a correia 5P34, e o retorno total do pelotamento é medido na balança sob a correia 5P37 (Figura 76). O retorno total contém material que sai no *undersize* e *oversize* dos discos, e *undersize* da peneira de rolos instalada na entrada do forno.

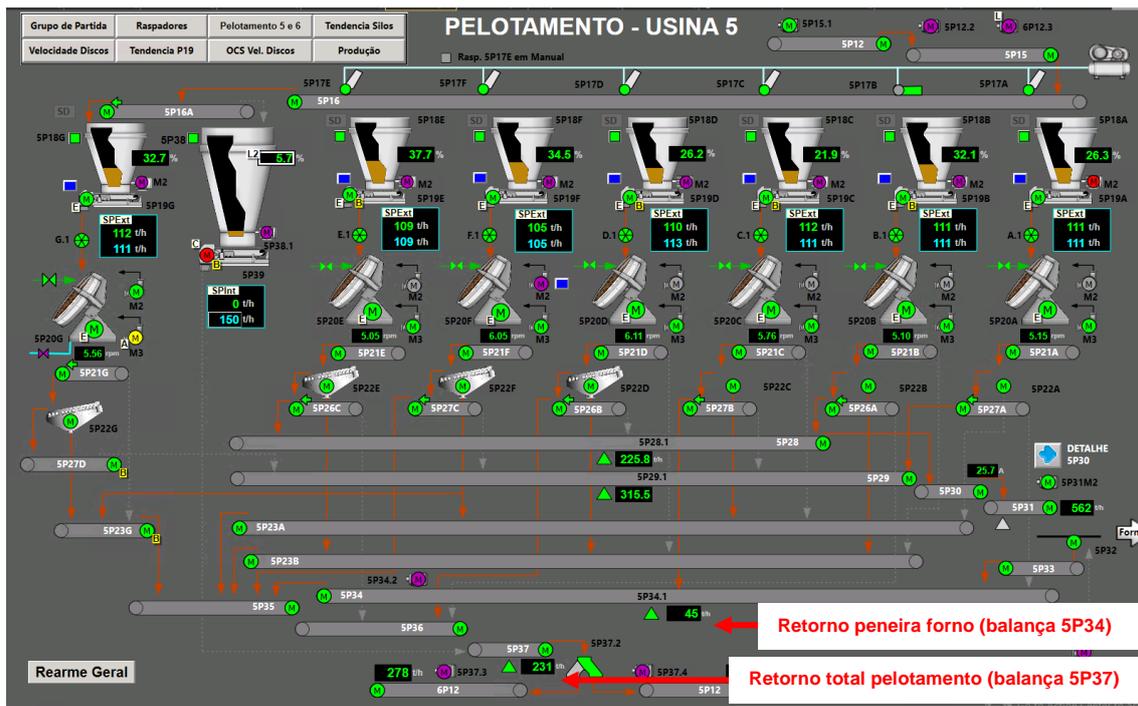


Figura 76 - Tela de controle indicando que a balança 5P34 mede a massa de finos classificada na peneira do forno, enquanto a 5P37 mede o retorno total do pelotamento

Os resultados medidos pelas balanças foram coletados com o software PROCESS EXPLORER, desenvolvido pela *Microsoft*. Para garantir a representatividade dos valores foram adotadas algumas premissas: média horária no período de 01/01/2018 a 24/12/2018. Nesse período todos os 7 discos estavam em funcionamento com alimentação de minério entre 125 a 135 t/h e configuração de abertura das peneiras com *undersize* em 9 mm e *oversize* em 16 mm.

O valor da vazão de retorno de peneira de rolos dos discos foi obtido pelo uso de um filtro de dados considerando os parâmetros citados, e posteriormente a subtração do retorno total pelo retorno da peneira único *deck* instalada na entrada do forno.

4.4 Preparação das simulações industriais com o método dos elementos discretos

As simulações usando o DEM foram realizadas com o propósito de quantificar a energia aplicada às pelotas e subsidiar o MDPV, permitindo compreender o nível de degradação sofrida pelas pelotas verdes desde sua produção no disco de pelotamento até a entrada do forno de endurecimento.

Para viabilizar as simulações, todo o caminho percorrido pelas pelotas, desde o disco até o forno de endurecimento deve ser representado em ambiente computacional de modo fiel à realidade e adequado às simulações. Por isso foi utilizada a técnica de

escaneamento a laser na usina de pelotização. Além disso, a realização de uma única simulação DEM que englobe todo o caminho das pelotas até o forno é inviável dada a grande dimensão do domínio de simulação requerido neste caso. Desta forma, tanto as simulações em DEM quanto as etapas de pós-processamento foram realizadas de forma segmentadas em simulações menores.

A presente seção reporta o procedimento de modelagem digital tridimensional de uma das linhas de produção da Usina 5, as estratégias das simulações DEM realizadas, bem como o pós-processamento das simulações. O desenvolvimento do modelo de degradação de pelotas verdes, bem como sua validação, é apresentado na seção 5.4.

4.4.1 Modelagem tridimensional da Usina 5

O objeto desta etapa foi a modelagem do processamento das operações de manuseio dentro da usina de pelotização 5, localizada na Unidade de Tubarão, Vale S.A. em Vitória/ES. O ambiente industrial foi mapeado digitalmente com a técnica de escaneamento a laser, gerando uma nuvem de pontos no espaço tridimensional, o que permite o detalhamento geométrico preciso de todas as etapas do processo. As informações sobre as dimensões dos equipamentos são relevantes e extremamente importantes para a simulação, pois elas são um dos fatores que definem as magnitudes das energias de impacto sofridas pelas pelotas verdes em cada etapa de manuseio e classificação.

4.4.2 Escaneamento dos equipamentos

O posicionamento do *scanner* no campo corresponde a uma cena onde é executada uma varredura de 360° e resulta na geração de uma nuvem de pontos, bem como um banco de imagens capturadas. O aparelho utilizado foi o FOCUS 70 (Figura 77), que é um equipamento portátil capaz de registrar estruturas complexas, instalações de produção e componentes de grande volume, apresentando resultados detalhados em varreduras de até 70 metros cada.



Figura 77 - Scanner Faro Focus 70 utilizado no escaneamento da estrutura da Usina 5

A distância para cada peça e a quantidade de cenas são definidas de acordo com a necessidade de se eliminar as áreas de sombra para capturar toda superfície do elemento principal, como também as possíveis interferências que venham impactar no sucesso do escaneamento. Na Figura 78 é exibida a sequência de operações envolvidas desde o escaneamento até as correções no *software Computer Aided Design (CAD)* executadas pela equipe da engenharia na Vale S.A.



Figura 78 - Esquema ilustrativo das operações envolvidas no escaneamento 3D

A primeira etapa de construção da geometria do pelotamento da Usina 5 foi o escaneamento a laser. Esse escaneamento teve como produto uma nuvem de pontos, registrada e colorida, gerando um arquivo único onde os pontos foram armazenados em coordenadas espaciais X, Y e Z (Figura 79).

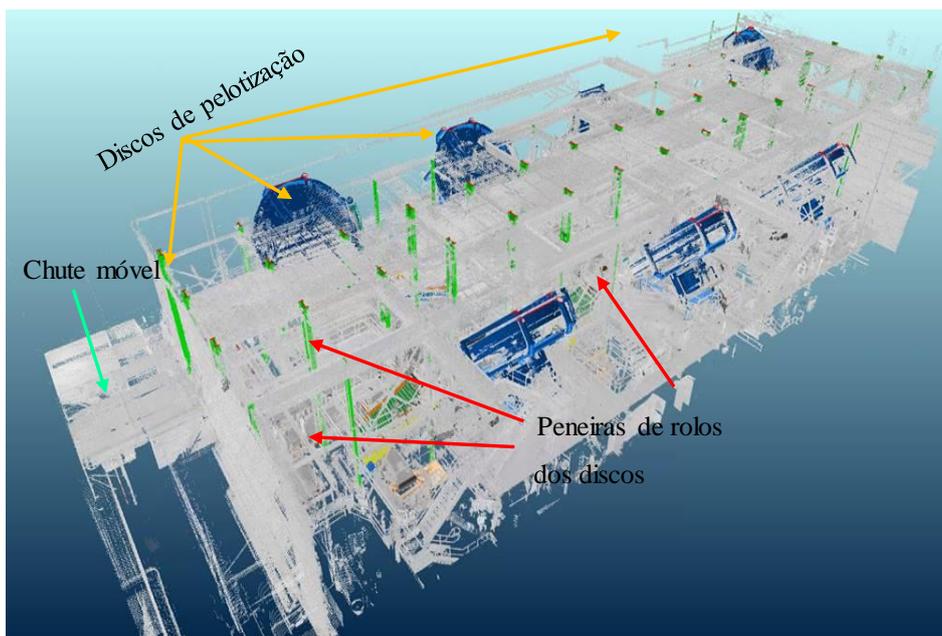


Figura 79 - Nuvem de pontos referente ao escaneamento do circuito de pelotamento da Usina 5

Após a obtenção da nuvem de pontos no escâner foi necessário o tratamento em CAD para obtenção da geometria que melhor se adequasse ao circuito (Figura 80). Nessa imagem pode-se observar com nitidez todo detalhamento do pelotamento da Usina 5 com todos os sete discos de pelotamento, peneiras de rolos e correias transportadoras até a chegada no forno de endurecimento.

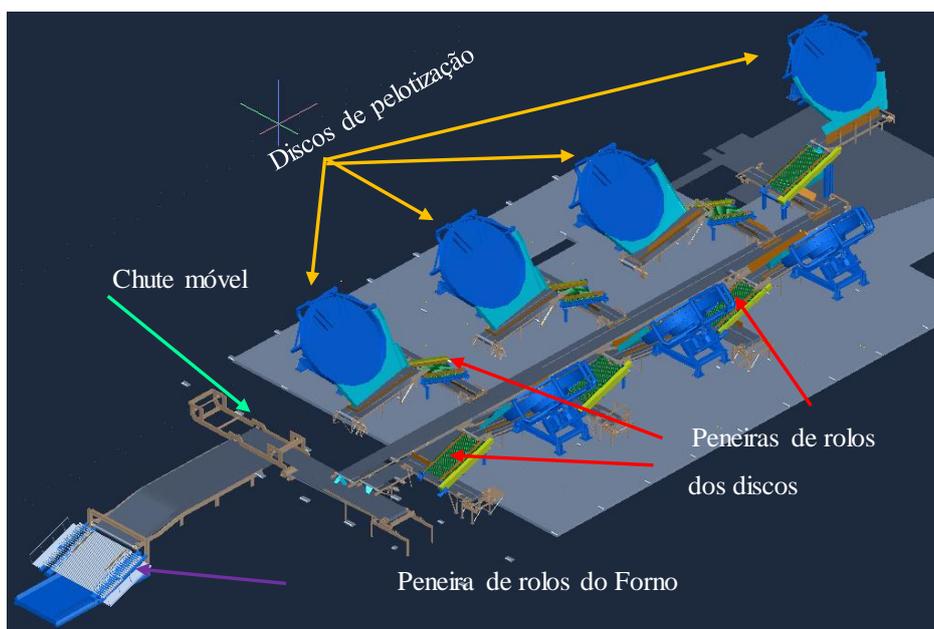


Figura 80 - Imagem dos principais equipamentos do pelotamento da Usina 5 após tratamento em CAD

A rota de manuseio e transporte de pelotas verdes escolhida foi a que a correia que recebe a produção do disco de pelotamento está próxima do forno de endurecimento (Figura 81). A correia 5P21 alimenta a peneira de rolos 5P22 que, por sua vez, descarrega o produto classificado *onsize* na correia 5P27. A correia 5P27 alimenta a correia 5P29 que recebe o produto de outros três discos da Usina 5. A correia 5P29 corre em paralelo à correia 5P28 e ambas alimentam a correia do chute móvel 5P30 (Figura 40). A correia do carro é encarregada de distribuir a carga de pelotas verdes de maneira uniforme ao longo dos 4 metros de largura da correia transportadora 5P31 (Figura 43) que alimenta a peneira de rolos na entrada do forno composta por um único *deck* com uma diferença de nível situada aproximadamente na parte central da peneira (Figura 82).



Figura 81 - Rota de manuseio e transporte das pelotas verdes ao saírem dos discos de pelotamento

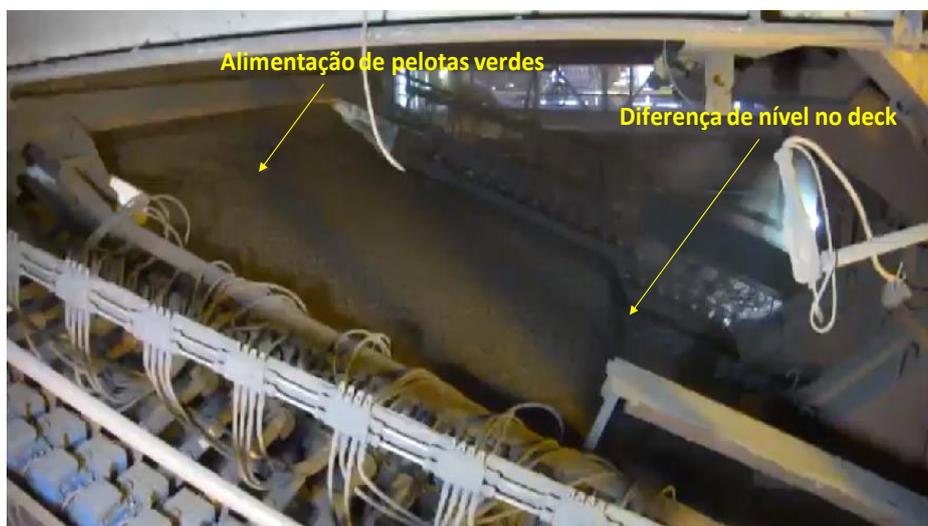


Figura 82 - Peneira de rolos na entrada no forno de endurecimento da Usina 5, com destaque para a alimentação de pelotas e para a diferença de nível no *deck*

No contexto deste projeto, apenas uma fração desse ambiente será simulado com o método dos elementos discretos, sendo esta fração equivalente à linha de produção de um único disco. As correias transportadoras que são parte da simulação são detalhadas, com seus códigos listados na Figura 83. Nesta figura também são exibidos os códigos das duas peneiras de rolos que fazem parte da simulação: a 5P22 e a 5P32.

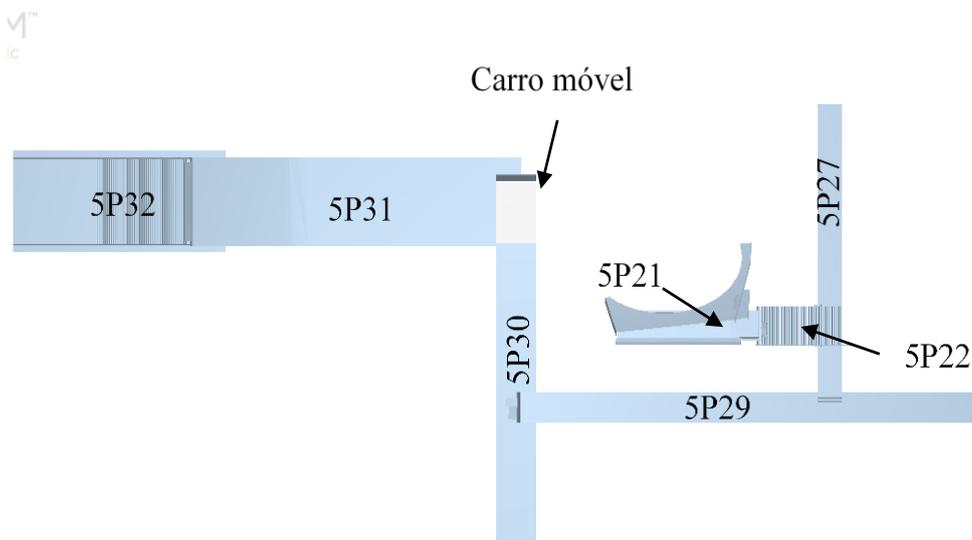


Figura 83 – Diagrama esquemático do sistema de manuseio de pelotas verdes partindo da correia do disco de pelotamento (5P21) até a peneira de rolos do forno (5P32)

4.4.3 Adequações nas geometrias após escaneamento

Uma vez traçada a rota de simulação das pelotas verdes, a geometria resultante do escaneamento a laser e ajustada no CAD (Figura 84), passou por adequações com a equipe de engenharia da Vale S.A., de modo a compatibilizar o modelo tridimensional com os requisitos necessários para as simulações DEM. O processo de adequação da geometria demandou algumas alterações até que uma descrição satisfatória fosse alcançada. Exemplos de adequações foram a remoção de elementos desnecessários nas simulações DEM, como os elementos estruturais da geometria da usina, correção de alinhamento com precisão da ordem de 0,1 mm entre as correias transportadoras, de modo a evitar a presença de quinas artificiais que poderiam afetar o movimento das pelotas verdes nas simulações. Em ambas as peneiras de rolos foi construída a configuração detalhada dos rolos, tendo em vista que o escaneamento tridimensional não possuía resolução suficiente para medir com precisão o espaçamento em os rolos dessas peneiras.

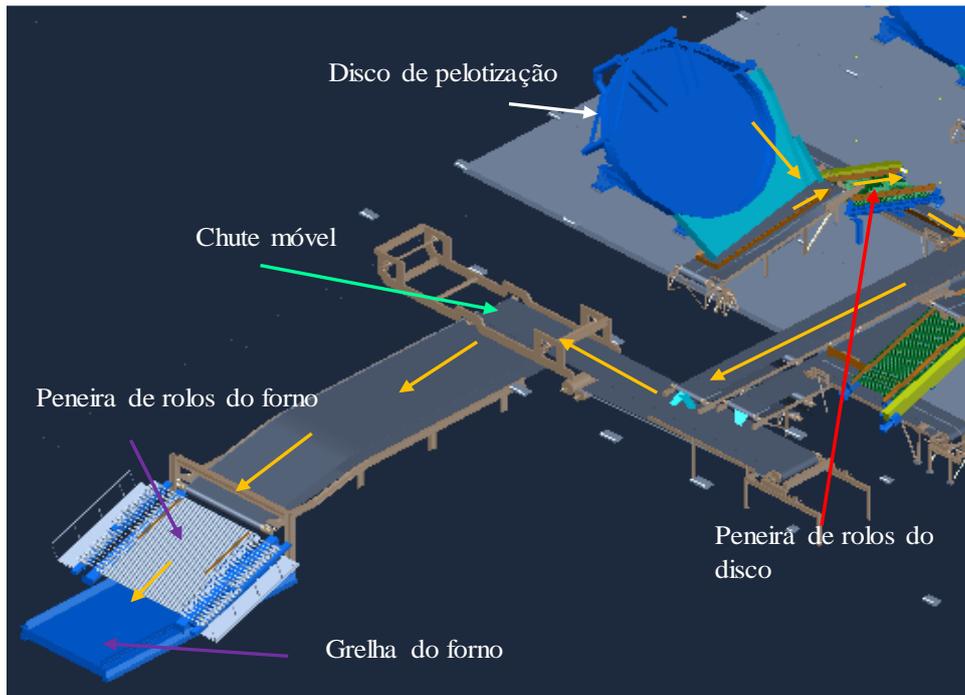


Figura 84 - Imagem em CAD da rota selecionada. As setas em amarelo indicam o caminho percorrido pelas pelotas verdes ao sair do disco

No retângulo superior da Figura 85 pode-se observar detalhes de alguns ajustes realizados na geometria oriunda do escaneamento tridimensional para as simulações em ambiente DEM. Os elementos geométricos destacados com a elipses estão posicionados a alguns centímetros acima da correia transportadora abaixo do disco de pelotamento. Na imagem da direita é possível visualizar esses elementos adicionados com o objetivo de reter as pelotas na correia transportadora durante as simulações DEM desta etapa do processo.

Adicionalmente, fez-se necessário inserir manualmente os rolos na peneira do disco, uma vez que a geometria não apresentava a configuração adequada para simulações DEM (Figura 85- retângulo inferior). Desta forma, foram implementadas as geometrias dos rolos conforme especificações de projeto, e ainda seguindo as recomendações de Silva *et al.* (2018) para configuração tridimensional das geometrias cilíndricas dos rolos.

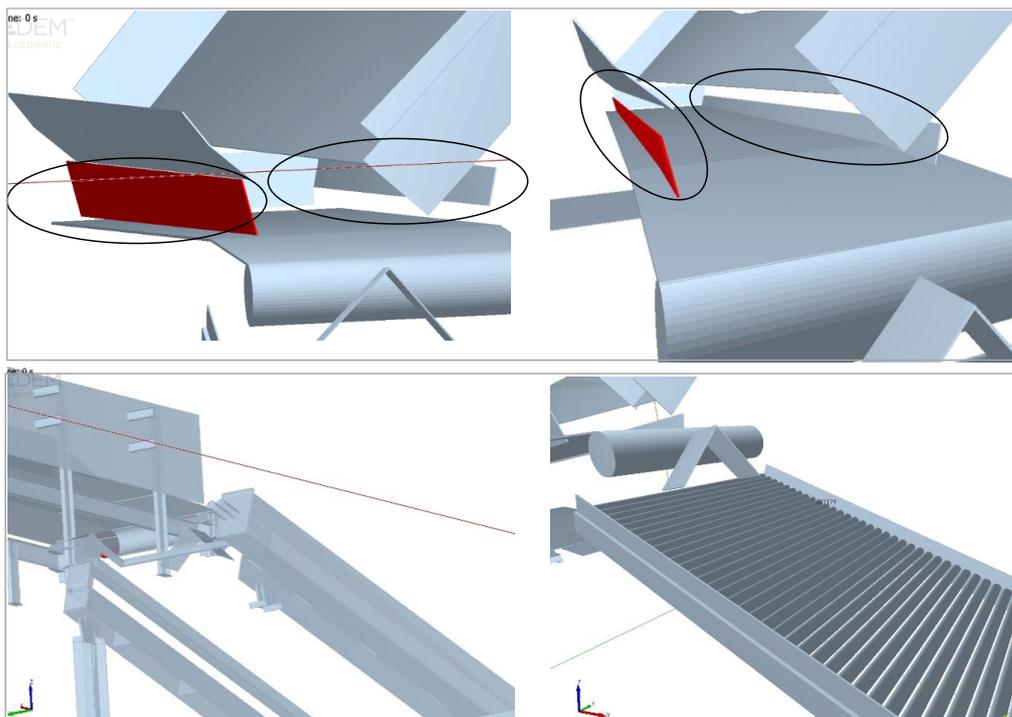


Figura 85 - Detalhes dos ajustes realizados na geometria implementada no EDEM: o retângulo superior mostra em vermelho os ajustes nos defletores, no retângulo abaixo a mesa da peneira com os rolos inseridos manualmente

A Figura 86 apresenta a geometria que contém somente a rota de manuseio das pelotas verdes, partindo da correia transportadora 5P21, já incorporada no simulador de elementos discretos EDEM. A figura mostra ainda a rota percorrida pelas pelotas desde a saída dos discos de pelotamento até a entrada no forno de endurecimento.

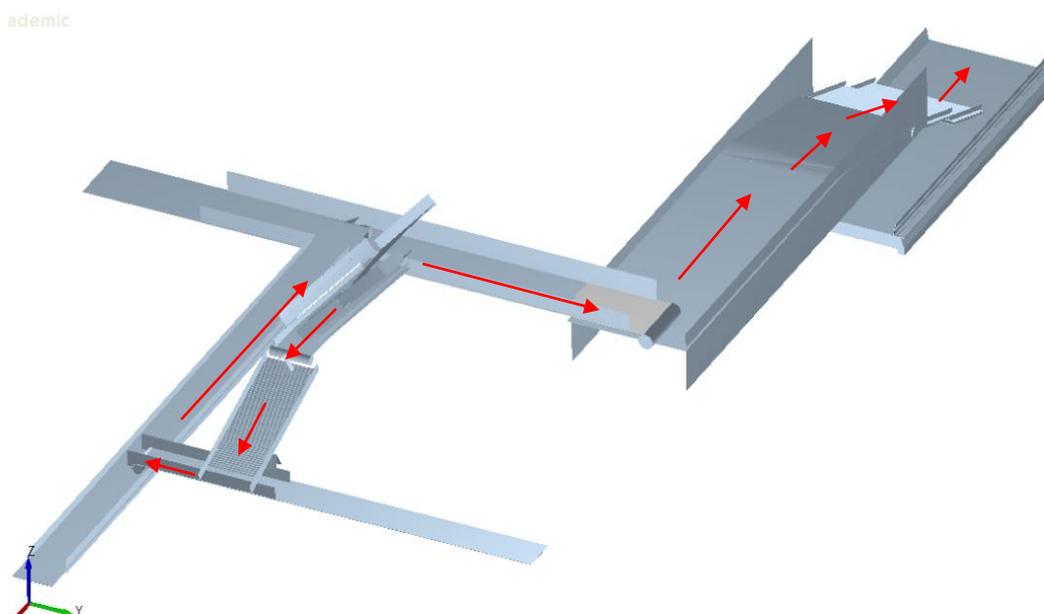


Figura 86 - Geometria selecionada para as simulações no EDEM, as setas em vermelho indicam o trajeto das pelotas verdes ao sair do disco até o forno

4.5 Parâmetros utilizados nas simulações com o DEM

Nesta seção são apresentados alguns parâmetros relevantes utilizados nas simulações DEM, tais como: distribuição granulométrica das pelotas, velocidade dos equipamentos que compõem o circuito, e simulações preliminares com múltiplas pelotas no degradômetro.

4.5.1 Granulometria das pelotas verdes

Para a realização das simulações DEM das etapas de manuseio na Usina 5, faz-se necessário especificar a distribuição de tamanhos de pelotas. Neste trabalho, foram consideradas duas distribuições granulométricas, sendo a primeira uma distribuição representativa do produto de um disco de pelotamento (Figura 87), a qual foi denominada “distribuição base”. Esta distribuição granulométrica foi especificada no DEM com o uso de 35 classes de tamanhos, ou seja, tamanho de esferas que representam as pelotas na simulação, sendo a maior pelota aquelas com diâmetro de 19,57 mm. O menor tamanho de pelota considerado foi de 5,88 mm. Conforme discutido em Silva *et al.* (2018), é necessário truncar a distribuição granulométrica em um diâmetro mínimo de partícula, pois caso partículas menores fossem utilizadas, as simulações DEM demandariam um número de partículas maior que 10 milhões, o que inviabilizaria a realização das simulações computacionais.

Uma segunda distribuição granulométrica de pelotas foi considerada para as simulações dos casos em que existe operação de classificação. Um exemplo é a granulometria das pelotas na correia transportadora 5P27, que recebe o produto *onsize* da peneira de rolos do disco. Neste fluxo de pelotas, partículas menores que 8 mm representam aproximadamente 1% da massa total transportada. Além disso, também não há presença de pelotas maiores que a abertura entre os rolos classificadores do *onsize*. Desta forma, considerou-se a granulometria denominada como distribuição classificada na Figura 87 para representar as operações de manuseio referentes às transferências da correia transportadora 5P27 para 5P29, denominada Queda 5 e da correia 5P29 para a correia 5P30, denominada Queda 6.

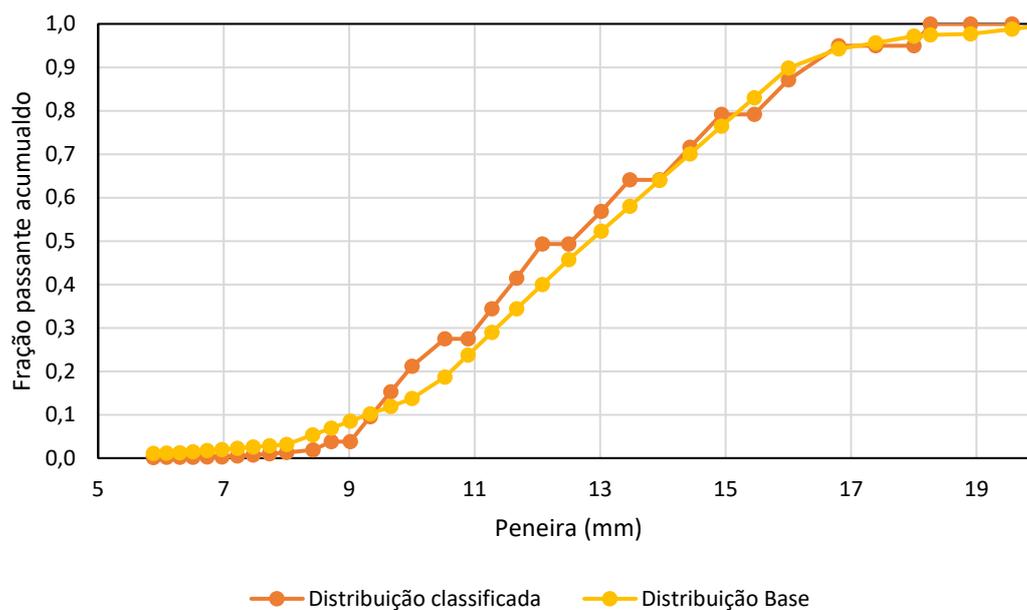


Figura 87 - Distribuições de tamanhos das pelotas verdes na saída dos disco (distribuição base) e após a classificação na peneira de rolos (distribuição classificada)

4.5.2 Parâmetros operacionais dos equipamentos

Na Tabela 5 e na Tabela 6 são apresentadas as configurações de velocidades das correias transportadoras e dos rolos que compõem a peneira de entrada no forno da Usina 5. Os parâmetros referentes às propriedades dos materiais que fazem parte do circuito de pelotas verdes utilizados nessa simulação constam na Tabela 10.

Tabela 5 - Velocidades de movimentação das correias transportadoras configuradas nas simulações DEM

Correia transportadora	Velocidade (m/s)
5P21	0,35
5P27	0,35
5P29	0,70
5P30	0,98
Chute móvel	0,62
5P31	0,11

Tabela 6 - Velocidades dos rolos das peneiras do disco e do forno simuladas no DEM

Equipamento	Descrição	Velocidade de rotação dos rolos (rpm)
Peneira de rolos 5P22	Peneira do disco	105
Peneira de rolos 5P32	Peneira do forno	105

4.5.3 Simulações do degradômetro

Foram realizadas duas simulações no ensaio do degradômetro para avaliação do comportamento de queda com múltiplas pelotas (Figura 88). Essas simulações foram realizadas para validação do MDPV, uma para cada altura de queda: 500 mm e 800 mm.

- Degradômetro 500 mm: Simulação da queda de 4 kg de pelotas verdes no dispositivo degradômetro de uma altura de 500 mm;
- Degradômetro 800 mm: Simulação da queda de 4 kg de pelotas verdes no dispositivo degradômetro de uma altura de 800 mm;

Na simulação do degradômetro foram utilizados os dados constantes na Tabela 7.

Tabela 7 - Detalhes das simulações realizadas para o degradômetro

Altura de queda (mm)	Distribuição granulométrica	Massa (kg)
500	60% (12,5 x9,0 mm) 40% (16,0 x12,5 mm)	4,0
800	60% (12,5 x9,0 mm) 40% (16,0 x12,5 mm)	4,0

Para fins de pós-processamento dos dados, desprezou-se a análise das colisões que dissiparam energias menores que 10^{-4} J. Esta magnitude energética, para pelotas com massa média de 3 g, equivale a uma energia específica de impacto de 0,03 J/kg, ou uma queda equivalente a uma altura de 3 mm. Nas simulações, para fins de simplicidade, o material atribuído às superfícies do tubo e da base plana foi equivalente à borracha e para tampa do tubo foi considerado aço. Um esquema das simulações do degradômetro é apresentado na Figura 88. As partículas foram introduzidas na simulação de forma a simular a alimentação de pelotas realizada pelo técnico no experimento na usina piloto. Desta forma, considerou-se uma velocidade inicial de criação igual a 0,1 m/s no sentido e direção da força gravitacional. O valor do passo de tempo utilizado nas simulações foi igual a 5% do tempo de Rayleigh, sendo este valor o mesmo adotado para as simulações DEM do circuito industrial.

No pós-processamento de simulações do degradômetro foram considerados

também os impactos das pelotas no tubo de alimentação. A remoção da tampa ocorreu após 1,5 segundos de simulação, ou seja, após todas as partículas terem sido alimentadas e alcançado o repouso no interior do tubo.

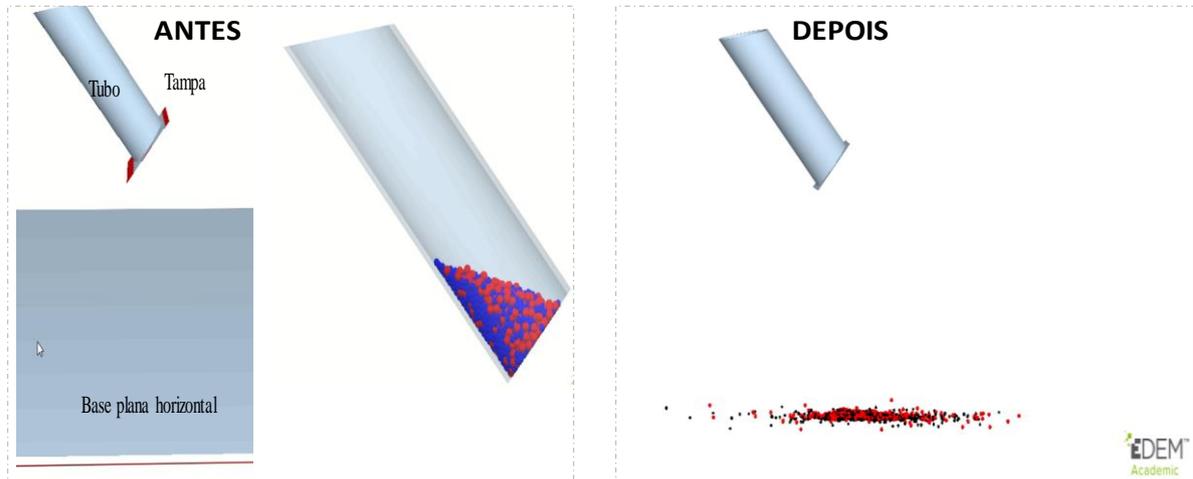


Figura 88 - Esquema da simulação do degradômetro com DEM: as partículas em azul são pelotas com tamanhos entre 10-12,5 e em vermelho de 12,5-16 mm

As colisões detectadas durante a alimentação das pelotas no tubo do degradômetro foram desconsideradas, tendo em vista que, durante o experimento real, tomou-se o cuidado de introduzir as pelotas cuidadosamente no tubo.

4.6 Configurações de circuitos simulados

Na Figura 89 são exibidos os pontos de interesse para as simulações com o DEM e que estão numerados como Quedas de 1 até 10. As quedas numeradas indicam impactos que serão avaliados quanto à energia aplicada às pelotas verdes. Os retângulos tracejados em azul representam as simulações DEM que foram realizadas.

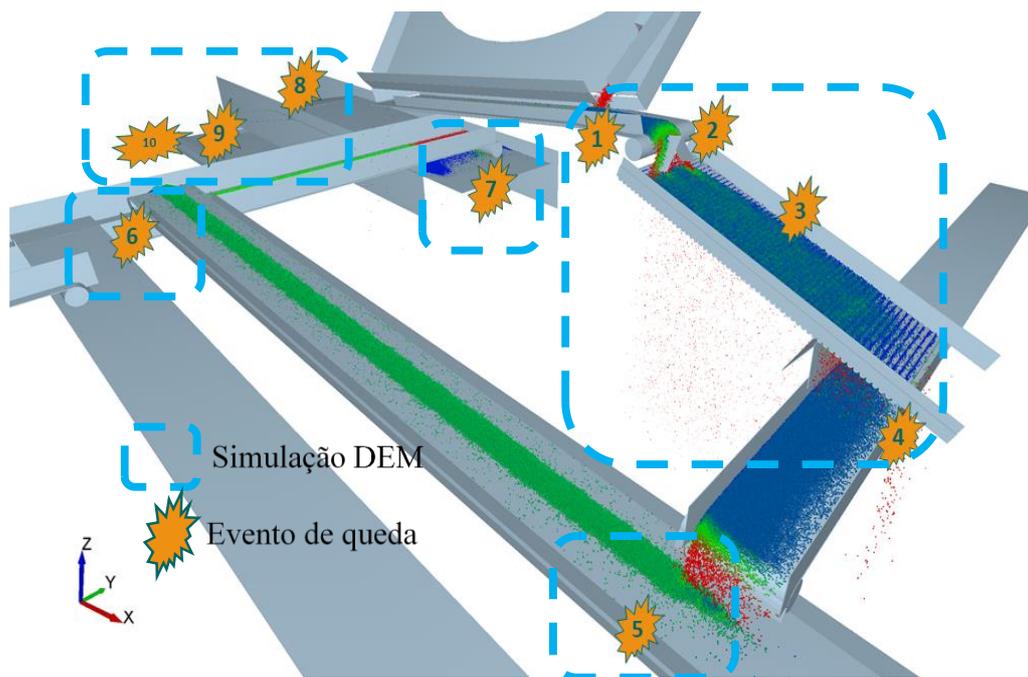


Figura 89 - Representação das quedas analisadas no circuito de pelotamento da Usina 5 e os grupos de simulações DEM

Caso 1 – **Avaliação de parâmetros**: Simulação em uma das linhas de produção da Usina 5, a partir da descarga do disco de pelotamento sobre a correia 5P21 até o chute móvel (correia 5P30). Realizada para testar a geometria implementada no DEM e gerar a distribuição classificada (seção 4.5.1).

Caso 2 - **Peneira de rolos do disco**: Simulação englobando as quedas de 1 até 4. Essa etapa contempla a descarga do disco de pelotamento na correia transportadora 5P21, os choques na “Asa delta”, o transporte sobre a peneira de rolos e a queda das pelotas produto (*onsize*) sobre a correia transportadora 5P27.

Casos 3 e 4 - **Quedas 5 e 6**: Simulações das quinta e sexta quedas, que ocorrem na transferência da correia transportadora 5P27 para a 5P29 e em sequência para correia 5P30 (chute móvel).

Caso 5 - **Queda 7**: Simulação da sétima queda, que corresponde à queda do chute móvel para a correia transportadora 5P31 que alimenta a peneira de rolos na entrada do forno de endurecimento.

Caso 6 - **Peneira de rolos de único deck**: Simulação englobando as quedas 8 até 10, a partir da correia transportadora 5P31, com quedas sobre a peneira do forno, até a queda final do produto do final da peneira nos carros de grelha do forno de endurecimento.

Caso 7 - **Peneira de rolos de duplo *deck***: Simulação da eficiência de classificação da peneira de duplo *deck* instalada atualmente na Usina 6 da Vale S.A. em Vitória/ES.

Caso 8 - **Usina 5 na configuração sem peneira**: Simulação de uma configuração alternativa da Usina 5, onde a peneira de rolos na saída do disco foi substituída por correia transportadora. Esta simulação equivale às quedas 1 a 5, dos casos 2 e 3, ou seja, da correia transportadora 5P21 à 5P29. O detalhamento dos casos 1 a 8 serão apresentados nas seções 4.6.1 a 4.6.8.

Em cada uma dessas simulações, uma quantidade de pelotas verdes foi selecionada para o rastreamento de suas colisões. São as informações dos choques sofridos por essas pelotas, sejam entre as próprias pelotas ou delas com as superfícies de equipamentos e correias transportadora, que são pós-processados para posterior no MDPV. Nesses casos, a quantidade de informação gerada pela simulação pode chegar da ordem de centenas de *gigabytes*.

4.6.1 Simulação para avaliação de parâmetros (Caso 1)

Essa simulação, além de testar a geometria implementada no DEM, foi utilizada para registrar o movimento do chute móvel (5P30) e ainda gerar uma distribuição granulométrica de partículas classificadas no *onsize* (Figura 90), chamada de distribuição classificada, para simulações das quedas 5 e 6 (Casos 3 e 4 respectivamente). Uma imagem da simulação restrita ao disco de pelotamento até a saída das pelotas classificada na peneira de rolos, pode ser vista na Figura 91 (Caso 2).

A taxa de alimentação de pelotas utilizada na criação de partículas foi 130 t/h. Esse valor representa uma taxa de produção do disco média da condição de operação que fica entre 125 t/h e 135 t/h. A distribuição granulométrica utilizada nesta simulação foi a distribuição base apresentada na Figura 87.

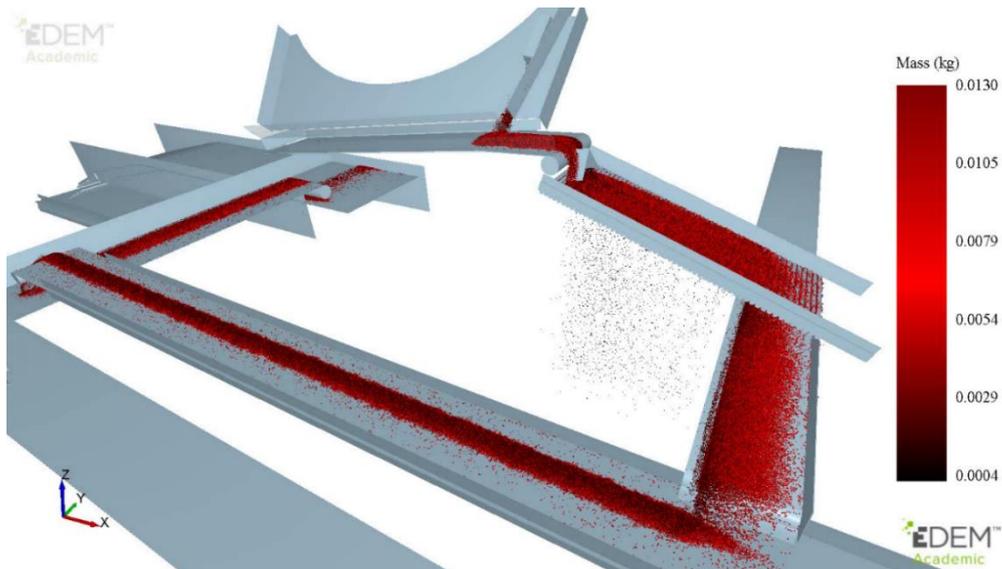


Figura 90 - Simulação da Usina 5, do disco até a alimentação da peneira do forno, as partículas em preto são aquelas de menor diâmetro

4.6.2 Simulação da peneira do disco (Caso 2)

Essa simulação teve início na descarga do disco de pelotamento com a queda das pelotas sobre a correia 5P21 e é finalizada com a descarga do *onsize* na correia transportadora 5P27. A taxa de alimentação utilizada foi 130 t/h e a velocidade de rotação dos rolos foi 105 rpm.

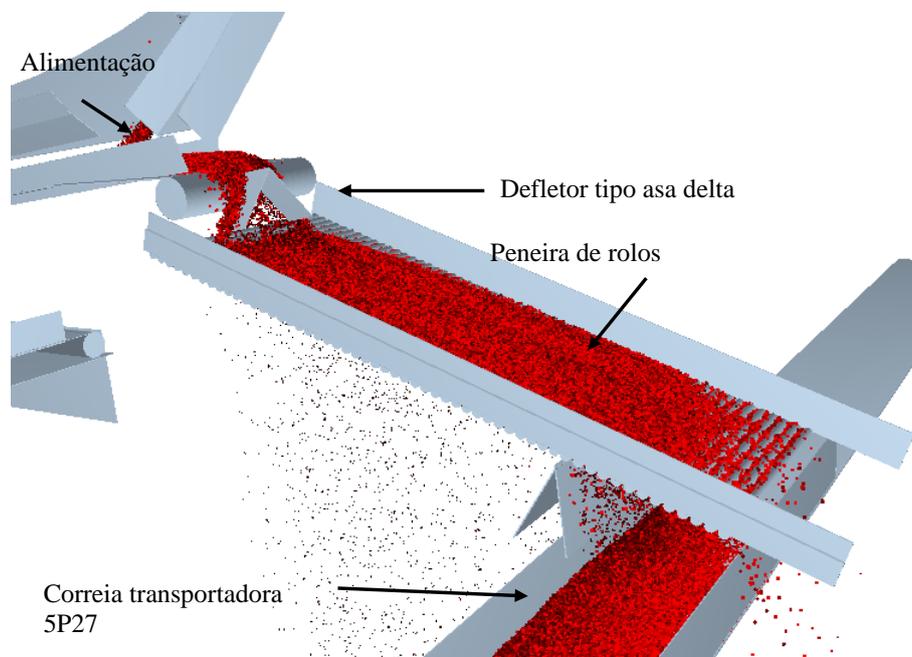


Figura 91 - Imagem da simulação do Caso 2 em regime permanente

Uma vez que o regime permanente foi alcançado, ativou-se o rastreamento de colisões das partículas no sistema. Além disso, realizou-se o balanço de massas da peneira

de rolos, registrando-se os fluxos e granulometrias de alimentação da peneira, *onsize*, *undersize* e *oversize*.

A recuperação de pelotas para o *onsize* foi representada na forma de curva de partição. Esta curva deu origem à distribuição denominada “classificada” e que foi apresentada na seção 4.5.1, usada nas simulações das quedas 5 e 6 (Casos 3 e 4). Além disso, ao calcular a degradação usando o MDPV, fez-se uso desta curva de partição para estimar o percentual de pelotas sobreviventes que reportará às etapas seguintes à correia que transporta o *onsize* para as etapas subsequentes.

4.6.3 Simulações das quedas 5 e 6 (Casos 3 e 4)

A simulação do primeiro ponto de transferência entre correias transportadores, denominada de Queda 5 (Figura 92), foi realizada com a distribuição granulométrica classificada, ou seja, com características de produto *onsize*.

Esta simulação foi criada a partir da simulação (Caso 1), onde o fluxo de pelotas passando pela correia 5P27 foi selecionado. Isso evitou que se utilizasse o recurso de criação de partículas (fábrica) na simulação DEM que pode aumentar o tempo necessário para execução da simulação.

A Figura 93 mostra a simulação do segundo ponto de transferência após a classificação das pelotas, denominada de Queda 6. Ela foi realizada considerando a distribuição granulométrica classificada (*onsize*) e, assim como no Caso 3, também foi originada a partir da simulação do Caso 1.

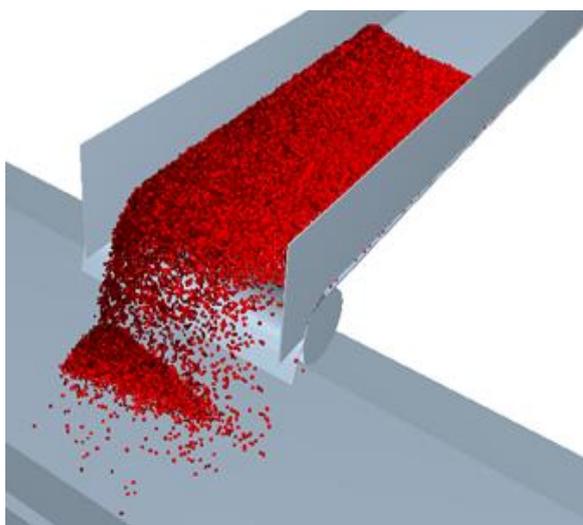


Figura 92 - Simulação da Queda 5, realizada a partir da descarga da peneira do disco

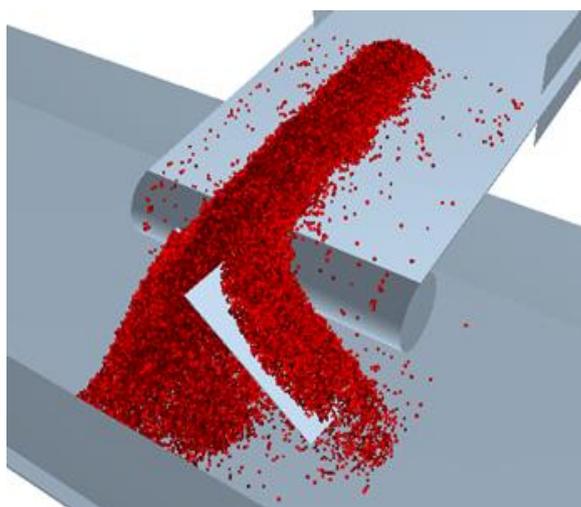


Figura 93 - Simulação da Queda 6, realizada a partir da correia

4.6.4 Simulação da correia móvel (Caso 5)

A simulação da correia móvel 5P30 que alimenta a correia 5P31 foi realizada considerando a movimentação periódica dela. A amplitude do movimento considerada para a correia foi de 3,6 metros, sendo suas posições relativas à largura da correia 5P31 iniciais e finais em 0,2 metros e 3,8 metros. O período do movimento é de 0,216 minutos e a velocidade de movimentação 37 m/min (Figura 94).

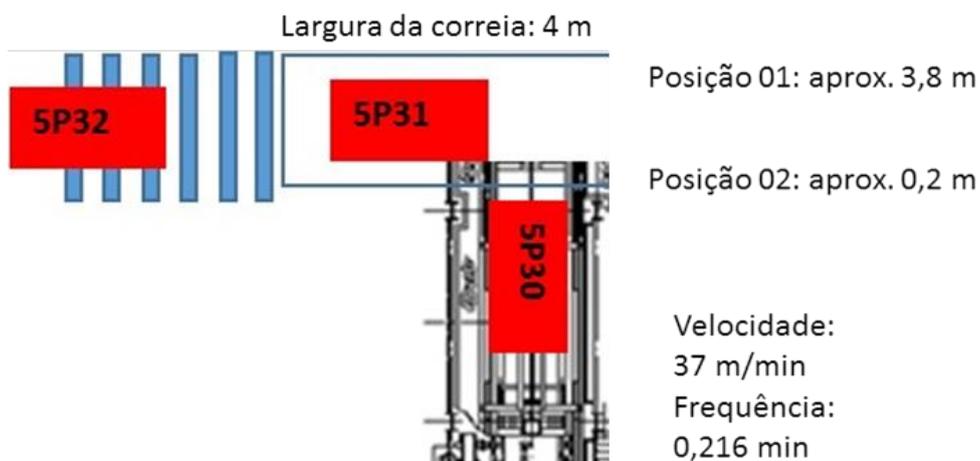


Figura 94 - Dados para a dinâmica do chute móvel (5P30)

Foi implementada uma dinâmica no DEM de modo a reproduzir a movimentação real da correia em seu estado realístico.

A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados para descrever a translação do chute móvel durante o abastecimento da correia subsequente. Por se tratar de um sistema contínuo os movimentos a seguir são repetições dos dois últimos dentro do período de movimento.

Tabela 8 - Parâmetros de movimentação do chute móvel

Amplitude do movimento do carro (m)	3,60
Velocidade da Correia (m/s)	1,00
Início do avanço (s)	0,00
Fim do avanço (s)	5,40
Delta	5,40
Início do retorno (s)	5,50
Fim do retorno (s)	10,90
Delta	5,40
Velocidade do movimento do carro (m/s)	0,65
Período para os movimentos (s)	11,00

A configuração dos movimentos relativos de ida e volta utilizados no EDEM são apresentados na Tabela 9. Percebe-se que o movimento *Moving plane* (correia 5P30) foi alterado entre a ida e a volta do chute móvel. Esse artifício foi utilizado para atingir o nivelamento de carga na correia subsequente (5P31) (Figura 95).

Tabela 9 - Movimentos aplicados no EDEM relativos à velocidade de movimento do chute móvel

Ida	
Translação linear (m/s)	0,655
Velocidade do plano em movimento (m/s)	0,345
Volta	
Translação linear (m/s)	-0,655
Velocidade do plano em movimento (m/s)	1,655

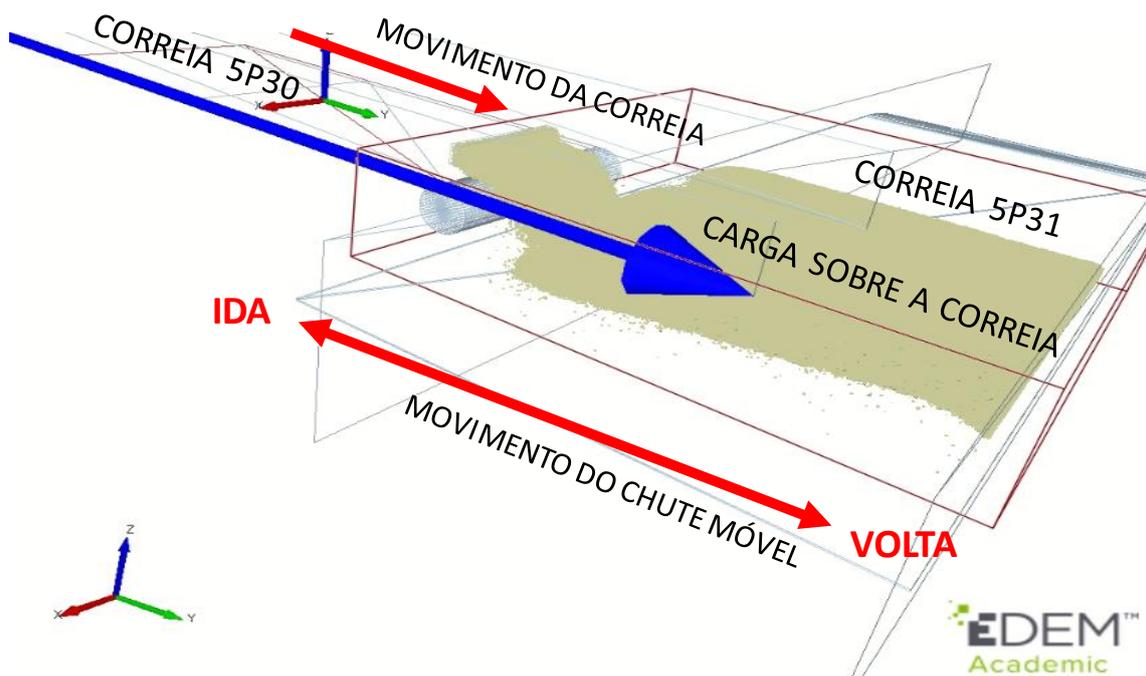


Figura 95 - As setas vermelhas indicam a direção de movimento do chute móvel e da correia 5P30. O perfil de carga na 5P31 é o resultado dos movimentos oscilatórios do conjunto correia-chute

Como exemplo, tem-se uma imagem da simulação do chute móvel na Figura 96, que apresenta as pelotas coloridas em função do seu tempo de residência, contabilizado a partir de sua geração na simulação. As partículas vermelhas são aquelas alimentadas inicialmente, enquanto as azuis as recém-criadas na simulação. É possível observar o perfil ondulado do leito de pelotas formado na correia 5P31 que as encaminha para a

peneira da entrada do forno de endurecimento (5P32). Nesta simulação o rastreamento de colisões foi acionado, uma vez que o fluxo de pelotas na correia 5P31 entrou em regime permanente. A taxa de alimentação nesta simulação representa toda a produção gerada de pelotas nos 7 discos da Usina 5 e a distribuição granulométrica utilizada foi a distribuição base.

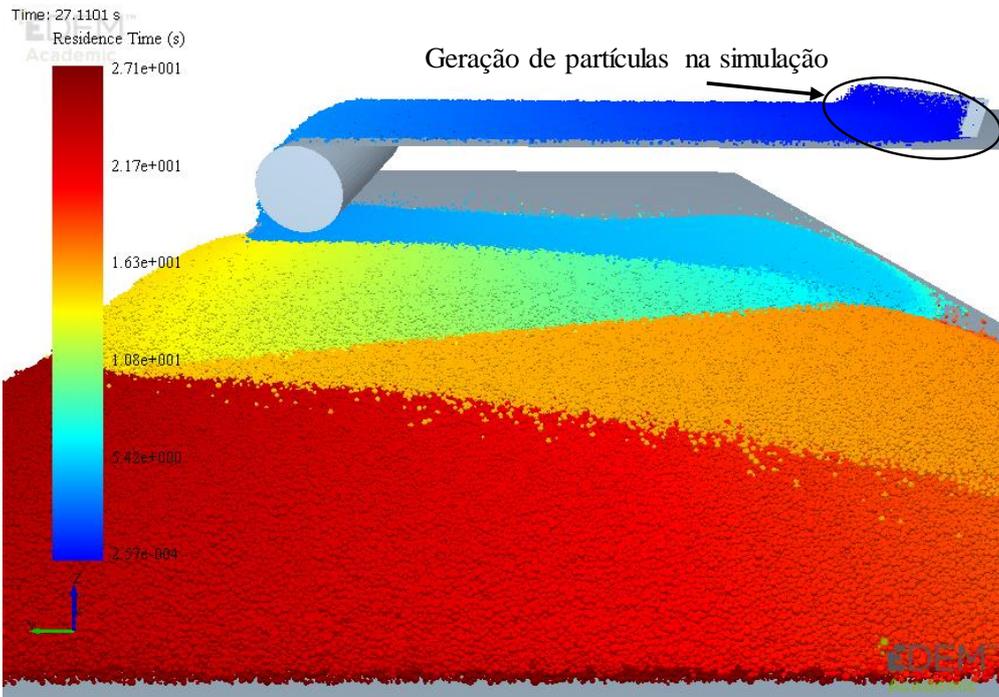


Figura 96 - Simulação do chute móvel mostrando o tempo de residência das partículas. Em detalhe a fábrica de partículas

4.6.5 Simulação da peneira único *deck* do forno (caso 6)

A simulação da peneira do forno (5P32) foi realizada visando o rastreamento de energias de colisão e demandou a adoção de algumas simplificações para garantir sua realização. Dado o tamanho do domínio de simulação, principalmente no que diz respeito à largura da peneira, igual a 4 metros de comprimento dos rolos, o número de pelotas verdes demandado para ocupar todo o volume sobre os rolos inviabilizaria a execução da simulação. Neste caso adotou-se uma solução comum em simulações DEM de sistemas que apresentam simetria para reduzir o volume do domínio de simulação, como adotado na modelagem da peneira de rolos por Silva *et al.* (2018). Para a execução desta simulação foi selecionada uma região central com 40 cm de largura da peneira, sendo o fluxo de pelotas restrito a esta faixa com o uso de placas virtuais com coeficientes de atrito próximos a zero. Neste caso, como foi simulado um domínio dez vezes menor, a taxa de

alimentação das pelotas verdes foi definida como 1/10 da taxa real de alimentação desta peneira (Figura 97).

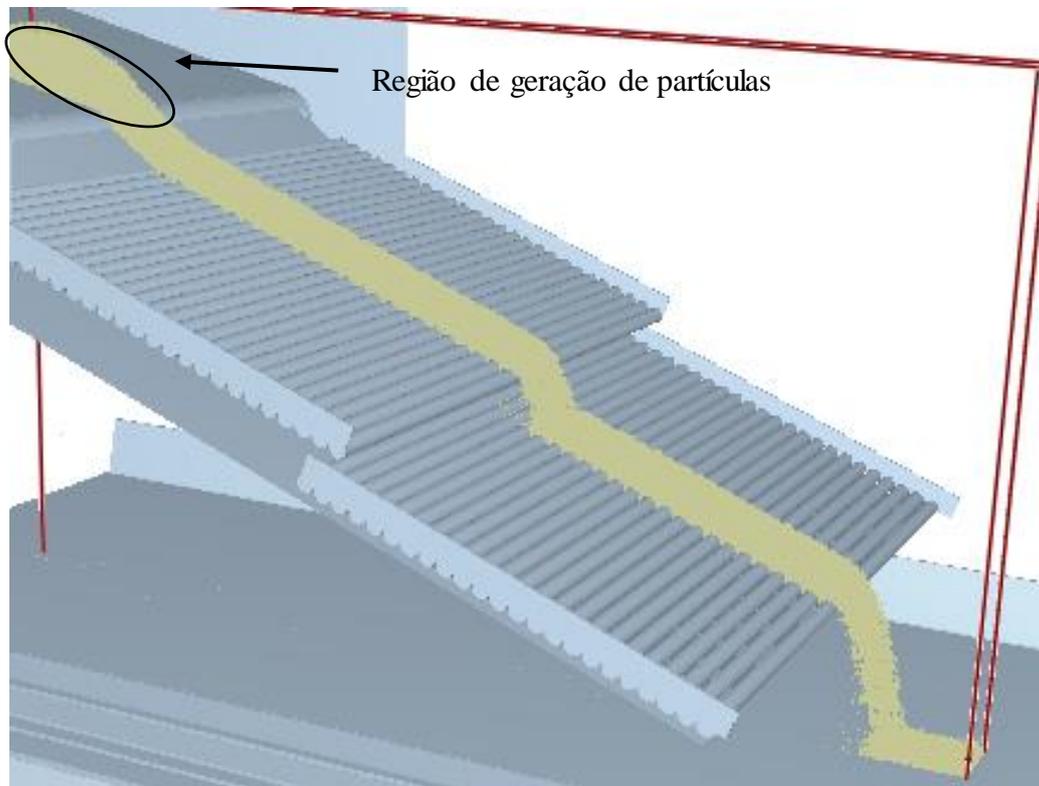


Figura 97 - Simulação da peneira único *deck* do forno da Usina 5

4.6.6 Simulação da peneira duplo *deck* do forno (Caso 7)

No caso de uma eventual substituição da peneira do disco de pelotamento, haveria a necessidade da remoção das pelotas com tamanhos acima do recomendado, bem como dos finos, antes da alimentação ao forno de endurecimento. Desta forma, a utilização da peneira da entrada do forno atualmente em operação na Usina 5, que foi simulada no Caso 6 (seção 4.6.5), não seria recomendada, visto que ela não possui a capacidade de remoção de pelotas *oversize*. Sendo assim, optou-se por simular uma peneira do tipo duplo *deck*. A Vale possui em Vitória/ES, uma peneira desse tipo em operação na usina de número 6. O *deck* superior desta peneira é constituído de 37 rolos com espaçamentos iguais a 17 mm. O segundo *deck* possui 49 rolos, cujos espaçamentos são de 9 mm. Em ambos os *decks* o primeiro espaçamento entre rolos é de 2 mm. Os ângulos do primeiro e segundo *decks* são respectivamente, 15,0° e 19,3°.

A simulação desta peneira foi realizada a uma taxa de alimentação de 910,1 t/h, ou seja, contemplando a capacidade de produção mássica dos 7 discos da Usina 5. Neste

caso, optou-se por realizar duas simulações, uma das quais contemplando toda a largura da peneira para avaliação do balanço de massas. Outra simulação foi realizada considerando uma seção de 50 cm de largura da peneira (Figura 98) e com taxa de alimentação igual a 1/8 do total a fim de realizar o rastreamento de colisões para posterior utilização com o modelo de degradação de pelotas verdes.

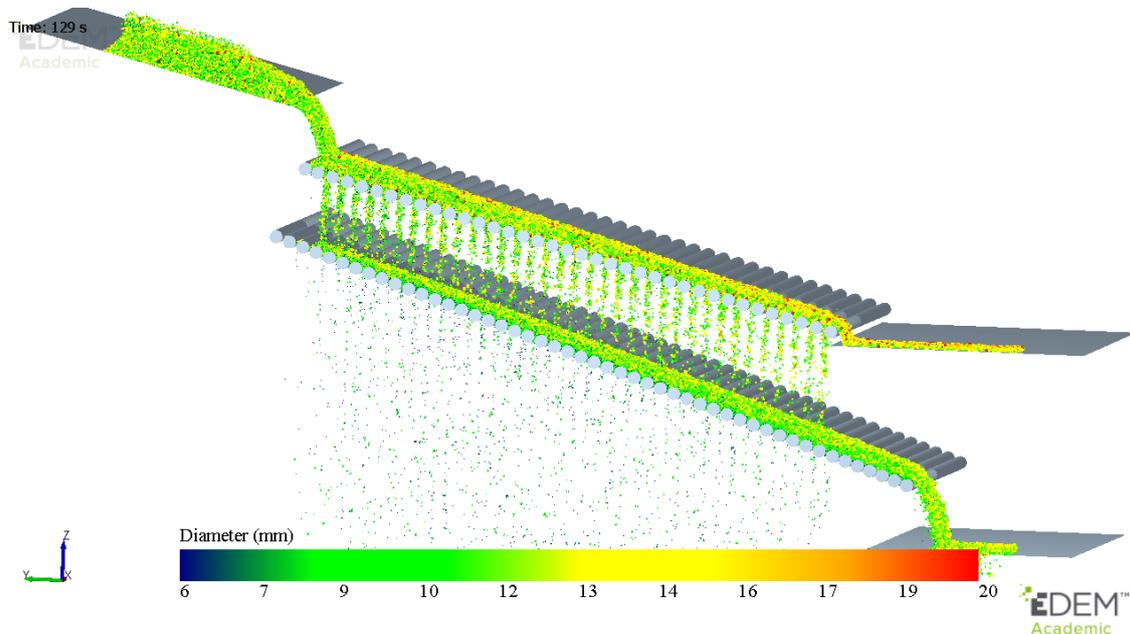


Figura 98 - Simulação DEM de uma fatia de 50 cm de largura da peneira duplo deck da Usina 6 visando o rastreamento de colisões

4.6.7 Simulação do sistema de manuseio sem peneira de rolos na saída do disco (caso 8)

Foi proposta a realização da simulação que contempla a descarga do produto do disco sobre a correia 5P21 até a correia 5P29, substituindo-se a peneira de rolos na saída dos discos por um sistema de correias transportadoras. Assim, a simulação DEM do caso 8 equivale às quedas 1 a 5, ou Casos de simulação 2 e 3.

Como este cenário de substituição da peneira de rolos não existe na realidade operacional da Usina 5, fez-se necessário o projeto de uma nova geometria para o sistema de manuseio das pelotas verdes da correia 5P21 até a correia transportadora 5P29, representando o caso hipotético, porém possível de ser implantado. Estas duas correias transportadoras impuseram restrições à construção da nova geometria, pois seriam mantidas em suas posições originais na Usina 5.

A Figura 99 apresenta uma comparação visual em três dimensões das geometrias do sistema de manuseio da Usina 5, original em amarelo, sobreposto ao sistema sem a

peneira de rolos proposto neste estudo de caso 8 (em azul). Do ponto de vista de manuseio, a principal diferença ao se remover a peneira de rolos, além da presença de finos no fluxo de material que é encaminhado à peneira do forno, encontra-se ainda ausente uma queda de uma altura significativa do material classificado no *onsize*. Essa é uma queda de uma altura de 50 cm a 80 cm que pelotas *onsize* sofrem sobre a correia transportadora 5P27 atualmente em operação na Usina 5. No sistema sem peneira de rolos na saída do disco, essa diferença de altura seria reduzida com o uso de uma rampa e de uma correia inclinada.

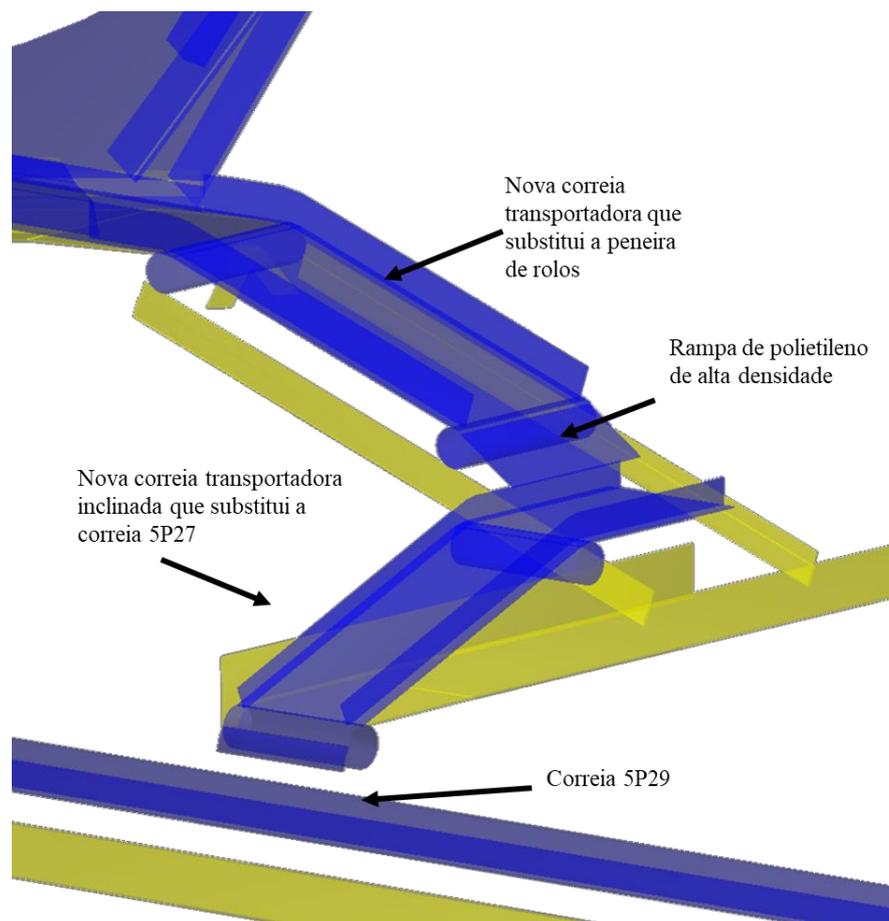


Figura 99 - Sobreposição das geometrias do sistema de manuseio da Usina 5. Original em amarelo; sem a peneira de rolos proposto neste estudo de caso 8, em azul

Uma imagem segmentada da simulação do caso 8, mostrando os pontos de 1 a 5 analisados, é apresentada na Figura 100.

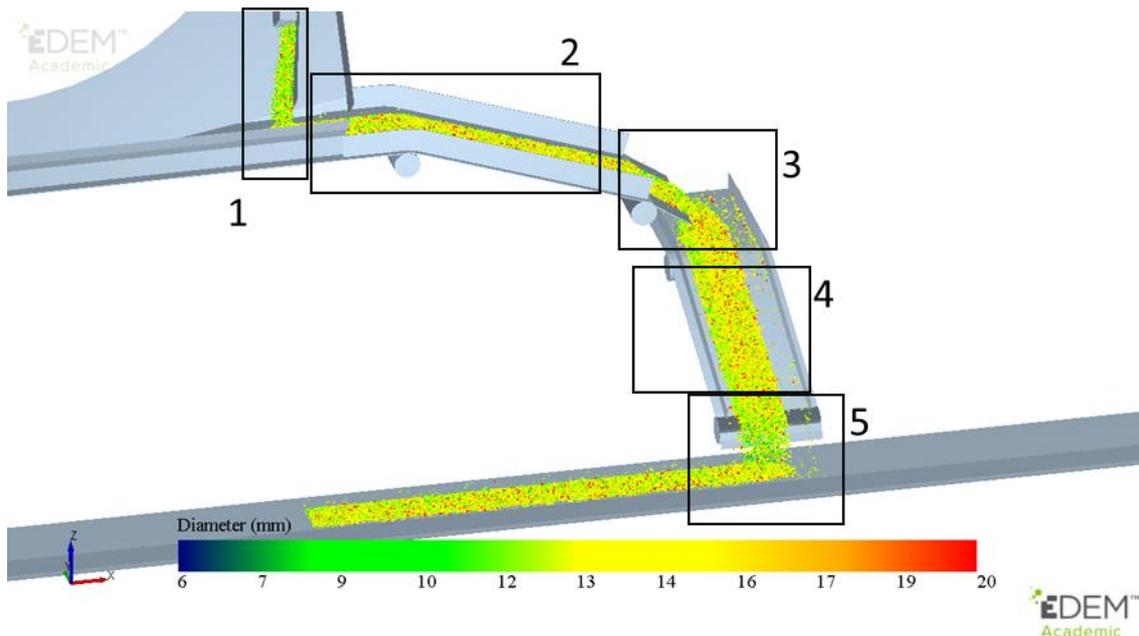


Figura 100 - Simulação sem peneira de rolos após o disco para avaliação da degradação. Os retângulos numerados indicam as regiões de análises das quedas equivalentes

4.6.8 Rotas simuladas com o MDPV

Nas simulações da degradação de pelotas verdes usando o MDPV, a rota de manuseio das pelotas verdes pode ou não incluir a utilização de peneira de rolos na saída do disco e na entrada do forno.

A seguir são apresentados mais detalhes dos estudos de casos realizados por meio de simulações no EDEM:

- Caso BM01: Circuito de pelotamento do caso atual da Usina 5, com peneira de rolos na saída dos discos (*undersize* 9 mm e *oversize* 16 mm), e uma peneira de único *deck* na entrada do forno com *undersize* em 9 mm;
- Caso BM02: Circuito de pelotamento modificado, com peneira de rolos na saída dos discos (*undersize* 9 mm e *oversize* 16 mm) e uma peneira de duplo *deck* na entrada do forno com *undersize* em 9 mm e *oversize* em 16 mm;
- Caso BM03: Circuito de pelotamento modificado, com peneira de rolos na saída dos discos (*undersize* 9 mm e *oversize* 16 mm) e uma peneira de duplo *deck* na entrada do forno (*undersize* com 9,3 mm e *oversize* com 16 mm);
- Caso BM04: Circuito de pelotamento modificado, sem a peneira de rolos na saída dos discos, e com uma peneira de único *deck* na entrada do forno com *undersize* em 9 mm;

- Caso BM05: Circuito de pelotamento modificado, sem a peneira de rolos na saída dos discos e uma peneira de duplo *deck* na entrada do forno (*undersize* com 9 mm e *oversize* com 16 mm);
- Caso BM06: Circuito de pelotamento modificado, sem a peneira de rolos na saída dos discos e uma peneira de duplo *deck* na entrada do forno (*undersize* com 9,3 mm e *oversize* com 16 mm).

4.7 Pós-processamento das simulações DEM

No EDEM os arquivos das simulações precisam ser extraídos para serem analisados. Após extraídos, os arquivos precisam ser processados para um formato de leitura para o programa Matlab[®]. Nesse programa são construídas as rotinas que serão utilizadas para o desenvolvimento do MDPV.

O pós-processamento demanda que dois tipos de arquivos sejam extraídos das simulações. O primeiro contém informações de todas as posições de todas as partículas na simulação. Esses dados são relacionados com cada partícula pelo seu número de identificação. Também são extraídos os valores de diâmetro e massa de cada partícula e os dados referentes às colisões, sendo possível identificar os elementos envolvidos em cada colisão durante o período de extração. Em um evento de colisão no DEM, a energia dissipada é calculada em função do balanço de forças normal e tangencial. Desta forma, na extração dos dados de colisão, é possível identificar a natureza do contato, seja ele predominantemente cisalhante ou normal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Verificação dos parâmetros de contato

Uma comparação visual entre uma imagem do experimento e uma simulação computacional com o método dos elementos discretos é apresentada na Figura 101. A Figura 101a apresenta a imagem do experimento, que mostra pelotas rolando sobre a superfície da peneira rotativa, sendo que durante o movimento algumas pelotas chegam a atingir a posição de 0° em relação ao centro da peneira. Comportamento semelhante foi observado na simulação DEM, mostrada na Figura 101b. Isso indica que a escolha dos parâmetros para a simulação DEM se mostrou adequada.

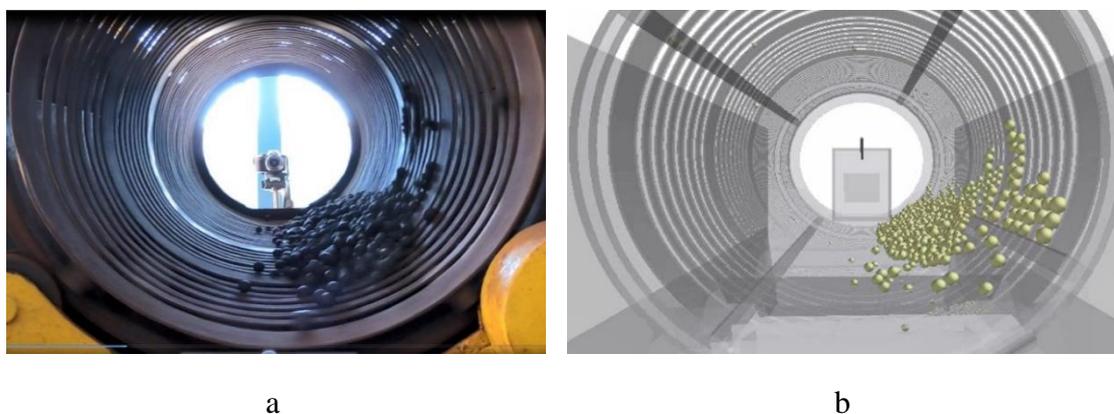


Figura 101 - Imagens comparativas das simulações com ensaios executados na planta piloto Vale S.A.

É importante ressaltar que, após a realização desse ensaio para aferição dos parâmetros, o coeficiente de restituição pelota-borracha foi ajustado para 0,10 (Tabela 10) diferente do resultado de 0,05 citado por Silva *et al.* (2018) (Tabela 4).

Tabela 10 - Parâmetros dos materiais e dos modelos de contato usados nas simulações DEM com o coeficiente de restituição pelota-borracha corrigido

Parâmetro	Pelota verde	Aço	Borracha
Razão de Poisson	0,25	0,25	0,25
Módulo de cisalhamento (Pa)	$1,8 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^7$
Densidade (kg/m ³)	3150	7800	860
Interação	Pelota-Pelota	Pelota-Aço	Pelota-Borracha
Coeficiente de restituição	0,10	0,10	0,10
Coeficiente de atrito estático	0,30	0,35	0,71
Coeficiente de atrito de rolamento	0,10	0,25	0,05
Energia específica de coesão (J/m ²)	1,50	0,50	0,50

5.2 Balanços de massa simulados desconsiderando a degradação das pelotas

5.2.1 Peneira de rolos na saída do disco

Da análise dos fluxos mássicos em torno da peneira na simulação do Caso 2 foi possível calcular a eficiência desta etapa de peneiramento para as condições operacionais reportadas na seção 4.6.2 (Figura 102).

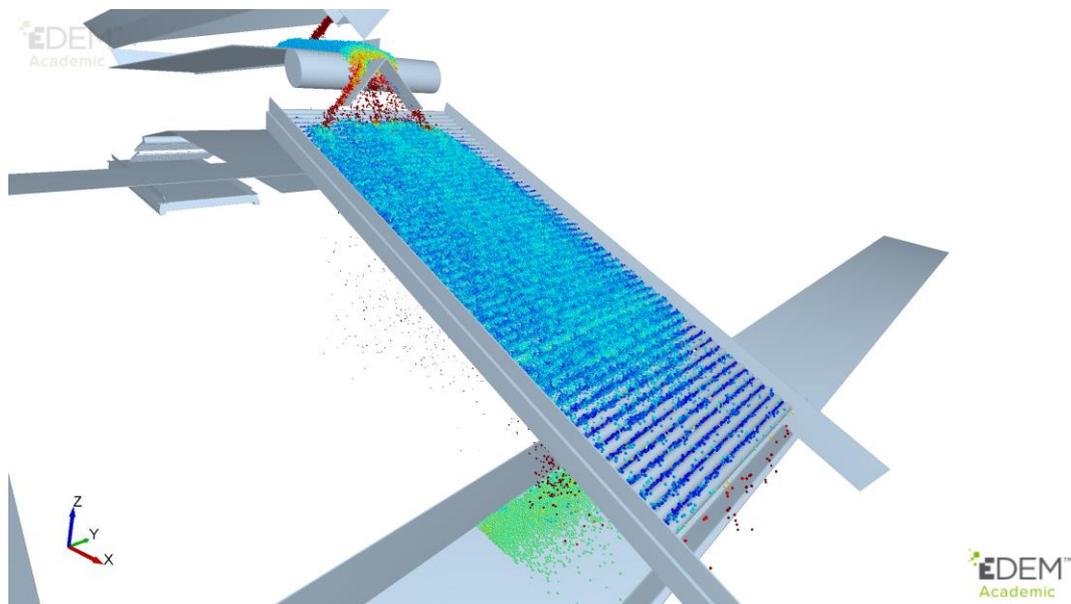


Figura 102 - Pelotas na peneira do disco de pelotamento. As cores representam as velocidades, verdes mais lentas chegando a vermelho, mais rápidas (Caso 2)

O resultado do balanço de massas desta peneira pode ser visto na Figura 103, que mostra a recuperação por cada uma das trinta e cinco classes de tamanhos utilizadas nas simulações DEM. Como o produto descarregado pelo disco de pelotamento contém cerca de 3,0% de pelotas menores que 8 mm e 2,8% de pelotas maiores que 18 mm, é de se esperar a ocorrência de alguma contaminação no produto *onsize*.

Os resultados mostram que cerca de 90% das pelotas menores que 9 mm reportaram ao fluxo *undersize*, carregando, portanto, pelotas que poderiam ser consideradas produto. Com relação ao retorno no *oversize*, praticamente 100% das pelotas maiores que 17 mm reportaram a este fluxo.

O percentual de retorno total desta simulação, considerando os fluxos de *undersize* e *oversize*, foi de 19,4%, enquanto o retorno de pelotas consideradas produto, ou seja, com granulometria entre 8 e 18mm, foi de 14,1%. Este alto percentual de retorno de

pelotas produto não ocorreria caso a peneira de rolos não fosse configurada para remover partículas finas, pois é nessa remoção onde ocorre a maior perda. Na Figura 104 é comparada a granulometria do produto *onsize* com a distribuição granulométrica na alimentação da peneira, desconsiderando-se a degradação das pelotas. Na Tabela 11 são indicados os valores dos rendimentos de cada um dos fluxos.

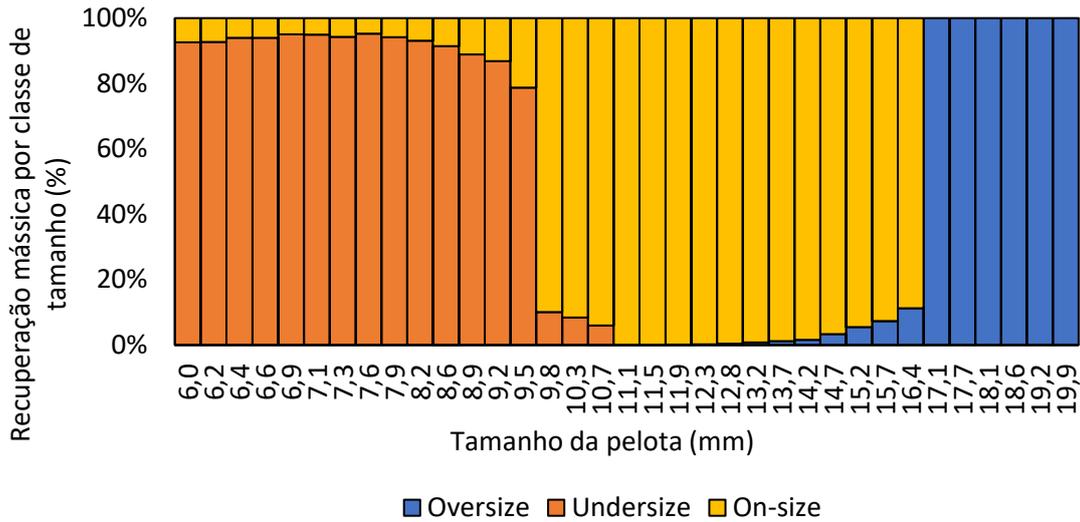


Figura 103 - Recuperações por classe de tamanho obtidas por simulação DEM da peneira 5P22 do disco de pelotamento

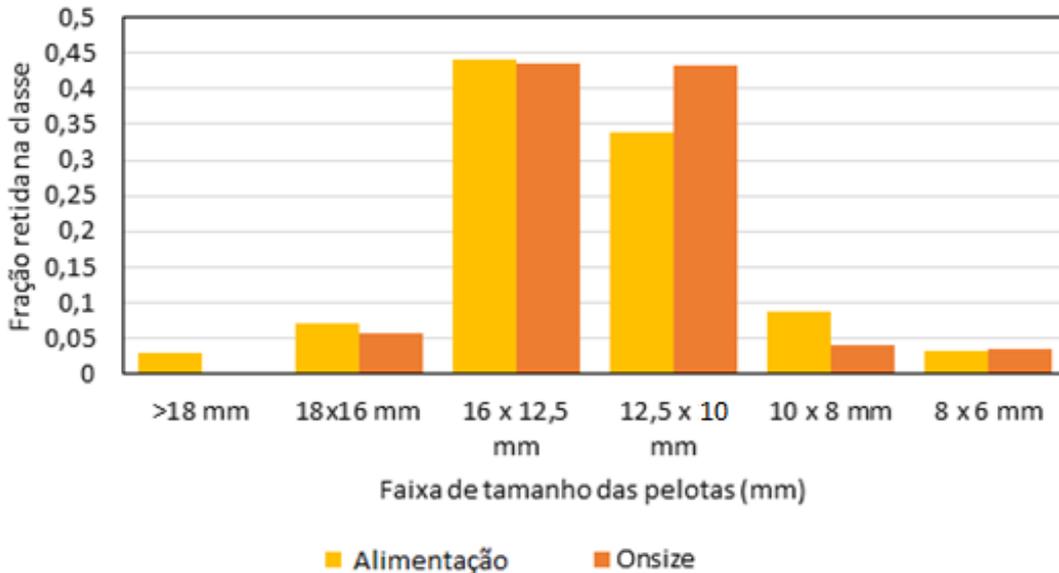


Figura 104 - Distribuições granulométricas da alimentação da peneira e do produto *onsize* na correia 5P27

Outra informação relevante extraída desta simulação do sistema de peneira rolos é a recuperação para o *onsize*, representada na forma de curva de partição, onde a ordenada

representa o percentual de pelotas naquela classe que reportará ao *onsize* (Figura 105). Esta curva deu origem à distribuição denominada classificada, apresentada na seção 4.5.1, a qual é usada nas simulações das quedas 5 e 6 (Casos 3 e 4). Além disso, ao calcular a degradação usando MDPV, fez-se uso desta curva de partição para estimar o percentual de pelotas sobreviventes que reportará às etapas seguintes à correia que transporta o material *onsize*.

Tabela 11 - Rendimentos da peneira em relação à alimentação para os fluxos de *undersize*, *onsize* e *oversize* obtidos por simulação DEM

Alimentação (%)	<i>Undersize</i> (%)	<i>Oversize</i> (%)	<i>Onsize</i> (%)
100	11,82	7,56	80,62

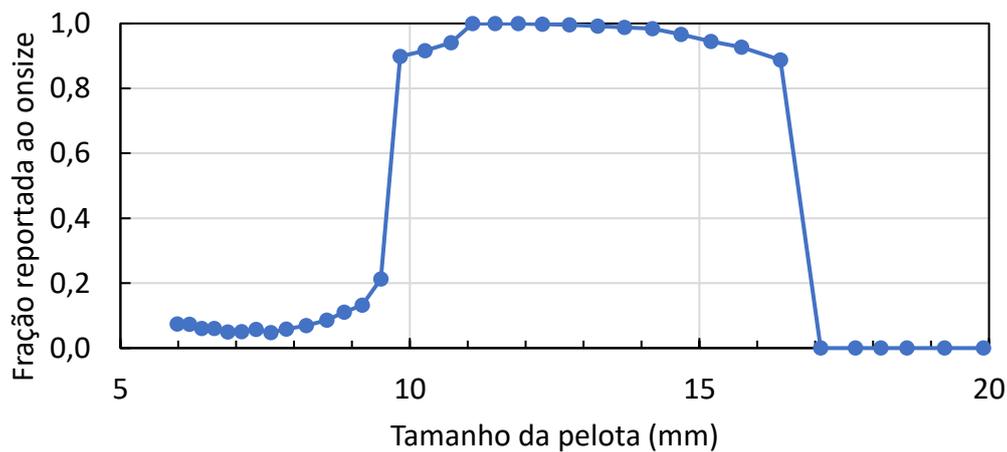


Figura 105 - Curva de partição para a peneira 5P22 obtida por simulação DEM

5.3 Simulação da peneira do forno de único *deck*

Na simulação do Caso 6 é possível notar que a remoção de partículas finas é evidenciada pela coloração azul-esverdeada das partículas menores que 9 mm e que saem sob os rolos na região de *undersize*. As pelotas que são alimentadas ao forno apresentam diâmetros majoritariamente maiores que 8 mm, o que pode ser confirmado pela coloração das partículas que alcançam o plano representando o carro de grelha na Figura 106.

Para o cálculo e a dinâmica dos fluxos mássicos durante o peneiramento, considera-se a superfície dos rolos totalmente preenchida com pelotas verdes.

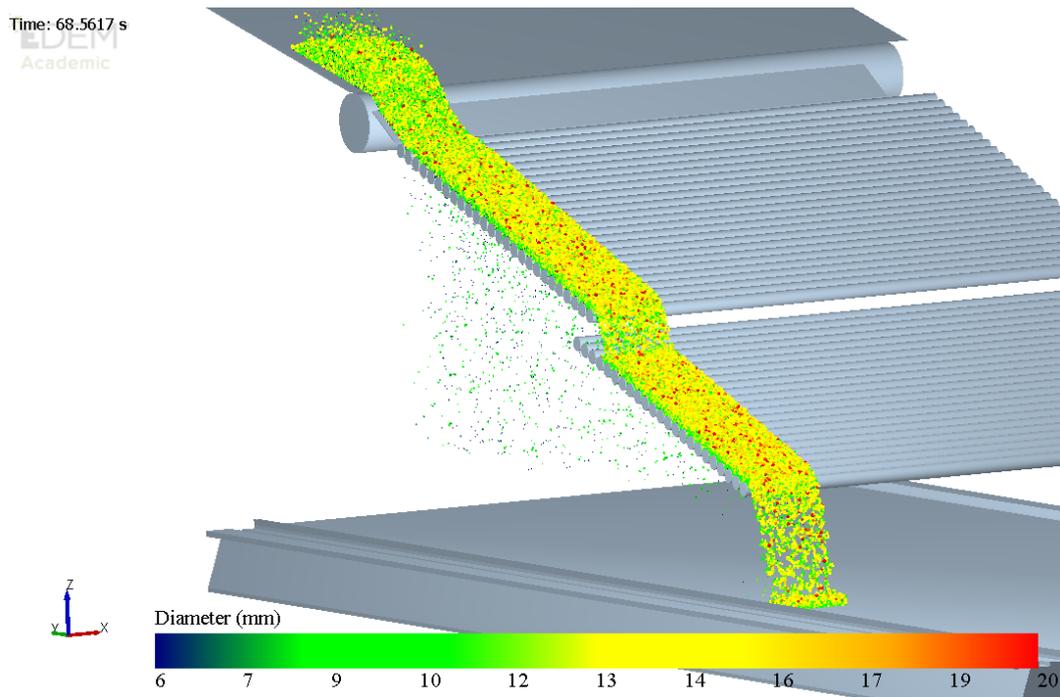


Figura 106 - Imagem da simulação da peneira do forno da Usina 5 (Caso 6)

É possível observar que, considerando a peneira inicialmente vazia, o regime estacionário da operação foi alcançado a partir de 20 segundos do momento em que as primeiras pelotas foram alimentadas à peneira (Figura 107). Neste caso, a peneira do forno da Usina 5 não permite a remoção de partículas *oversize*, alimentando, portanto, pelotas maiores que 16 mm ao forno. Isto é evidenciado na Figura 108, que apresenta a curva de partição para o *onsize* (chegada no forno) para as 35 classes de tamanhos de pelotas utilizadas nas simulações. O resultado da simulação ainda mostra que cerca de 17% das pelotas com diâmetro de 8 mm reportam ao *undersize*, contribuindo para o retorno de produto, cujo percentual global foi de 8,9 %, como poder ser visto na Tabela 12.

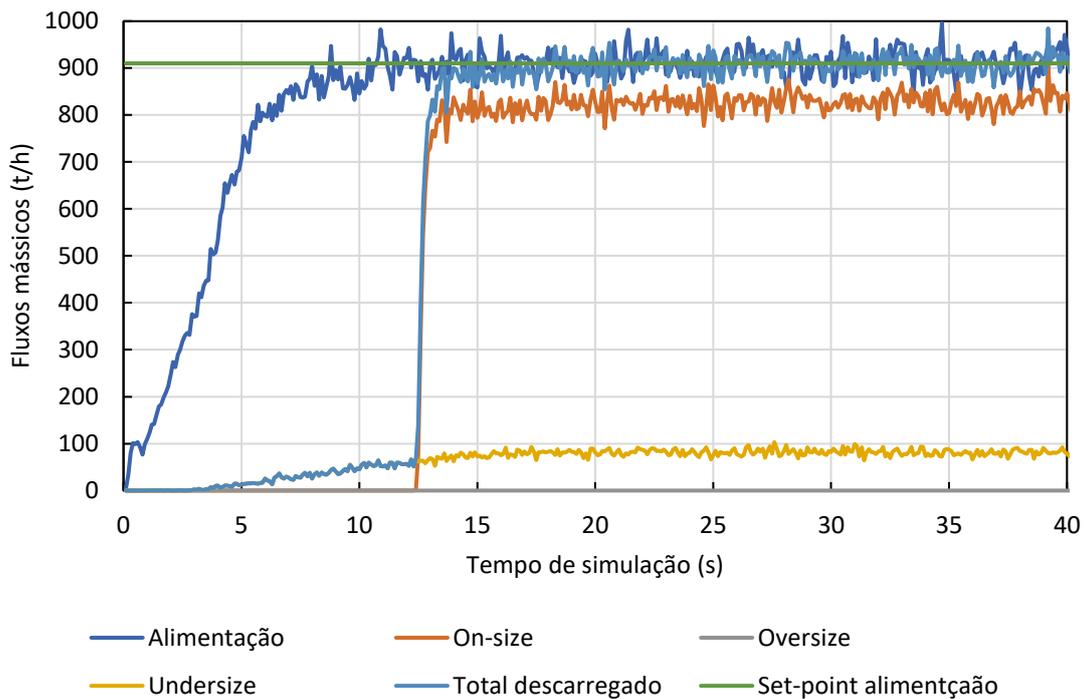


Figura 107 - Evolução dos fluxos mássicos globais na simulação DEM da peneira 5P32 da Usina 5

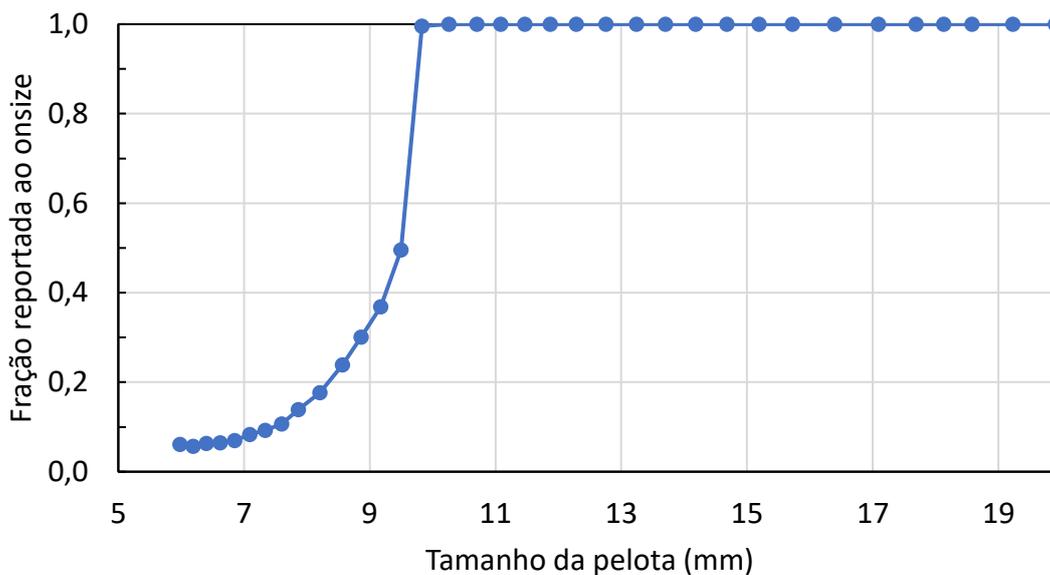


Figura 108 - Curva de partição para a peneira 5P32 obtida por simulação DEM

Tabela 12 - Rendimentos em relação à alimentação dos fluxos de *undersize*, *onsize* e *oversize* da simulação das peneiras do forno

	Alimentação (%)	Undersize (%)	Oversize (%)	Onsize (%)
Peneira único <i>deck</i> (Usina 5)	100	8,9	-	91,1
Peneira duplo <i>deck</i>	100	9,5	2,7	87,8

5.3.1 Simulação da peneira do forno de duplo *deck*

O resultado da simulação da peneira do forno de duplo *deck* é apresentado na Figura 109, na qual é indicada também a região de geração de partículas ao longo dos 4 metros de largura da correia 5P31. As pelotas foram coloridas em função de seu tamanho, sendo as pelotas com diâmetro maior que 17 mm apresentadas em vermelho. As correias de remoção de *oversize* e *undersize* foram omitidas na imagem.

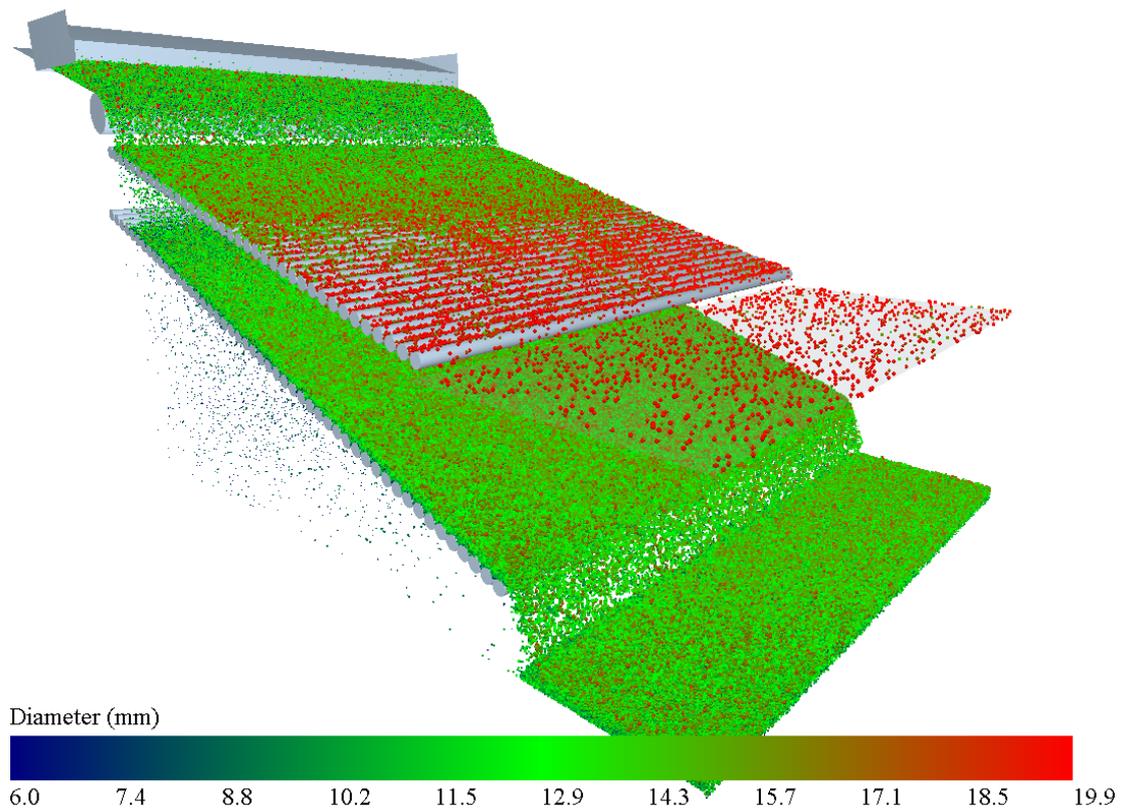


Figura 109 - Simulação da peneira duplo *deck* do forno da Usina 6 (Caso 7)

Os resultados da simulação permitiram observar que partindo da peneira vazia, o regime permanente foi alcançado após transcorridos cerca de 30 segundos de operação, como pode ser visto na Figura 110, que apresenta o balanço de massas global do sistema simulado ao longo do tempo. Pode-se observar também que o fluxo de pelotas no *onsize* só teve início após transcorridos 27 segundos de operação. Esse tempo representa o tempo de residência médio de uma pelota *oversize* nesta peneira de duplo *deck*.

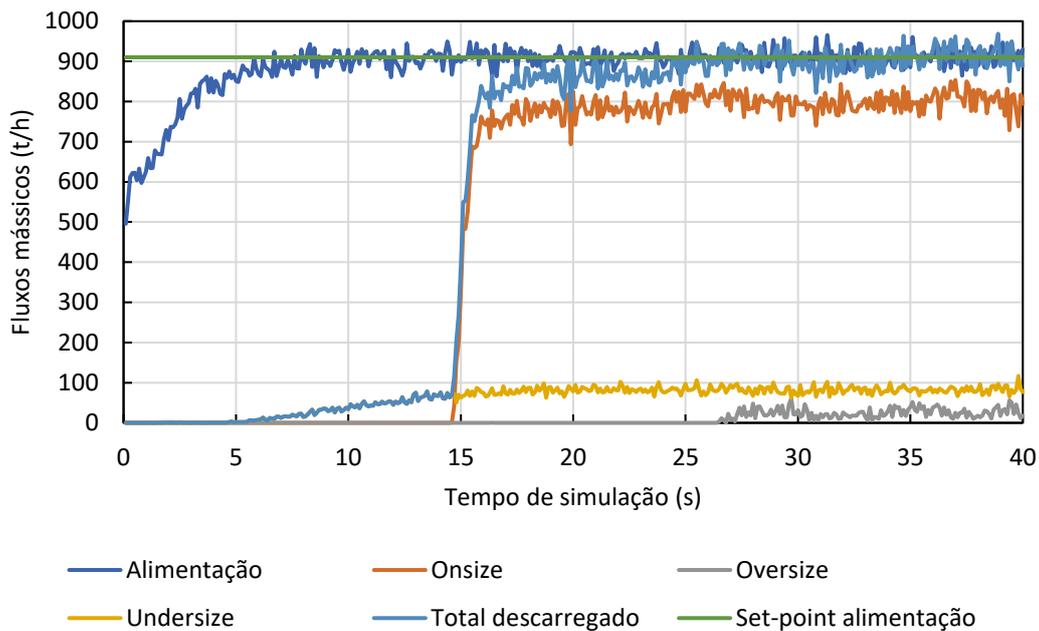


Figura 110 - Evolução dos fluxos mássicos globais na simulação DEM da peneira de duplo *deck*

A recuperação mássica para cada um dos três fluxos (*undersize*, *onsize* e *oversize*) é apresentada na Figura 111, onde pode-se observar que 100% de eficiência é atingida na remoção das pelotas com tamanho maior que 18,6 mm. Entretanto, uma fração relevante de pelotas com tamanhos entre 8,0 e 9,5 mm é direcionada ao fluxo de *undersize*. O retorno de pelotas na faixa entre 8 e 18 mm, considerado produto, foi de 6,5% em relação ao total na nesta faixa que é alimentado à peneira. Este percentual corresponde a 55,8 t/h. A curva de partição desta operação (Figura 112) mostra que 100% das pelotas entre 9,8 e 17,7 mm que chegam na peneira do forno, reportam ao carro de grelha no forno de endurecimento. O balanço de massa global é apresentado na Tabela 12.

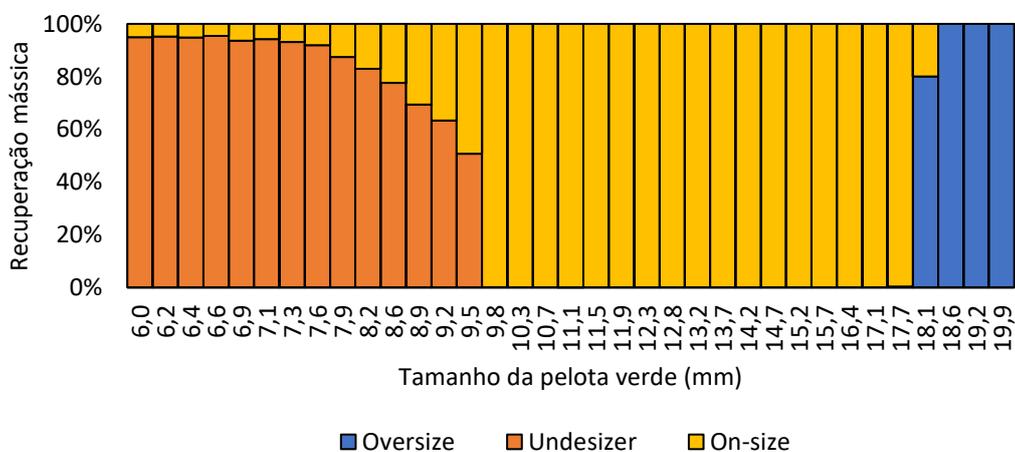


Figura 111 - Recuperação mássica em cada um dos três fluxos de produto na peneira de duplo *deck* (simulado)

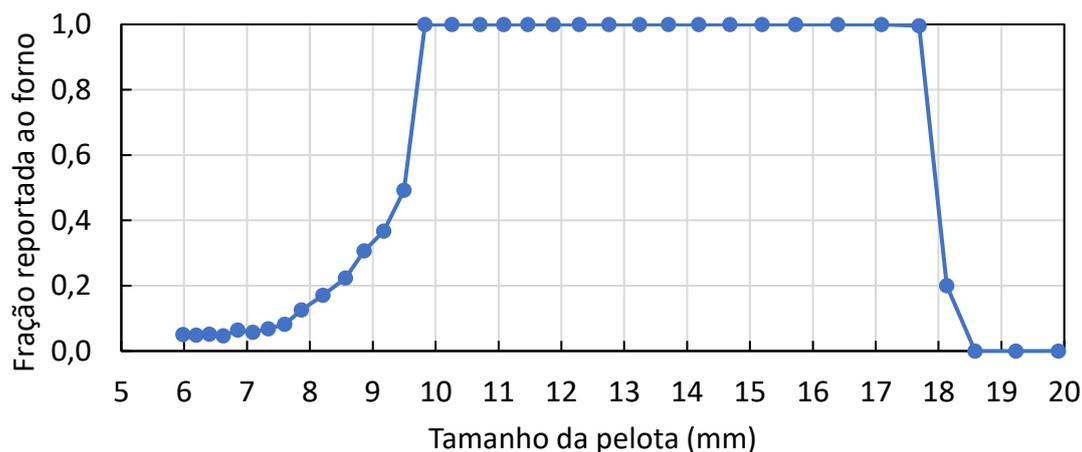


Figura 112 - Curva de partição para a peneira duplo *deck* obtida por simulação DEM

5.4 Modelo de degradação de pelotas verdes (MDPV)

Esta seção apresenta o desenvolvimento do modelo matemático para previsão da degradação de pelotas verdes. Em um primeiro momento, resultados da degradação de pelotas verdes na condição de quedas individuais, conforme apresentado na seção 3.4, serão usados para a formulação das hipóteses do modelo que darão origem à formulação matemática. A calibração dos parâmetros das equações do modelo foi realizada a partir dos dados experimentais de queda individual sob diversas condições, como altura de queda, número de impactos, ângulo do impacto e tamanho de pelotas, obtidos de um trabalho previamente realizado (TAVARES e ALMEIDA, 2020). Nessas análises de degradação, considerou-se como quebra da pelota, a perda de integridade das pelotas ou fragmentação. Posteriormente, o acoplamento de resultados de simulações DEM ao modelo de degradação foi realizado ao reproduzir o resultado de um experimento em escala piloto no equipamento chamado degradômetro, utilizando pelotas verdes de minério de ferro coletadas na saída de discos de pelotamento nas usinas que a Vale possui em Vitória/ES.

5.4.1 Desenvolvimento do modelo de degradação de pelotas verdes

O modelo de degradação de pelotas verdes (MDPV) foi desenvolvido utilizando-se uma série de experimentos de queda individual com pelotas produzidas no LTM e planta piloto da Vale em Vitória/ES. O MDPV consiste em diversos módulos e contempla efeitos de ativação para quebra, mecânica do dano e energia de fratura de pelotas.

Os resultados da quebra individual de pelotas verdes indicam a existência de uma energia mínima inicial que deve ser superada para que a pelota verde passe a seguir o

comportamento de um corpo rígido, sujeito ao mecanismo de mecânica do dano, de maneira semelhante àquele observada no comportamento de quebra de pelotas queimadas, cujo modelo já foi validado por Cavalcanti *et al.* (2016).

Para tornar possível a descrição do comportamento de quebra das pelotas verdes observado nos ensaios de quedas repetidas, apresentados na seção 3.4, foi definida uma “energia mínima para ativação” das trincas. Entretanto, não há evidências suficientes que mostrem que essa energia varia com o tamanho da pelota ou mesmo há variabilidade dentro de uma faixa de tamanhos de pelota. Essa energia específica de ativação para uma pelota antes de um evento de queda k foi denominada E_S^k e é expressa em J/kg.

Em eventos sucessivos de queda sofridos por uma pelota, esta sofre redução gradativa de sua “energia de ativação”. Esse mecanismo de redução da “energia de ativação” pode ser descrito com uma simples relação de diferenças que depende de sua energia de ativação atual, da energia absorvida durante a queda e da altura de queda sofrida pela pelota. Para um evento de impacto k , a equação pode ser escrita como:

$$E_S^{k+1} = E_S^k - E_k * f(h_k) \quad \text{Equação 5.1}$$

na qual $f(h_k)$ é uma função da altura de queda h_k e E_k é a energia de impacto. A altura de queda é conhecida diretamente no caso de ensaios experimentais. Entretanto, no caso de simulações DEM, como será demonstrado adiante, h_k pode ser estimado a partir das perdas de energia dissipada na componente normal da colisão ($E_{N,k}$) e tangencial ($E_{T,k}$), que permitem estimar o ângulo do impacto θ_k .

Para a altura do impacto tem-se

$$h_k = \frac{E_{N,k}}{9,81} f_{\theta_k} \quad \text{Equação 5.2}$$

na qual o fator f_{θ_k} é dado por

$$f_{\theta_k} = 1/\cos(\theta_k) \quad \text{Equação 5.3}$$

enquanto o ângulo do impacto θ_k , em radianos, é estimado por

$$\theta_k = \cotg^{-1}\left(\frac{E_{N,k}}{E_{T,k}}\right) \quad \text{Equação 5.4}$$

Por fim, o fator de correção da altura de queda $f(h_k)$ ou, f_k pode ser calculado por meio da equação empírica

$$f_k = f(h_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } h_k > \exp\left(\frac{1-b}{a}\right) \\ 0, & \text{se } h_k < \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \\ a \ln h_k + b, & \text{se } \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \leq h_k \leq \exp\left(\frac{1-b}{a}\right) \end{cases} \quad \text{Equação 5.5}$$

sendo a e b parâmetros adimensionais de ajuste.

Uma vez que a pelota verde é ativada para quebra, esta passa a seguir o comportamento de perda de resistência à fratura descrito pela Mecânica do Dano, previamente aplicado com sucesso no caso de pelotas queimadas (TAVARES *et al.*, 2018). Além disso, dentro de uma mesma faixa de tamanhos, pelotas verdes podem apresentar diferentes energias de fratura, e esta distribuição de energias de fratura pode ser descrita por uma função do tipo log-normal, dada por:

$$F(E) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E - \ln E_{50}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad \text{Equação 5.6}$$

na qual a energia específica mediana E_{50} (J/kg) e o desvio padrão σ podem variar com o tamanho da partícula.

Quando um impacto não possui magnitude suficiente para fragmentar a pelota, ou seja $(E_n^k + E_s^k) > E_k$, a energia de fratura da partícula E_n é reduzida de acordo com a expressão originalmente proposta segundo a mecânica do dano (TAVARES e KING, 2002), dada pela equação $E_n^{k+1} = E_n^k(1 - D)$.

Da análise dos resultados dos ensaios de quedas repetidas com pelotas individuais, percebeu-se um retardo na degradação das pelotas quando estas são submetidas a quedas de altura menores que 46 cm (Figura 49). Na prática, nesses impactos o acúmulo de dano seria menos intenso do que aquele previsto no modelo. Esse efeito foi incluído no modelo na forma do parâmetro γ da equação do dano (D) (Equação 5.7), o qual é considerado constante e independente do histórico de impactos no caso de pelotas queimadas (TAVARES *et al.*, 2018). Assim, é proposto calcular o dano de um evento de impacto k pela solução da equação não-linear dada por:

$$D_k = \left[\frac{2\gamma_k}{(2\gamma - 5D_k + 5) E_n^k} \right]^{\frac{2\gamma_k}{5}} \quad \text{Equação 5.7}$$

sendo que o parâmetro γ_k pode ser calculado pela expressão

$$\gamma(h^*) = \max(2,92 * h^* - 2,93; 1,27) \quad \text{Equação 5.8}$$

na qual a altura acumulada de queda até a ativação da pelota h^* é dada por

$$h^* = \sum_{i=1}^{k_a} h_i \quad \text{Equação 5.9}$$

A Equação 5.9 mostra que h^* depende da altura equivalente de queda total sofrida pela pelota até sua ativação.

Com a aplicação sequencial da Equação 5.1 à Equação 5.9, é possível então prever a proporção de pelotas verdes quebrada após uma sequência de impactos. O algoritmo de cálculo utilizado na simulação computacional da degradação das pelotas verdes pode ser resumido em duas etapas principais: inicialização e cálculo. A sequência de inicialização, por sua vez, é subdividida em quatro etapas:

- Criar partículas de pelotas verdes virtuais (PVV);
- Calcular a distribuição de energias de fratura para cada faixa de tamanho;
- Atribuir aleatoriamente uma energia de fratura à cada PVV;
- Atribuir um histórico de colisões para cada PVV em função do seu tamanho de partícula.

Uma vez que o algoritmo é iniciado, tem início o cálculo da degradação para cada uma das PVV criadas para a simulação. O algoritmo da solução de um histórico de colisões é apresentado na Figura 113.

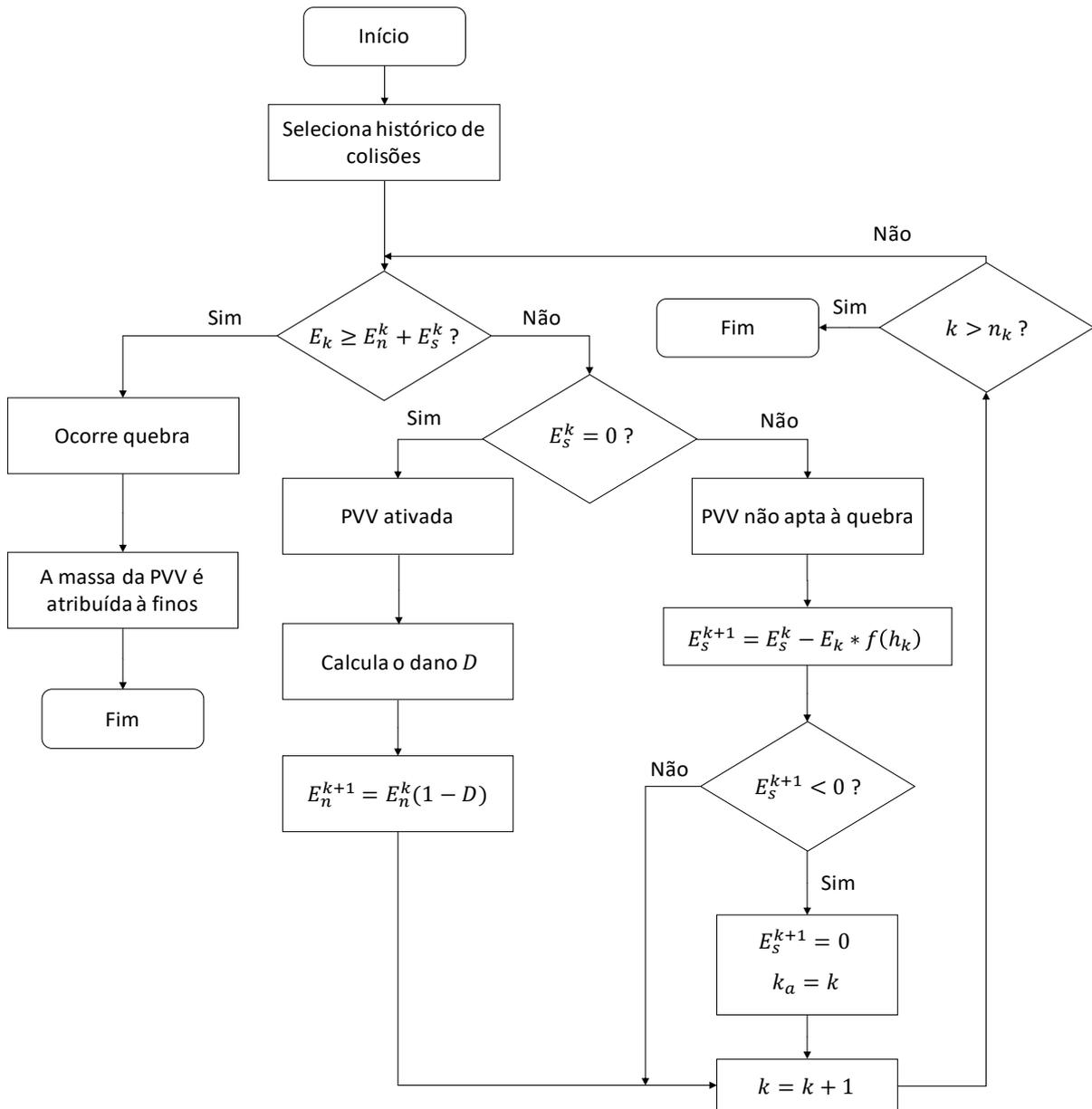


Figura 113 - Algoritmo do modelo de degradação de pelotas verdes aplicado à uma única pelota verde virtual PVV

De modo a demonstrar a validação MDPV com os parâmetros calibrados, os resultados dos ensaios de quedas com pelotas verdes, apresentados na secção 3.4 (ALMEIDA, 2019 e TAVARES e ALMEIDA, 2020), foram comparados com suas respectivas simulações computacionais.

Os parâmetros de ajuste do modelo e que dizem respeito às propriedades de quebra das pelotas verdes são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros do modelo de degradação de pelotas verdes ajustados para as pelotas produzidas no LTM

Descrição	Parâmetro	Valor
Mediana da energia específica de fratura	E_{50} (J/kg)	11,20
Energia específica de ativação	E_s^0 (J/kg)	9,584
Desvio padrão da distribuição de energia de fratura	σ (-)	0,3805

Na Figura 114 e na Figura 115 são apresentados os resultados da aplicação do modelo, já com os parâmetros calibrados, para a modelagem das quedas de pelotas verdes sobre uma superfície de aço horizontal para diferentes alturas de queda comparados aos resultados experimentais de Almeida (2019). Na Figura 114a que apresenta o resultado para quatro alturas de queda constantes, é possível observar que o modelo responde ao aumento na energia específica do impacto para as quedas de 25 cm à 75 cm. No caso das quedas de 25 cm, nota-se que a diferença na inclinação da curva de proporção quebrada em função do número de quedas em relação ao resultado com as alturas maiores que 37 cm também foi descrita pelo modelo. Isso se deve a dois fatores incorporados no equacionamento matemático: o primeiro é a mudança do coeficiente de mecânica do dano, o parâmetro γ , que no caso de quedas repetidas de 25 cm de altura, resulta em um valor maior do de γ que reduz o efeito de enfraquecimento por impactos repetidos.

Além disso, a energia de ativação também tem um papel importante. Conforme discutido à luz dos resultados experimentais na seção 3.4, as pelotas verdes demandam que um certo número de quedas seja atingido até que seja observada a quebra de alguma das pelotas da população do ensaio. Ainda sob a ótica dos resultados apresentados na Figura 114a e Figura 114b, para as energias maiores de impacto, excetuando-se o caso de quedas de 2 metros de altura, as pelotas quebram somente após sofrerem queda de altura total acumulada de cerca de 80 centímetros de altura (ALMEIDA, 2019).

O modelo de degradação de pelotas verdes foi capaz de descrever esse comportamento de ativação, e os resultados estão na Figura 114b e Figura 115, onde alterou-se a altura de queda durante os ensaios.

No caso o qual tem-se uma primeira queda com altura de 1 metro não houve quebra de pelotas. Entretanto, para o caso em que os impactos seguintes foram sempre a 1 metro de altura, ou seja, 40 quedas de 1 metro (caso 40x100), no segundo impacto ocorreu quebra de uma parcela significativa das pelotas verdes. No outro caso, em que a partir do

segundo impacto as pelotas foram liberadas de uma altura de 25 cm (caso 1x100/39x25) houve um percentual quebrado menor a partir desse segundo impacto (Figura 114b). Nesses dois casos, a resposta do modelo, lançada em gráfico como linhas contínuas, foi adequada. Um caso extremo que confirma robustez do modelo é apresentado na Figura 115, onde as pelotas sofreram 20 quedas de uma altura de 15 cm. No experimento, nenhuma pelota apresentou quebra até a 19ª queda, e cerca de 6% quebraram no impacto seguinte. De acordo com o modelo, nenhuma pelota quebraria na queda de número 20, e na 21ª queda, cerca de 45% das pelotas quebraram, valor este, muito próximo do percentual obtido no experimento, de aproximadamente 50%.

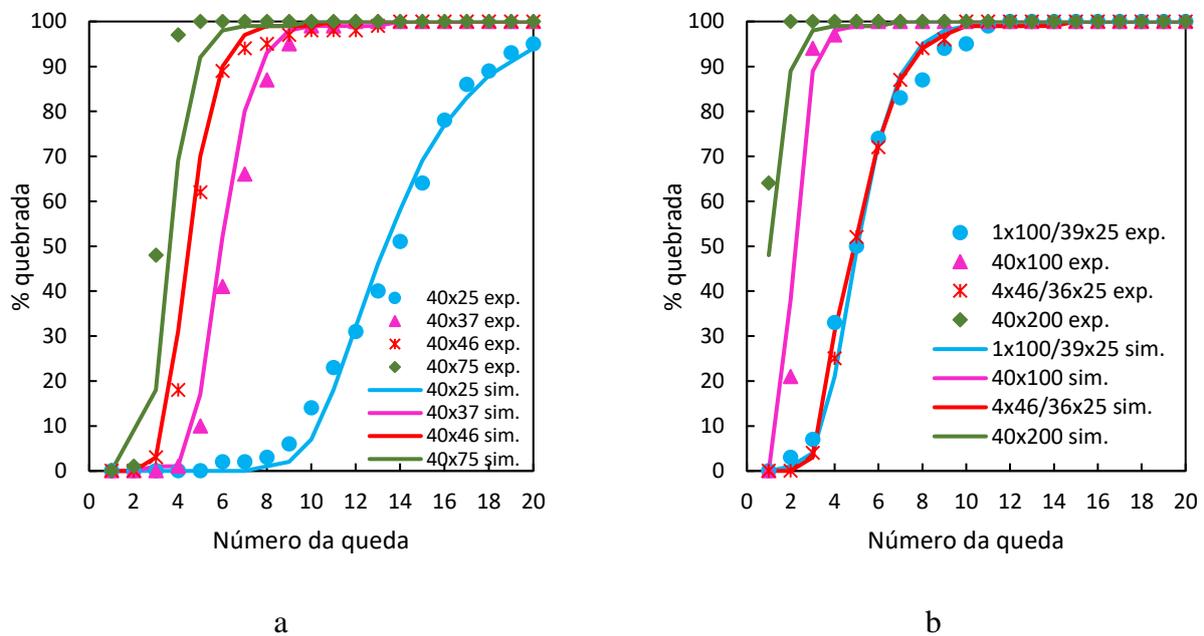


Figura 114 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas, com pelotas de 12,5x10,0 mm e ângulo de impacto de 90°

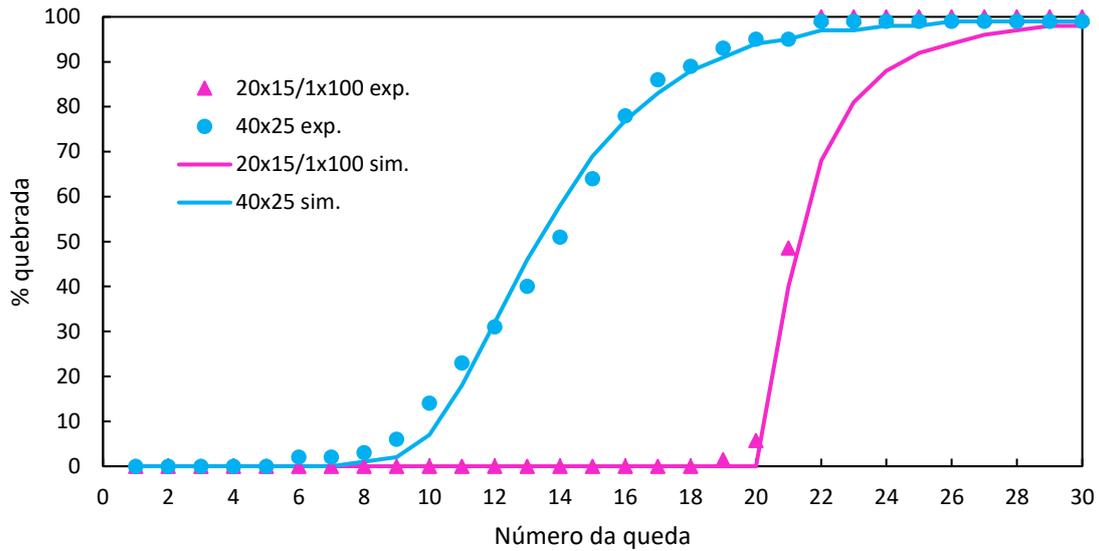


Figura 115 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 12,5x10,0mm e ângulo de impacto de 90°

O efeito do ângulo do impacto nas quedas estudado por Almeida (2019) e apresentado na seção 3.4.4 também foi descrito pelo modelo conforme pode ser visto na Figura 116a e na Figura 116b, que apresentam os resultados de quebra acumulada com pelotas na faixa de 12,5x10 mm contra um plano a 30° e a 45° de inclinação em relação à horizontal, ou seja, equivalendo a ângulos entre o impacto e o plano inclinado, respectivamente, de 60° e 45°. De modo geral o modelo foi capaz de descrever bem os resultados experimentais, com uma ligeira diferença para o caso de menor altura de queda e ângulo de impacto de 45°, no qual os experimentos mostram que, na 30ª queda, a proporção de pelotas verdes quebradas era de aproximadamente 70%, enquanto o modelo previu apenas 39% de pelotas quebradas. Entretanto, se for considerado o ensaio somente até o vigésimo impacto, esta diferença entre a proporção medida experimentalmente e a simulada foi de apenas 3%. No caso de quedas contra o plano a 30° de inclinação (ângulo de impacto de 60°), reportado na Figura 116b, o modelo aderiu muito bem ao resultado experimental, evidenciando a robustez da formulação matemática e qualidade do ajuste dos parâmetros.

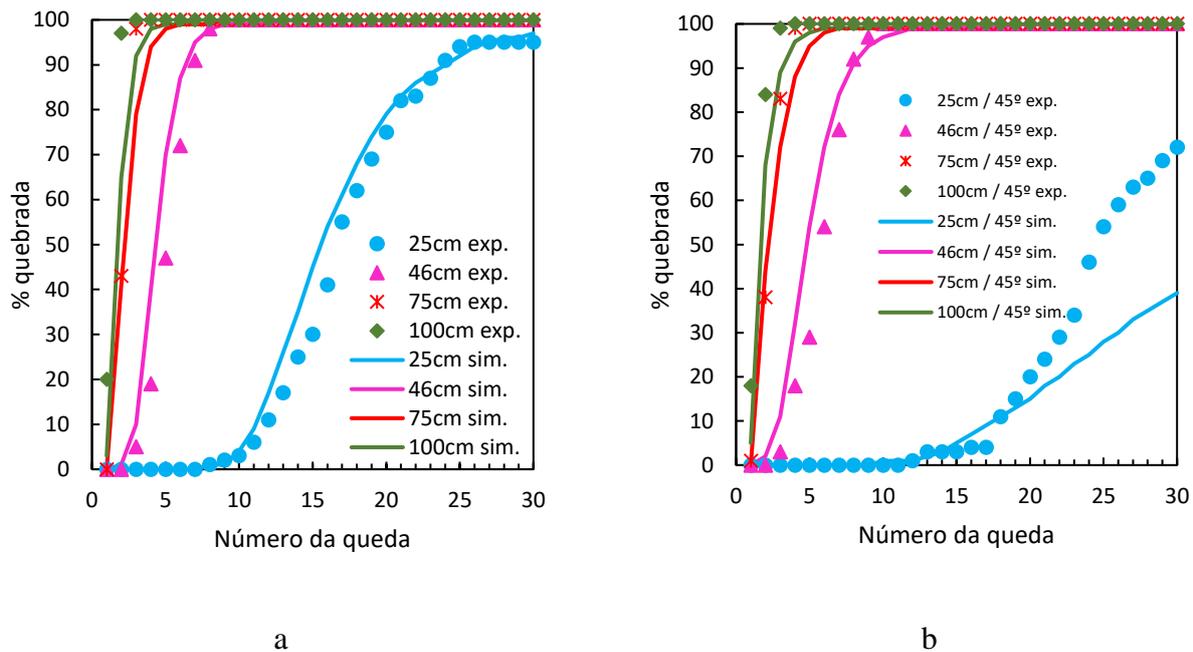


Figura 116 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 12,5x10,0mm e ângulo de impacto de 60° e 45°

De acordo com os resultados apresentados na seção 3.4.2, houve um pequeno efeito do tamanho das pelotas em sua energia específica de fratura (TAVARES e ALMEIDA, 2020), entretanto, para fins e modelagem, esse efeito foi pouco significativo. Na Figura 117 e na Figura 118, que apresentam os resultados de quebra acumulada para ensaios com pelotas verdes em duas faixas de tamanhos diferentes (10x8mm e 16x12,5mm), submetidas a quedas de diferentes alturas, é possível perceber que o resultado das simulações descreveu de maneira adequada os resultados experimentais, considerando uma energia de fratura específica média constante para os tamanhos de pelotas verdes ensaiados.

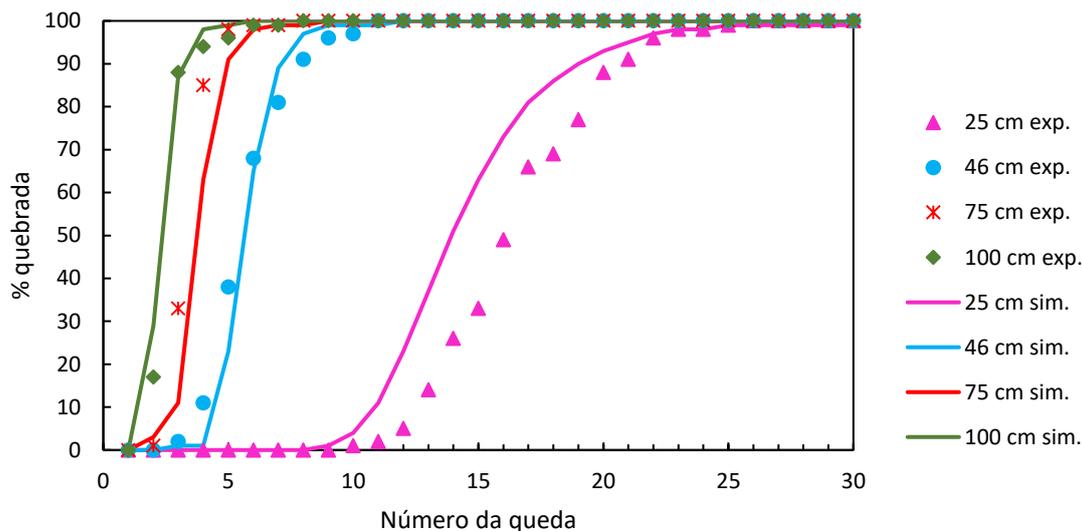


Figura 117 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 10x8 mm e ângulo de impacto de 90°

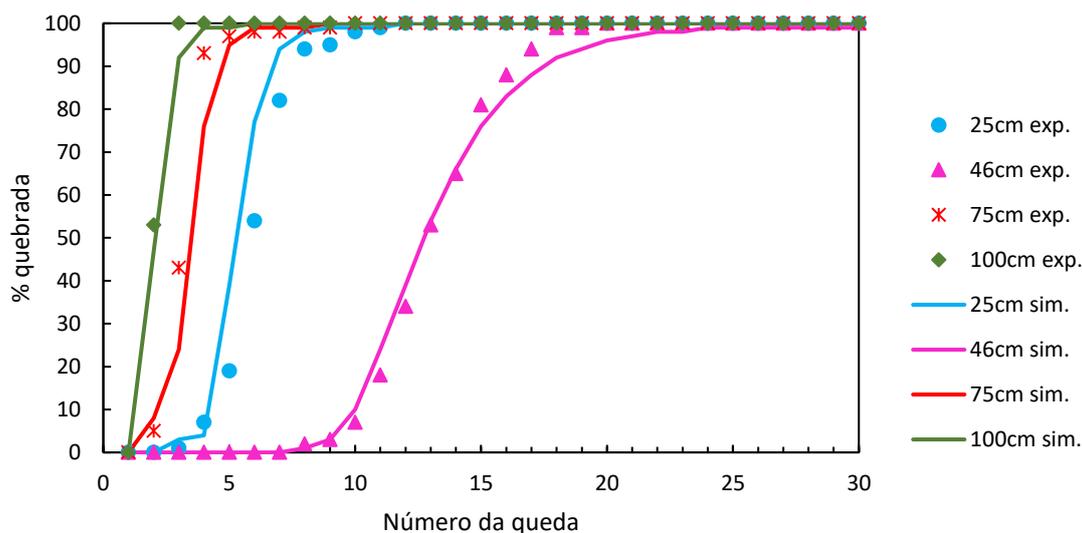


Figura 118 - Comparativo entre simulações e experimentos de queda individual de pelotas verdes para diferentes alturas de queda com pelotas de 16,0x12,5 mm e ângulo de impacto de 90°

5.4.2 Validação do modelo para queda individual

Embora tenha se buscado a produção de pelotas em laboratório que se aproximassem do comportamento quanto à quebra daquele observado nas pelotas produzidas na Usina 5 da Vale S.A., alguns parâmetros das pelotas produzidas não se mostraram adequados, como por exemplo o valor do número de queda, indicando que as pelotas produzidas por Almeida (2019) foram ligeiramente menos resistentes que pelotas

produzidas na Usina 5 da Vale S.A. Ainda assim, a série de experimentos realizados com as pelotas produzidas em laboratório, permitiu desenvolver todo o equacionamento do MDPV.

A fim de verificar a adequação do comportamento quanto à degradação de pelotas produzidas na indústria, ensaios adicionais de queda individual foram realizados com pelotas coletadas no circuito industrial da Usina 5 da Vale em Vitória/ES.

O ensaio de quedas repetidas com pelotas industriais apresentou resultado semelhante àqueles realizados com pelotas produzidas em laboratório. Entretanto, fez-se necessário reajustar alguns dos parâmetros do MDPV desenvolvido a partir de pelotas produzidas em laboratório.

A Figura 119 apresenta o percentual de pelotas quebradas em função do número de quedas repetidas sobre base de aço para pelotas de duas faixas de tamanho (16x12,5mm e 12,5x10mm) e a diferentes alturas de queda (46 cm e 75 cm). O resultado experimental mostra que não há efeito do tamanho da pelota para a queda de 46 cm, enquanto para a queda de maior altura, as pelotas maiores demonstraram ser ligeiramente mais resistentes. Como o efeito do tamanho de partícula na resistência à fratura e ativação das pelotas para a quebra é difícil de ser estudado, optou-se por obter um conjunto médio de parâmetros para descrever simultaneamente os quatro conjuntos de dados, desprezando-se, portanto, o efeito do tamanho da pelota na energia específica de fratura (E_{50}). O resultado das simulações do ajuste de parâmetros é apresentado na Figura 119 na forma de linhas contínuas. Pode-se observar boa aderência dos dados simulados aos experimentais para os resultados dos ensaios com queda de 46 cm, enquanto para os ensaios com quedas de maior altura, o comportamento simulado representou a média dos resultados experimentais.

Com relação ao ajuste de parâmetros do modelo, as pelotas industriais se mostraram mais resistentes, com a sua energia específica de fratura média (E_{50}) em cerca de 25% maior do que o valor ajustado para pelotas produzidas em laboratório. O desvio padrão da distribuição de energia de fratura e a energia específica de ativação se mantiveram constantes. Um resumo dos parâmetros de quebra das pelotas verdes industriais é apresentado na Tabela 14.

Adicionalmente, a Equação 5.8 usada na determinação do parâmetro γ , que descreve a perda de resistência das pelotas em função de impactos repetidos de acordo com a mecânica do dano, teve seu parâmetro de gama mínimo ajustado para 1,25 conforme é mostrado na Equação 5.10.

$$\gamma(h^*) = \max(2,92 * h^* - 2,93; 1,25)$$

Equação 5.10

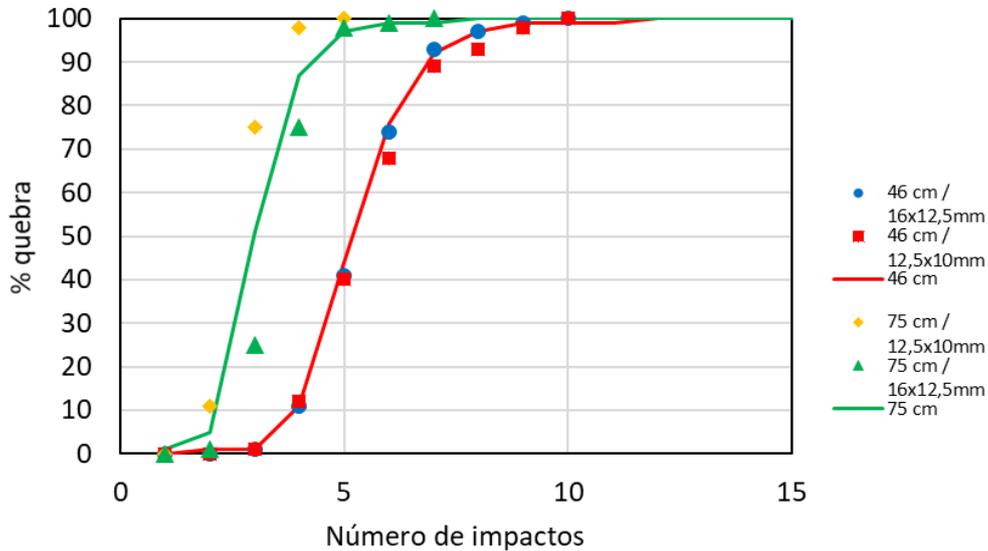


Figura 119 - Comparação entre simulações e experimentos de queda individual com pelotas industriais e ajuste do modelo com os parâmetros da Tabela 19

Tabela 14 - Parâmetros do modelo de degradação de pelotas verdes ajustados para as pelotas coletadas na Usina 5

Descrição	Parâmetro	Valor
Mediana da energia específica de fratura	E_{50} (J/kg)	13,93
Energia específica de ativação	E_s^0 (J/kg)	9,584
Desvio padrão da distribuição de energia de	σ (-)	0,381

5.4.3 Validação do modelo para múltiplas partículas (degradômetro)

Na seção 5.4 foi abordado o desenvolvimento do MDPV aplicado a sistemas nos quais as pelotas eram impactadas individualmente. Naturalmente, no ambiente industrial, em um único evento de queda, como por exemplo a queda sofrida pelas pelotas ao deixarem o disco de pelotamento, uma única pelota pode sofrer grande número de colisões, podendo colidir contra o leito de pelotas formado no transportador de correia, na própria calha na descarga do disco e, ainda, uma vez transferida pela correia, sofrer impactos devido à queda de outras pelotas sobre a mesma.

Evidentemente, estimar as energias de impacto associadas a estes múltiplos eventos de colisões é inviável no sistema industrial. Desta forma, a aplicação prática do MDPV consiste no acoplamento de informações retiradas de simulações do movimento das pelotas em ambiente tridimensional que reproduz a realidade da usina ao MDPV proposto

na seção 5.4.

O degradômetro, dispositivo descrito na seção 4.2, foi a primeira aplicação do modelo a múltiplas pelotas em ambiente controlado. Para compor a amostra para realização do ensaio no degradômetro, as pelotas verdes foram coletadas na saída do disco de pelotamento. As características físicas, que são aquelas que afetam diretamente nas propriedades das pelotas verdes são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Características químicas e físicas da mistura com *pellet feed* no disco de pelotamento

		Amostragem		
Parâmetro		26/10/2017	29/12/2017	14/08/2018
Características físicas da mistura com <i>pellet feed</i>	Superfície específica (cm ² /g)	1894	1865	1877
	Granulometria (<0,045 mm)	90,5	88,0	90,5
	Umidade (%)	8,23	8,29	8,34
	Antracito (%)	1,70	1,42	1,67
	Aglomerante (%)	0,55	0,49	0,56
	Calcário (%)	1,28	1,30	1,20
Composição química da mistura com <i>pellet feed</i>	Basicidade binária	0,52	0,52	0,51
	SiO ₂ (%)	1,33	1,38	1,44
	CaO (%)	0,70	0,72	0,73
	Al ₂ O ₃	0,37	0,38	0,35
	MgO (%)	0,04	0,04	0,04
	P (%)	0,02	0,02	0,02
	Mn (%)	0,04	0,07	0,08
	Fe _{total} (%)	68,08	67,99	67,96
	TiO ₂ (%)	0,07	0,07	0,06
S (%)	0,00	0,00	0,00	

Os resultados da análise energética das simulações DEM no degradômetro mostraram que, como esperado, a queda de 800 mm de altura foi aquela que resultou em maiores energias de colisão (Figura 120b) em relação a queda de 500 mm (Figura 120a). Uma análise dos espectros de energia, apresentados na Figura 120, mostra que ocorreram pelo menos 1000 colisões de magnitude maior que 1,0 J/kg, enquanto a energia máxima recebida para uma pequena parcela das pelotas, chegou a valores maiores que 7,9 J/kg, que equivale à queda livre de uma partícula da altura do ensaio. Isso se deve ao fato dessas colisões ocorrerem no quique de uma pelota após atingir o solo.

As energias de colisão obtidas nas simulações da queda das pelotas foram utilizadas

como parâmetro de entrada nas simulações da degradação por quedas repetidas usando o modelo de degradação de pelotas verdes conforme algoritmo descrito na Seção 5.4. Essas simulações consideram os parâmetros de propriedades de quebra das pelotas verdes industriais, reportados na Tabela 14.

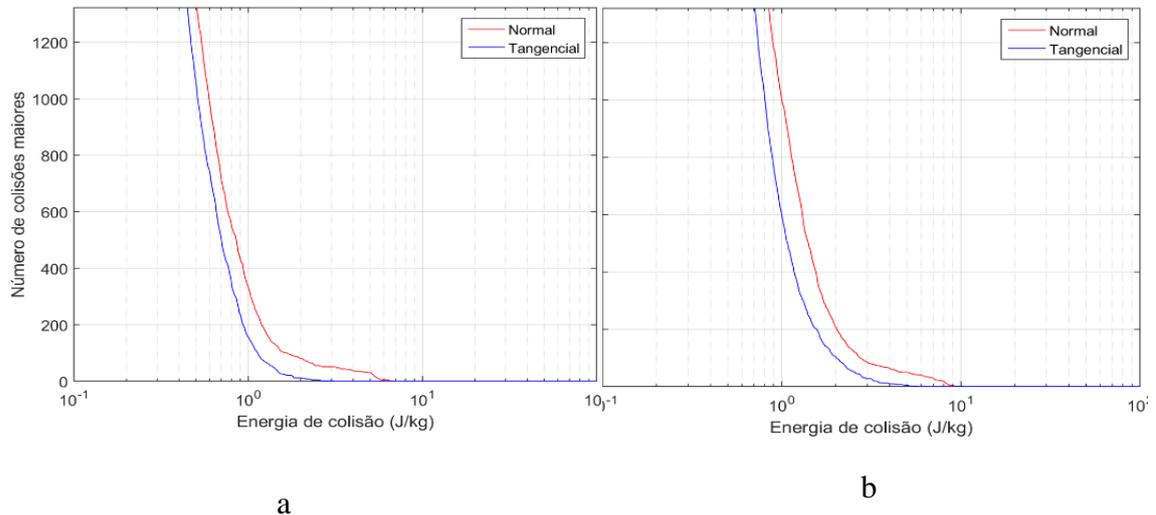


Figura 120 - Espectros de energia de colisão para as pelotas verdes simuladas nos ensaios com o degradômetro para alturas de queda de 500 mm (a) e 800 mm (b)

Os resultados dos ensaios representados pelas condições 1 e 3, que foram aquelas que utilizaram altura de queda igual a 500 mm (Figura 121), indicam que o modelo subestimou o percentual de finos gerado logo na primeira queda. Entretanto, há de se reconhecer que as pelotas verdes ensaiadas no degradômetro passaram por etapas de manuseio, seja na coleta das amostras no disco, ou no procedimento de separação por tamanhos, com remoção de finos na etapa prévia ao ensaio. Por outro lado, por volta da quinta queda, o percentual de finos previsto está próximo àquele obtido nos experimentos.

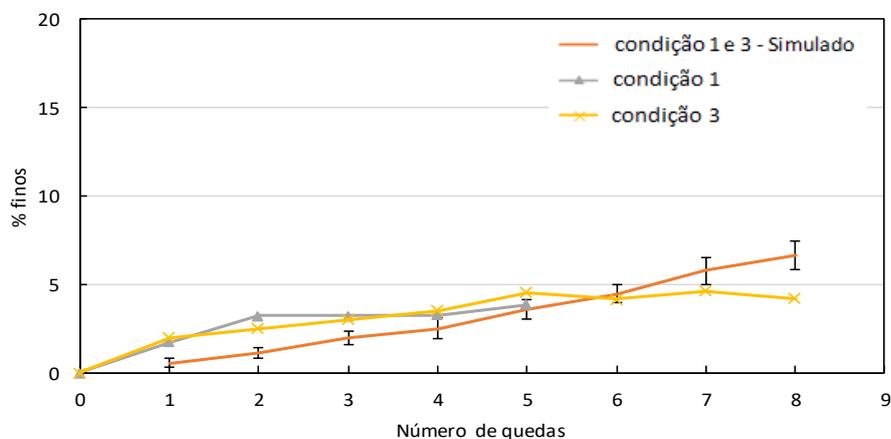


Figura 121 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro com altura de queda de 500 mm (condições 1 e 3)

No caso das simulações com quedas de 800 mm (condições 2 e 4), o resultado gerado pela aplicação do modelo subestimou pela metade o percentual de pelotas quebradas gerados nos ensaios (Figura 122). Embora o resultado aparente não descrever o comportamento das pelotas ensaiadas a esta altura, ainda é prematuro associar a sensibilidade da resposta do MDPV às propriedades de processo das pelotas verdes, tendo em vista sua capacidade de descrever a quebra de pelotas individuais. Assim, estimativas obtidas pelo modelo podem ser consideradas conservadoras em relação àquelas a serem obtidas na sua aplicação na indústria.

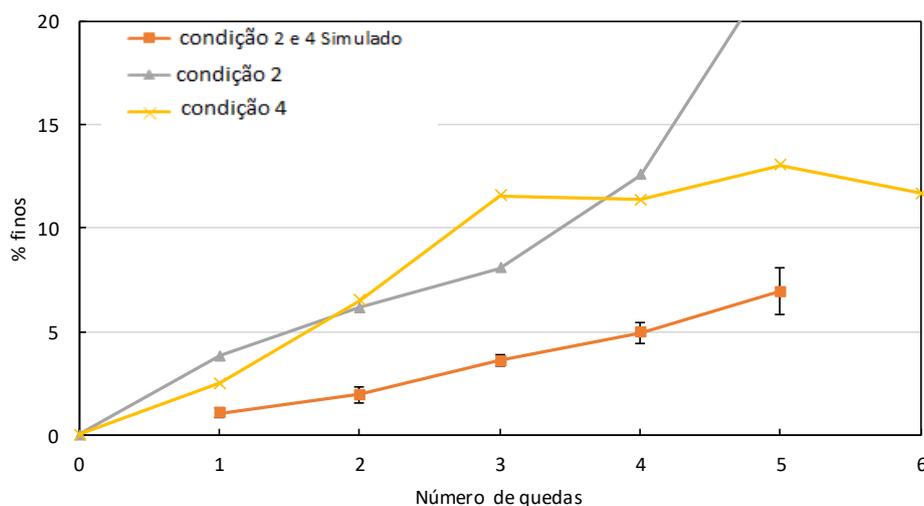


Figura 122 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro com altura de queda de 800 mm (condições 2 e 4)

As simulações das condições 5 e 6 nas quais alterou-se a altura de queda, após o segundo impacto também evidenciaram que o MDPV subestimou a degradação ocorrida com a queda de 800 mm de altura, cujo resultado é apresentado na Figura 123. Entretanto, pode-se observar que na curva simulada a evolução da geração de finos segue praticamente paralela aos resultados experimentais. Observou-se que a subestimação da proporção quebrada também ocorreu nas simulações das condições 7 e 8, como pode ser visto na Figura 124. Cabe ressaltar que o manuseio para devolução das pelotas verdes ao degradômetro durante os ensaios não pode ser simulada, isso pode ter aumentado essa diferença entre a degradação real e a simulação.

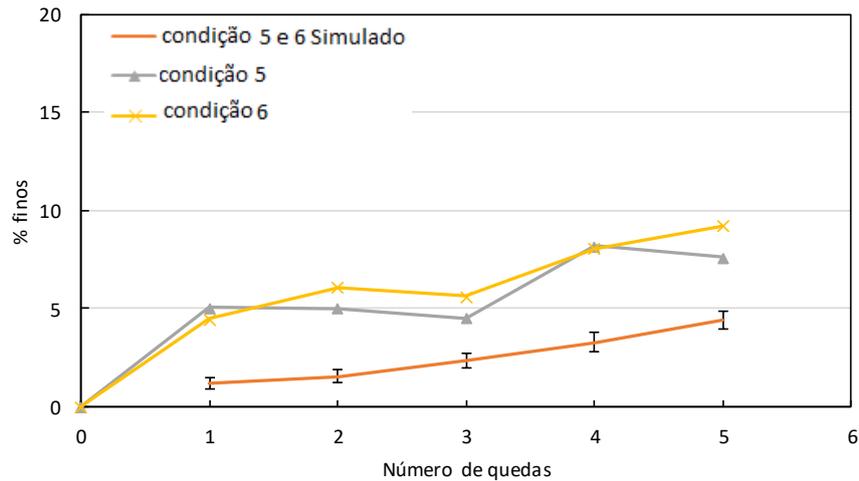


Figura 123 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro no primeiro impacto de 800 mm de altura e seguida por quedas de 500 mm (condições 5 e 6)

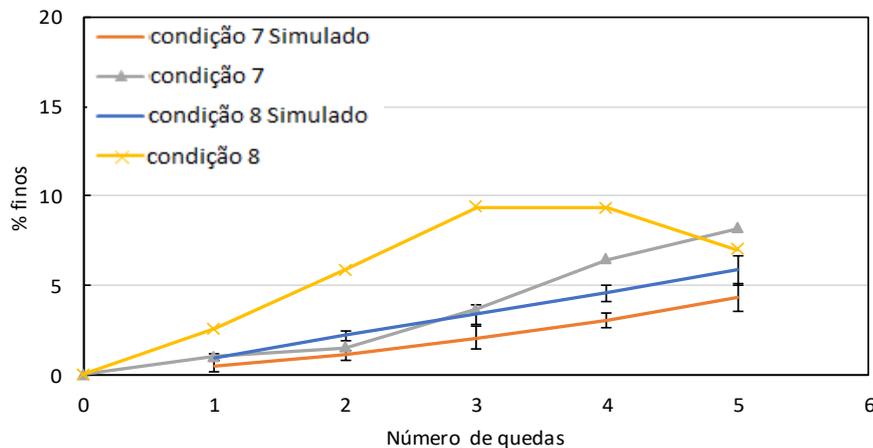


Figura 124 - Resultado da simulação usando o MDPV dos ensaios de degradômetro do condição 7 (3 quedas de 500 mm e 2 quedas de 800 mm) e condição 8 (3 quedas de 800 mm e 2 quedas de 500 mm)

5.5 Estudos de casos industriais usando o MDPV

Para uma avaliação inicial dos resultados gerados pelo MDPV nos estudos de casos foram utilizados dois parâmetros como referência medidos na Usina 5 (seção 4.3): retorno do pelotamento e granulometria do *onsize* da peneira de rolos instalada na saída do disco de pelotamento. Por meio desses parâmetros foi possível avaliar a capacidade de resposta do MDPV quando comparado com as condições em escala industrial. Na comparação do retorno, medido com o simulado, foi possível concluir que o MDPV ficou bem aderente à realidade operacional da Usina 5, principalmente quando se compara o retorno das peneiras dos discos, mostrando uma diferença de apenas de 0,6 pontos percentuais (Tabela 16).

Tabela 16 - Retorno das peneiras de rolos da Usina 5

Região	Medido	Previsto pela simulação
Retorno das peneiras dos discos (%)	17,7	17,1
Retorno da peneira do forno (%)	8,8	5,5

A distribuição granulométrica das pelotas verdes medida após a coleta no *onsize*, também foi condizente aos resultados simulados com MDPV, percebe-se que os valores ficaram muito próximos em todas as faixas de tamanhos. Cabe destacar que em toda amostragem de pelotas verdes, existe complexidade durante o manuseio e peneiramento. Além disso, durante o peneiramento a plasticidade pode fazer com que algumas pelotas passem por malhas inferiores ao seu tamanho médio. Isso pode ter provocado essa diferença entre o medido e o simulado, principalmente nas malhas de 10x16mm que correspondem à maior parte das pelotas produzidas (Figura 125).

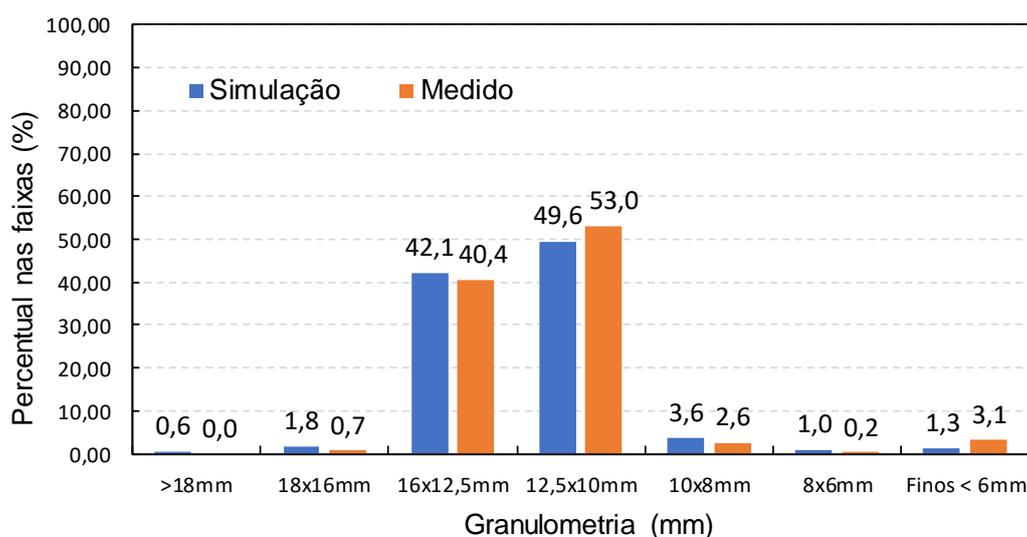


Figura 125 – Distribuição granulométrica das pelotas verdes medida no *onsize* da peneira do disco obtida por amostragem, comparada com o resultado da simulação com o MDPV

A partir dos espectros de colisões gerados para cada um dos pontos de manuseio ou processamento da Usina 5, foi possível identificar a história de colisões de cada uma das pelotas rastreadas nas simulações DEM. Assim, da mesma forma como foi aplicada na simulação dos ensaios de degradação realizados no degradômetro, apresentados na seção 5.4.3, aplicou-se o MDPV aos resultados DEM de cada uma das etapas da operação industrial de pelotamento, desde a saída do disco até a entrada no forno de endurecimento.

Para facilitar o entendimento dos circuitos simulados, os casos BM01 a BM06, descritos na seção 4.6.8, são apresentados de forma resumida na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo dos casos de simulação usando o MDPV em função do tipo de peneira na saída do disco e na entrada do forno

Caso	Peneira do disco	Peneira do forno
BM01	Presente (Caso 2)	Único <i>deck</i> com 9,0 mm (Caso 6)
BM02	Presente (Caso 2)	Duplo <i>deck</i> com <i>oversize</i> em 16 mm e <i>undersize</i> em 9,0 mm (Caso 7)
BM03	Presente (Caso 2)	Duplo <i>deck</i> com <i>oversize</i> em 16 mm e <i>undersize</i> em 9,3 mm (Caso 7 modificado)
BM04	Ausente (Caso 8)	Único <i>deck</i> com 9,0 mm (Caso 6)
BM05	Ausente (Caso 8)	Duplo <i>deck</i> com <i>oversize</i> em 16 mm e <i>undersize</i> em 9,0 mm (Caso 7)
BM06	Ausente (Caso 8)	Duplo <i>deck</i> com <i>oversize</i> em 16 mm e <i>undersize</i> em 9,3 mm (Caso 7 modificado)

A princípio, o intuito foi de avaliar se há alguma diferença entre o circuito existente na Usina 5 (BM01), comparado com outra usina semelhante, a exemplo da Usina 6, também instalada na Vale em Vitória/ES. A Usina 6, além das peneiras dos discos, ainda possui uma peneira de duplo *deck* instalada na entrada do forno (BM02).

Para a realização do estudo de caso, que é o foco deste trabalho, também foram realizadas simulações da Usina 5 sem a peneira na saída dos discos, substituindo a peneira na entrada no forno por uma com duplo *deck* (BM05). Por fim, com o intuito de otimizar somente o peneiramento do duplo *deck*, foram realizadas simulações variando a abertura dos rolos. A alteração no *deck* inferior para 9,3 mm (*undersize*), foi a que apresentou melhores resultados entre os casos simulados, por isso ela foi escolhida como o caso de duplo *deck* modificado (BM06) (Tabela 17).

5.5.1 Análise da degradação de pelotas nas condições atuais da Usina 5

Nessa seção são reportados inicialmente os efeitos relativos à degradação das pelotas de cada etapa simulada, quando considerada individualmente, ou seja, sem efeito de hereditariedade carregado pelas pelotas quando essas passam por várias quedas em seu caminho até o forno na Usina 5. Com esta análise torna possível identificar os pontos mais críticos da operação no que diz respeito à degradação de pelotas verdes, principalmente na geração de finos.

Nos casos de simulação a seguir, os resultados individuais de degradação, considerando as diferentes faixas de tamanhos, são apresentados na Tabela 18. Eles mostram que justamente a primeira etapa no circuito de pelotamento, ou seja, a queda do disco para a correia 5P21, representada pela primeira queda no Caso 2, é a mais agressiva, apresentando percentuais de pelotas degradadas de 14,8 % oriundo da faixa de 8x6 mm e 4,8% oriundos da faixa de 10x8 mm. A segunda etapa mais crítica é a queda de partículas de *onsize* na correia 5P27 (Caso 2, Queda 4), sugerindo os potenciais benefícios em substituir a peneira de rolos do disco por um sistema de correias como aquele simulado no Caso 8 (seção 4.6.7).

Tabela 18 – Percentual de finos gerados em cada queda e sua granulometria de origem

Caso	Queda	Faixa de origem dos finos gerados (%)				
		19x16mm	16x12,5mm	12,5x10mm	10x8mm	8x6mm
2	1	0,0	0,2	1,0	4,8	14,8
2	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	3	0,0	0,0	0,3	4,3	3,2
2	4	0,0	0,0	1,1	2,6	9,0
3	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
4	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
5	7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9
6	8	0,8	0,5	1,1	1,8	1,9
6	9	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
6	10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3
7	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
7	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
8	1	0,0	0,0	0,3	0,6	4,7
8	2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
8	3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2
8	4	0,0	0,0	0,0	0,3	1,9
8	5	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1

O percentual total de finos gerados para cada um dos casos simulados, que foram descritos na seção 4.6, é exposto na Figura 126, adotando-se um código para representação da simulação dado por Caso/Queda. Assim, 2/1 é o código dado à simulação DEM do Caso 2 e que calcula a Queda 1. Cabe destacar que as quedas mais agressivas, ou seja, com maiores percentuais de finos gerados foram as quedas das pelotas do disco para a correia 5P21 (2/1), o *onsize* sobre a correia 5P27 (2/4) e a alimentação da

peneira antes do forno, queda da correia 5P31 passando pelo defletor de PEAD até os rolos da 5P32 (6/8).

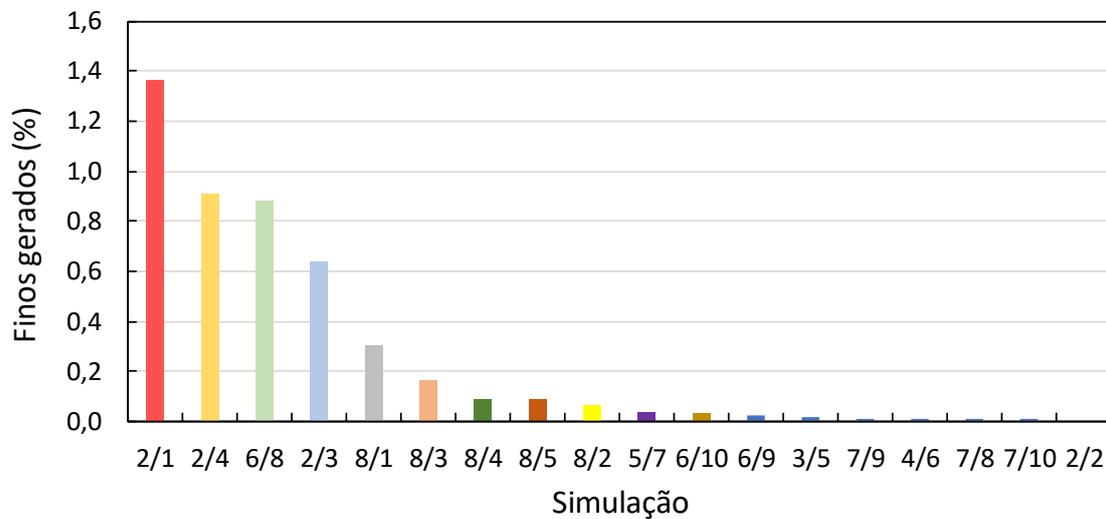


Figura 126 – Diagrama de Pareto dos percentuais de finos totais gerados nas diversas quedas durante a passagem das pelotas pelo circuito da Usina 5, obtidos por simulação

Embora esses resultados sirvam de base para identificar os pontos mais críticos do circuito, devem ser usados com cautela, pois o MDPV considera a história de colisões da pelota entre as operações de manuseio. Desta forma, espera-se que maiores percentuais de finos gerados, ou pelotas quebradas, sejam obtidos ao simular as operações em sequência.

Um resumo do balanço de massa considerando a hereditariedade das pelotas é apresentado na (Tabela 19). Neste caso, o percentual de finos gerado pela degradação de pelotas verdes ao chegar na peneira de rolos do disco foi de 5,7%. Como o modelo de partição das peneiras considera que qualquer fino gerado é reportado ao *undersize*, as pelotas iniciam a queda no *onsize* sem qualquer presença de finos. Após as pelotas sofrerem queda na correia de *onsize* 5P27, o percentual de finos por degradação foi de 3,1%, totalizando a geração de finos acumulada de 8,8% até esse momento.

Considerado o total de degradação sofrida pelas pelotas até a chegada no forno, esse número atinge o patamar de 11,5% do total de pelotas que entram no sistema, composto por 5,7% até a peneira do disco, somado a 5,8% chegando na peneira do forno (5P32). Ressalta-se que boa parte desses finos é removida nas operações de peneiramento, tanto na saída do disco quanto na entrada do forno. Efetivamente, o MDPV prevê um rendimento de pelotas entrando no forno de 77,4%, deste percentual somente 0,2% são de finos, ou seja, menores que 6 mm (Tabela 19).

Tabela 19 – Distribuições granulométricas do circuito atual da Usina 5, com peneira de rolos na saída dos discos (*undersize* 9 mm e *oversize* 16 mm), e com um único *deck* na entrada do forno com *undersize* em 9 mm (BM01)

Número da queda	1	3	4	5	6	7	8	10
Localização	5P21	Peneira de rolos	Correia 5P27 (queda <i>Onsize</i>)	5P29	5P30	5P31	5P32	Carro de grelha
Pelotas >18mm (%)	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pelotas 16x18mm (%)	1,8	1,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Pelotas 12,5x16mm (%)	35,4	35,0	40,4	40,3	40,1	40,0	39,7	42,5
Pelotas 10x 12,5mm (%)	47,2	45,8	53,0	52,6	52,2	51,9	51,2	54,7
Pelotas 8x10mm (%)	8,7	7,9	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	1,9
Pelotas 6x8mm (%)	2,3	2,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Finos < 6mm (%)	3,0	5,7	3,1	3,7	4,3	4,7	5,8	0,2
Rendimento (%)	100,0	100,0	82,9	82,9	82,9	82,9	82,9	77,4

5.5.2 Avaliação do impacto da retirada da peneira do disco

Existem algumas controvérsias sobre os reais benefícios da operação de peneiramento na saída dos discos. Isso é evidenciado pelo fato que existem usinas em operações na pelotização da Vale S.A. que não possuem esta etapa de classificação em seu circuito de pelotamento. Nesses casos, a remoção dos finos e pelotas acima do tamanho desejado gerados no pelotamento é realizada exclusivamente na peneira instalada na entrada do forno de endurecimento, a qual tipicamente possui duplo *deck*.

Com o DEM é possível medir as energias envolvidas nas colisões entre partículas e avaliar o efeito das diferentes geometrias relativas aos circuitos de transporte e manuseio. Inicialmente o caso a ser comparado ao cenário simulado BM01 é aquele em que a peneira de rolos do disco é substituída por um sistema de correias, sem a utilização de peneira (BM05). Neste caso, como não há remoção prévia das pelotas consideradas *undersize* e *oversize*, o peneiramento na entrada do forno precisa ser capaz de remover essas pelotas, ou seja, a peneira de único *deck* foi substituída por uma de duplo *deck*. No caso BM05 os resultados mostraram um rendimento na entrada do forno de 87,4 %, com um percentual acumulado de finos de degradação somente de 4,1 % chegando na correia 5P31 (Tabela 20).

Ainda da Tabela 20, que mostra a evolução da granulometria e rendimento após as etapas principais de queda do circuito, percebe-se que a classificação na peneira de rolos duplo *deck* do caso BM05 foi capaz de remover as pelotas maiores que 18 mm, que estavam presentes desde a alimentação, e que não sofreram degradação durante sua

passagem pelo circuito de manuseio. Pode-se destacar que o percentual de degradação das pelotas, durante a passagem pelas correias que substituíram a peneira do disco, neste caso gerou apenas 3,1% sem existência de queda *onsize* (Figura 99). Neste mesmo ponto, no caso com peneira de rolos, a degradação foi de 5,7% somado a 3,1% gerados na queda do *onsize*, totalizando 8,8% de finos (BM01). Além disso, a condição original da Usina 5, simulada no caso BM01, apresentou menor rendimento em relação ao caso BM05: 77,4% contra 87,4% com sensível redução de finos, porém as pelotas de 10x16 mm caíram 3,6 pontos percentuais no caso BM05.

Tabela 20 – Distribuições granulométricas do circuito modificado da Usina 5, sem a peneira na saída dos discos e com duplo *deck* na entrada do forno (*undersize* com 9 mm e *oversize* com 16 mm) (BM05)

Número da queda	1	2	3	5	6	7	8	10
Localização	5P21	Correia	Correia 5P27	5P29	5P30	5P31	5P32	Carro de grelha
Pelotas >18mm (%)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	0,0
Pelotas 16x18mm (%)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
Pelotas 12,5x16mm (%)	35,4	35,4	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	40,2
Pelotas 10x12,5mm (%)	47,2	47,2	47,2	47,1	46,9	46,8	46,8	53,4
Pelotas 8x10mm (%)	8,7	8,7	8,7	8,5	8,5	8,4	8,4	4,1
Pelotas 6x8mm (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	0,3
Finos < 6mm (%)	3,0	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,1	0,1
Rendimento (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	87,4

Com o intuito de aumentar o percentual de pelotas de 10x16mm entre os casos sem peneira, foram realizadas outras simulações, variando somente a abertura entre os rolos da peneira de duplo *deck* do caso BM05. Deste modo surgiu uma nova condição denominada BM06. Essa condição apresentou bons resultados com modificação somente no *undersize*, alterando a abertura entre os rolos de 9,0 para 9,3 mm.

5.5.3 Análise comparativa dos vários cenários simulados

Analisando os resultados apresentados na (Tabela 21). O conjunto formado pelas três simulações com peneiras na saída do disco (BM01, BM02 e BM3) apresentou resultados semelhantes, mostrando pouca sensibilidade ao tipo de peneira instalada na

entrada do forno. Ainda assim, o caso BM03, simulado com peneira de rolos nos discos, e peneira de duplo *deck* no forno (*undersize* em 9,3 mm), apresentou, dentre os três casos, uma pequena redução nas pelotas de 6x8mm (0,9%) e um pequeno acréscimo na faixa de pelotas de 10x16 mm (98,2%) ao se comparar aos casos BM01 e BM02.

Quando se retiram as peneiras na saída dos discos deixando no forno somente um único *deck* para retirada do *undersize* (BM04), todas as pelotas grandes entrariam no forno, de forma que a proporção de pelotas de 16x18mm subiria para 2,0% e o percentual de pelotas de 10x16 mm cairia para 91,7%.

Tabela 21 - Circuitos de pelotas verdes simulados com o MDPV

Caso	BM01	BM02	BM03	BM04	BM05	BM06
Tipo de peneira no Disco	Com peneira	Com peneira	Com peneira	Sem peneira	Sem peneira	Sem peneira
Tipo de peneira no Forno	Único <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i> (<i>undersize</i> 9,3 mm)	Único <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i> (<i>undersize</i> 9,3 mm)
Pelotas 8x18mm (%)	99,8	99,9	99,9	97,7	99,5	99,7
Pelotas 10x16mm (%)	97,2	97,5	98,2	91,7	93,6	94,7
Pelotas 16x18mm (%)	0,7	0,8	0,8	2,0	1,9	1,9
Pelotas 12,5x16mm (%)	42,5	44,0	44,2	39,6	40,2	40,7
Pelotas 10x12,5mm (%)	54,7	53,6	53,9	52,2	53,4	54,0
Pelotas 8x10mm (%)	1,9	1,5	0,9	3,9	4,1	3,1
Pelotas 6x8mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2
Finos < 6 mm (%)	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Rendimento no forno (%)	77,4	77,3	76,8	88,5	87,4	86,4

Ao se comparar as distribuições granulométricas, os rendimentos das pelotas que chegam ao carro de grelha no forno, bem como os percentuais de retorno e finos totais gerados nas simulações dos seis casos, pode-se observar que o caso simulado BM04 foi o que apresentou o maior rendimento (88,5%) (Tabela 21). Cabe ressaltar que neste caso todas as pelotas maiores que 9 mm (*undersize*), as quais não se degradaram durante o trajeto, entrariam no forno. Isso ocorre, inclusive, com aquelas comumente chamadas de “rainhas” no jargão da usina, as quais podem medir até 200 mm de diâmetro.

Ao se analisar os fluxos mássicos considerando uma base de 100 t/h para a produção de pelotas no disco (Tabela 22), a média dos rendimentos que chegam ao forno vai de 77,2 t/h, para os casos com utilização de peneira na saída do disco (BM01, BM02 e BM03) para cerca de 87,4 t/h quando essa peneira não se encontra presente (BM04, BM05

e BM06). Considerando os sete discos implantados na Usina 5, o aumento de produção no pelotamento seria da ordem de 71,4 t/h de pelotas disponíveis para o forno. Entretanto, os casos sem a peneira no disco introduziriam no forno uma pequena fração de pelotas de 6x8 mm quando comparado aos casos com peneira no disco: cerca de 0,3 t/h.

Com a otimização na peneira duplo *deck*, aumentando a abertura do *deck* inferior para 9,3 mm (BM06), pode-se obter um aumento de pelotas de 10x16 mm: 94,7 t/h contra 93,6 t/h do caso BM05. Ainda na comparação do caso BM05 com o duplo *deck* otimizado (BM06) a proporção de pelotas na granulometria de 6x8mm e o percentual de finos reduziram em 0,1 t/h (Tabela 22).

Tabela 22 - Rendimentos do processo considerando uma base de produção de pelotas em um único disco igual a 100 t/h

Caso	BM01	BM02	BM03	BM04	BM05	BM06
Tipo de peneira no Disco	Com peneira	Com peneira	Com peneira	Sem peneira	Sem peneira	Sem peneira
Tipo de peneira no Forno	Único <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i> (<i>under-size</i> 9,3 mm)	Único <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i>	Duplo <i>deck</i> (<i>under-size</i> 9,3 mm)
Produção	t/h	t/h	t/h	t/h	t/h	t/h
Pelotas 8x18mm	99,8	99,9	99,9	97,7	99,5	99,7
Pelotas 10x16mm	97,2	97,5	98,2	91,7	93,6	94,7
Pelotas 16x18mm	0,7	0,8	0,8	2,0	1,9	1,9
Pelotas 6 x 8 mm	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2
Finos < 6 mm	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Rendimento no forno	77,4	77,3	76,8	88,5	87,4	86,4
Retorno peneira disco	17,1	18,6	18,6	-	-	-
Retorno peneira forno	5,5	4,1	4,6	11,5	12,6	13,6
Retorno Total	22,6	22,7	23,2	11,5	12,6	13,6

Ainda na Tabela 22 para uma base de 100 t/h por disco (sete discos), quando se compara somente o caso nas configurações atuais da Usina 5 (BM01), com o caso otimizado sem peneira nos discos (BM06), percebe-se uma redução significativa no retorno total do pelotamento, de 22,6 t/h para 13,6 t/h. Com a redução do retorno, o rendimento do pelotamento aumentaria de 77,4 t/h para 86,4 t/h. Considerando os sete discos em operação, isto significa que o pelotamento disponibiliza 63 t/h de produção a mais para o forno e com menos finos, porém com acréscimos de 1,4 t/h de pelotas na faixa de 6x8mm e 13,3 t/h de 16x18mm.

Outra opção seria manter a produção na usina, e reduzir em 63 t/h a alimentação de

minério no pelotamento. Com isso aumentar o tempo de rolamento das pelotas nos discos, e conseqüentemente melhorariam as propriedades físicas das pelotas verdes e queimadas.

É importante frisar que em nenhum dos casos estudados, sem a peneira dos discos e com duplo *deck* no forno, o percentual de pelotas na faixa de 8x18mm seria afetado.

6. CONCLUSÕES

Esta pesquisa compreendeu diversas etapas, sendo elas: o estudo da quebra de pelotas verdes produzidas em laboratório, o desenvolvimento de um modelo de degradação de pelotas verdes (MDPV), o escaneamento e tratamento em CAD do circuito de pelotamento, a realização de simulações DEM das operações de manuseio e processamento da Usina 5 da Vale S.A. na Unidade de Tubarão, finalizando com estudos de casos com o objetivo de avaliar o impacto da remoção da peneira do disco no circuito.

Neste estudo foi criado um modelo matemático inovador, capaz de descrever os efeitos da altura de queda, do ângulo de impacto, da superfície e ainda do tamanho de pelota. O modelo leva em consideração a resiliência das pelotas recém produzidas, que demandam uma certa altura mínima para ativação das trincas (“energia de ativação”), bem como a variabilidade do comportamento de pelotas contidas no mesmo lote. O MDPV, inicialmente calibrado a partir dos dados de quebra de pelotas produzidas em laboratório, precisou ser parcialmente recalibrado considerando resultados de impactos de pelotas industriais, as quais apresentaram superior resistência. Esse modelo foi, então, validado comparando-se os resultados previstos àqueles medidos usando o degradômetro, obtendo-se boa correspondência.

A construção do degradômetro foi de suma importância para validar os primeiros resultados de degradação de pelotas gerados pelo MDPV, visto que os testes atualmente realizados avaliam somente quedas individuais. Em planta piloto não havia um ensaio controlado para validação da degradação durante a queda de múltiplas pelotas, ou seja, para avaliação do impacto da massa de pelotas sobre elas mesmas e sobre as superfícies de contato, e o quanto isso impactaria na geração de finos.

A coleta e peneiramento das pelotas verdes no circuito do disco foi extremamente desafiadora, mais importante para validação dos resultados em escala industrial. Através da comparação dos resultados medidos com os simulados, foi possível avaliar o quanto o MDPV estava aderente com os resultados gerados na peneira de rolos do disco (*onsize*). Deste modo pode-se simular os demais circuitos com boa confiabilidade.

As simulações combinando o DEM com o MDPV mostraram que a passagem das pelotas verdes, tanto pela peneira de rolos, quando no descarregamento para o *onsize* geram uma quantidade relevante de finos por degradação. Os estudos mostraram que no caso em que a peneira é substituída por correias transportadoras a geração de finos é consideravelmente reduzida (BM05). Outras simulações DEM do circuito da usina 5

foram realizadas, as quais mostraram que, excetuando-se a queda das pelotas recém-produzidas no disco de pelotamento, o ponto de maior severidade do circuito foi a descarga do produto *onsize* da peneira do disco, e em seguida a queda das pelotas alimentadas na peneira de único *deck* no forno (BM01). O ângulo de impacto mostrou um efeito significativo na degradação de pelotas, com ângulos agudos se mostrando mais prejudiciais que ângulos retos, o que sugere que esforços que buscam evitar impactos normais nem sempre serão recompensados com menor degradação das pelotas.

As simulações também mostraram que a diferença existente entre os *layouts* dos circuitos de pelotamento das Usinas 5 e 6 tem pouco efeito nos resultados de degradação e granulometria pós peneiramento. Isso indica que, se um circuito contempla peneira de rolos na saída do disco, não há benefício significativo em se utilizar peneira de duplo *deck* na alimentação do forno.

Os estudos de caso permitiram comparar desempenho do circuito atual usado na Usina 5 ao circuito hipotético no qual a peneira do disco seria substituída por um transportador de correia, reduzindo significativamente a severidade dos choques sofridos pelas pelotas verdes. Os resultados mostraram um potencial aumento de produção na usina, embora um reduzido percentual de pelotas de 6x8mm e 16x18mm cheguem à alimentação do forno. A alteração da abertura do *undersize* da peneira de duplo *deck* para 9,3 mm no caso sem peneira (BM06) apontou um aumento no percentual de pelotas de 10x16 mm com redução sensível no percentual de finos do material que entra no forno.

Por fim, um resultado importante gerado pelo estudo DEM com o MDPV foi que no caso sem a presença da peneira nos discos (BM05 e BM06), somente a peneira de duplo *deck* foi capaz de realizar a separação de todas as pelotas produzidas no pelotamento, entregando uma distribuição de tamanhos de pelotas adequadas ao forno. Além disso, a redução do retorno total do pelotamento permitiria aumentar a disponibilidade de pelotas para o forno. Outra possibilidade seria manter a produção da usina, reduzindo a taxa de alimentação de minério nos discos. Essa redução provavelmente implicaria na melhora da qualidade física das pelotas, em decorrência do aumento no tempo de rolamento.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda que tenha alcançado resultados absolutamente inovadores para a Vale S.A., bem como para a indústria de pelletização mundial, algumas oportunidades foram identificadas para avanço nessa importante linha de desenvolvimento:

- Desenvolvimento de simulador de circuito de pelotamento: a partir do modelo matemático das peneiras, bem como da criação de banco de dados de operações de transferência de pelotas verdes. Esse simulador permitiria ao engenheiro da Vale S.A. simular diferentes configurações atuais e futuras de circuitos envolvendo operações de manuseio e classificação de pelotas verdes. Essa ferramenta poderia se transformar num importante assistente à tomada de decisão de projetos de capital, bem como de decisões quanto à operação dos circuitos de pelotamento.
- Sensibilidade do modelo às características das pelotas: o estudo realizado demonstrou ser capaz de capturar o comportamento de pelotas produzidas segundo condições específicas de processo. Sabe-se que variáveis como teor de umidade, dosagem de bentonita e finura (*Blaine*) do *pellet feed*, bem como uso de aglomerantes alternativos, têm impacto potencial nas características de quebra de pelotas verdes. Um estudo focado na investigação dessas variáveis poderia ampliar ainda mais a aplicabilidade da modelagem desenvolvida, bem como do simulador de degradação/classificação proposto.
- Validação do modelo de previsão da resistência de pelotas queimadas: a partir da constatação realizada no presente projeto de que o dano residual das pelotas durante o seu manuseio tem influência na resistência à degradação após a queima, propõe-se desenvolver um modelo que permita inferir a resistência das pelotas queimadas a partir das características das pelotas verdes, do seu histórico durante as operações de manuseio, bem como das variáveis de operação do forno de endurecimento.
- Os estudos de casos simulados com o MDPV permitiram mapear algumas oportunidades de otimização nos circuitos. Uma modificação relevante que poderia ser realizada na Usina 5 é a elevação da posição da correia 5P21, de modo a aproximá-la mais da descarga do disco, reduzindo, portanto, a altura de queda e minimizando a degradação das pelotas nessa etapa. Além disso, no caso da simulação BM01, identificou-se que um ponto crítico para a degradação das

pelotas ocorre na queda 8, na qual as pelotas são alimentadas da correia 5P31 à peneira do forno 5P32 por uma rampa. A alimentação da peneira 5P32 pode ser melhorada através de ajustes no formato e posição do defletor de PEAD de modo que queda das pelotas sobre os primeiros rolos da peneira possa ser suavizada reduzindo assim a sua degradação.

- Como não foi detectada diferença entre os desempenhos dos circuitos das Usina 5 e 6, ou seja, configuração de peneira do forno de único deck contra peneira de duplo *deck*, cabe avaliar se realmente há necessidade de utilização da peneira duplo *deck* em circuitos de pelotamento que possuem peneiras instaladas da saída dos discos de pelotamento.
- Sobre o estudo para retirada das peneiras dos discos, cabe lembrar que a Vale S.A. possui uma patente de um sistema de duplo pelotamento, que consiste na instalação de uma espécie de tambor no lugar da peneira de rolos do disco. A conclusão desse estudo seria de grande interesse para avaliar os benefícios da retirada da peneira, além disso, promover um segundo rolamento para melhorar as propriedades físicas das pelotas verdes e queimadas.

8. REFERÊNCIAS

- ABOUZEID, A.Z.M., SEDDIK, A.A. Effect of Iron Ore Properties on its Balling Behaviour. *Powder Technology*, v. 29, pp. 233 - 441, 1981.
- ALMEIDA, R.F., Degradação mecânica de pelotas verdes de minério de ferro. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- ARAÚJO, L.A. Manual de siderurgia. São Paulo: Art & Ciência Editora, 2005.
- ARIS, R., Ends and Beginnings in the Mathematical Modelling of Chemical Engineering Systems, *Chemical Engineering Science*, v. 48. n. 14, pp. 2507-2517, 1993.
- ATHAYDE, M., NUNES, S.F.; BAGATINI, M.C. A case study of pellet size fraction influence on pelletizing operation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 39, n. 4, pp. 276-283, 2018.
- BOECHAT, F.O. Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro em fornos de redução direta usando o método dos elementos discretos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.
- CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M. Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model. *Minerals Engineering*, v. 43–44, pp. 91–101, 2013.
- CASAGRANDE, C., LIBARDI, B., PILON., R. Influência da mineralogia no processo de moagem e qualidade da pelota com uso de data analytics. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS 2017, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 5, 2017, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo: ABM Week, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/Emile%20Recla/Downloads/30563.pdf> Acesso em: 10 mar. 2018.
- CASEY, L. Organic binders for iron ore pelletization. School of Chemical Technology. Degree Programme of Chemical Technology. Aalto University, 2016.
- CAVALCANTI, P.P., CARVALHO, R.M., CHAGAS, A.S., SILVEIRA, M.W., TAVARES, L.M. Surface breakage of fired iron ore pellets by impact. *Powder Technology*, v. 342, pp. 735–743, 2019.
- CAVALCANTI, P.P., PETIT, H.A., THOMAZINI, A.D., CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M. Modeling of degradation by impact of individual iron ore pellets. *Powder Technology*, v. 378, pp. 795-807, 2020.
- CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L. Discrete numerical model for granular assemblies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, v. 29, n. 1, pp. 47-65, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91211-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(79)91211-7), 1979.

CUNHA, E.R. Modelagem mecanicista de britadores de impacto de eixo vertical. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FAVIER, J.F., ABBASPOUR-FARD, M.H., KREMMER, M. Modeling nonspherical particles using multisphere discrete elements. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, v. 127, pp. 971–977, 2001.

FORSMO, S.P.E., SAMSKOG, P.O., BJÖRKMAN, B.M.T., A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*, v. 181, n. 3, pp. 321–330, 2008.

GRAÇA, L.M., LAGOEIRO, L. E., LIMA, R.M.F., BARBOSA P.F., MACHADO, M.M. Effect of the morphological types in grinding of iron-ore products. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 36, n. 5, pp. 324-331. 2015.

GRIMA, A., WYPYCH, P. Discrete element simulation of a conveyor impact-plate transfer: calibration, validation and scale-up, In: *Australian Bulk Handling Review*, pp. 64-72, 2010.

GRIMA, A.P., WYPYCH, P.W. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle–structure interactions under impact conditions. *Powder Technology*, v. 212, pp. 198–209, 2011.

HAO, X., ANA, H., S, XIAOQI., Z., WEIQIONG. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: from network perspective. *Resources Policy*, v. 57, pp. 45-54, 2018.

HEYDARI, M., AMIRFATTAHI, R., NAZARI, B., RAHIMI, P. An industrial image processing-based approach for estimation of iron ore green pellet size distribution. *Powder Technology*, v. 303, pp. 260-268, 2016.

IVESON, S.M., LITSTER, J.D., HAPGOOD, K., ENNIS, B.J. Nucleation, growth, and breakage phenomena in agitated wet granulation process: a review. *Powder Technology*, v. 303, pp. 260-268, 2001.

JOHNSON, K. L., KENDALL, K., AND ROBERTS, A. D. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 324, pp. 301–313, 1971.

KAPUR, P.C., FUERSTENAU, D.W. Kinetics of Green Pelettization. *Transactions of AIME*, v. 229, pp. 348-466, 1964.

KAWATRA, S.K., RIPKE, S.J. Effects of bentonite fiber formation in iron ore palletization. *International Journal of Mineral Processing*, v. 65, n. 3-4, pp. 141-149, 2002.

LIMA, R.F. Modelagem matemática do escoamento de grãos de soja em um secador com fluxo misto usando o método dos elementos discretos. 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Matemática da Universidade Regional do Noroeste do

Estado do Rio Grande do Sul, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

MARTINS, M. Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

MAZZINGHY, D.B. Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Dusseldorf: Verlag Stahleisen mbH, 1980.

MEYER, M., LAGOEIRO L.E., GRAÇA L. M., SILVA, C.J. Phase and microstructural characterization of iron ore pellet and their relation with cold crushing strength test. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 37, n. 5, pp. 295-304, 2016.

MINDLIN, R. D., Compliance of elastic bodies in contact. Journal of Applied Mechanics, v. 71, pp. 259-268, 1949.

MORAES, S. L., LIMA, J. R. B., FERREIRA NETO, J. B. Influência de agentes coloidisantes no processo de pelotização de minério de ferro. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 45, 2015, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 16, 2015, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 3, 2015, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: ABM Week, 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Emile%20Recla/Downloads/26806.pdf>. Acesso em: 10 maio 2018.

MOURÃO, M.B. Introdução à siderurgia. São Paulo: ABM, 2007. NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO BRASIL (NMB) <<https://www.noticiasdemineracao.com/externo/news>>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

NORGATE, T.E., TOMPSITT, D.F., BATTERHAM, R.J. Computer simulation of the degradation of lump ores during transportation and handling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, 2, Anais... CT: Institution of Engineers, Australia, p. 20-24, 1986

O'SULLIVAN, C. Particle-based discrete element modeling: Geomechanics perspective. International Journal of Geomechanics, v. 11, pp. 449-464, 2011.

PANDEY, P., LOBO, N.F., KUMAR, P. Optimization of Disc Parameters Producing More Suitable Size Range of Green Pellets. International Journal of Metallurgical Engineering, v.1, n. 4, pp. 48-59, 2012.

PAVANI, R.C., CASAGRANDE, C., JÚLIO S.S. Influência do minério do complexo minas centrais nos processos de moagem e pelotamento. Faculdade do Centro Leste. Serra, ES, 2018.

PETROVICK, G. F., PETROVICK, P.R., BASSANI, V.L. Granulação em leito fluidizado. *Caderno de Farmácia*, v. 22, n. 2, p. 107-118, 2006.

QIANGFENG, L., TAO, D., GAOSHANG, W., JINHUA, C., WEIQIONG, Z., BOJIE W., LIANG, L. Iron material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2010 to 2015. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 1807-1813, 2018.

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

SANTOS, L.E., BRANDÃO P. Variações mineralógicas, morfológicas e micro estruturais em minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG e suas Implicações no processo mineral. In *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO*, 4, 2003.

SASTRY, K.V.S., FUERSTENAU, D.W. Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. *Powder Technology*, v. 7, n. 2, pp. 97-105, 1973.

SILVA, B.B. CUNHA, E.R., CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M. Modelling and optimization of green pellets classification on roller screens using the discrete element method. *Powder Technology*, v. 332, pp. 359–370, 2018.

SILVA, B.B., CUNHA, E.R., CARVALHO R.M., TAVARES, L.M. Improvement in roller screening of green iron ore pellets by statistical analysis and discrete element simulations. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, DOI: 10.1080/08827508, 41:5, pp. 323–334, 2020.

SILVEIRA, M.A.C.W. Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte. Dissertação (mestrado). 2012. Programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SITHARAM, T. Numerical simulation of particulate materials using discrete element modelling. *Current science*, v. 78, n. 7, pp. 876-886, 2000.

SODRÉ, U. Modelos matemáticos. Londrina: UEL, p. 3-8, 2007.

SUSHANTA, M., PRADEEPKUMAR, V. N., VENKATARAMANA, R. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate. *Computers and Chemical Engineering*, v. 33, pp. 1141–1152, 2009.

TAMFELT. Curso avançado de Filtragem. Seminário de filtragem, Vitória- ES, 2005.

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

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

- TAVARES, L. M. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation, *Powder Technology*, v. 190, pp. 327–339, 2009.
- TAVARES, L.M., ALMEIDA, R.F. Breakage of green iron ore pellets. *Powder Technology*, v. 366, pp. 497-507, 2020.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M. Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics. *International Journal of Mineral Processing*, v. 101, pp. 21–27, 2012.
- TAVARES, L.M., CAVALCANTI, P.C., CARVALHO, R.M., SILVEIRA, M.W., BIANCHI, M., OTAVIANO, M. Fracture probability and fragment size distribution of fired Iron ore pellets by impact. *Powder Technology*, v. 336, pp. 546–554, 2018.
- TAVARES, L.M., KING, R.P. Single-particle fracture under impact loading. *Powder Technology*, v. 54, n.1, pp. 1-28, 1998.
- TAVARES, L.M., KING, R.P. Modeling particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics, *Powder Technology*, v. 124, n. 2-3, pp. 138-146, 2002.
- TAVARES, L.M.M., LIMA, S.L. Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 2: Fratura de partículas. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v.59, n.2, pp. 165-172, 2006.
- TAVARES, L.M.M., CUNHA, E.R., ALMEIDA, S.L. Influência de variáveis operacionais no desempenho de classificador aerodinâmico. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 60, n. 3, p. 497-503, 2007.
- TEO, C.S., WATERS, A.G., NICOL, S.K. Quantification of the breakage of lump materials during handling operations. *International Journal of Mineral Processing*, v. 30, n. 3-4, pp. 159-184, 1990.
- VALE S.A. Diagnóstico dos pelotamentos das usinas 1 a 7. Espírito Santo: Vale S.A., 2008a.
- VALE S.A. Manual de operação do pelotamento. Espírito Santo, p. 9-13, 2011.
- VALE S.A. Produção e vendas da Vale. Agência Vale. Disponível em:< <http://www.vale.com/brasil>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- VALE S.A. Relatório de modificação da inclinação das peneiras de rolos na Usina de Pelotização de Vargem Grande. Gerência Geral de Operações das Usinas de Pelotização de Fábrica e Vargem Grande, 2008b.
- WEEDON, D.M., WILSON, F. Modelling iron ore degradation using a twin pendulum breakage device. *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, n. 3, pp. 195–213, 2000.

WANG, D., SERVIN, M; BERGLUND, T., MICKELSSON, K.-O., RÖNNBÄCK, S.
Parametrization and validation of a nonsmooth discrete element method for simulating
flows of iron ore green pellets. Powder Technology, v. 283, pp. 475-487, 2015.