

MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO CARREGAMENTO DE ALTOS-FORNOS BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

BRUNO PINHEIRO DA SILVA

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

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro

Julho de 2020

MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO CARREGAMENTO DE ALTOS-FORNOS
BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

BRUNO PINHEIRO DA SILVA

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

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

Aprovada por: Ismael Vembrame Flores, D.Sc.

Jose Adilson de Castro, Ph.D.

Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2020

Silva, Bruno Pinheiro da

Modelagem fenomenológica do carregamento de altos-fornos baseada no método dos elementos discretos / Bruno Pinheiro da Silva. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020.

XXII, 126p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

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

Referências Bibliográficas: p. 123-126.

1. Método dos elementos discretos. 2. Alto-Forno.
3. Distribuição de carga. I. Carvalho, Rodrigo Magalhães de.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

À minha esposa Mariana, pelo companheirismo
e apoio nesse processo que chamamos de vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me dar força para enfrentar todos os obstáculos.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho por todo ensino e contribuição que tem sido além da minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Tecnologia Mineral por todo o apoio nos ensaios e contribuições para a realização desse trabalho.

Estendo meus agradecimentos ao Dr. Emerson Reikdal por todo o suporte e ensinamentos nesse projeto e ao Rangler por todo o apoio dado.

Agradeço também aos meus amigos por todo suporte e contribuição na minha formação em todos os aspectos, em especial, ao engenheiro especialista em altos-fornos Fernando Fujihara por ter contribuído tanto em minha formação.

Por fim, manifesto minha gratidão àqueles que me apoiaram incondicionalmente: minha família; em especial, minha mãe por suas incontáveis orações, meu irmão por sempre me encorajar e meus sogros, Rosangela e Magno por compartilharem as alegrias e tristezas de minha jornada.

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

MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO CARREGAMENTO DE ALTOS-FORNOS BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Bruno Pinheiro da Silva

Julho/2020

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A distribuição de carga é uma das etapas mais importante no processo de redução via alto-forno. No sistema BLT, bateladas de matérias-primas metálicas e de coque são alimentadas ao alto-forno de forma alternada. Conhecer a como as matérias primas se dispõem no topo dos altos-fornos é de suma importância. Informações detalhadas como segregação, distribuição de tamanhos de partícula, mistura metálica, relação minério-coque permite avaliar o desempenho do alto-forno, entretanto a medição desses parâmetros em tempo real é de difícil realização. Para isso normalmente conta-se com modelos de carregamento simplificados baseados no volume e posição da calha rotativa. O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo preditivo para estudo e otimização da distribuição de carga de um alto-forno dotado de um topo tipo BLT (Bell less Top), para isso foram utilizadas simulações do carregamento do alto-forno com o método dos elementos discretos (DEM). Os parâmetros de contato usados nas simulações DEM foram calibrados para coque e sinter, e verificados a partir de dados da literatura no caso das partículas de pelotas e minério de ferro. O presente trabalho demandou a construção de um modelo virtual realista do sistema de um alto-forno de uma usina siderúrgica instalada na cidade do Rio de Janeiro. Os resultados das simulações DEM permitiram a melhoria de um modelo fenomenológico do carregamento do alto-forno tomando como base três estratégias de enchimento dos hoppers BLT, sendo uma com coque e duas de carga metálica, e quatro estratégias de descarga do topo do alto-forno na forma de algoritmos de posicionamento da calha rotativa. O modelo de carregamento de altos-fornos equipados com BLT desenvolvido neste trabalho se mostrou apto a prever com maior acurácia o perfil de carga no topo do forno em comparação ao modelo original quando comparado aos resultados gerados pelas simulações DEM.

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

PHENOMENOLOGICAL MODELING OF BURDEN DISTRIBUTION IN A BLAST FURNACE BASED ON DEM METHOD

Bruno Pinheiro da Silva

July/2020

Advisor: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The burden distribution is a one of main steps of the blast furnace process. In the BLT systems, metallic and coke raw materials are discharged in layers into the blast furnace. Understanding how the raw materials are place at the blast furnace is of importance. Detailed spatial information on segregation, particle size distribution, metallic mixture and ore/coke ratio allows for evaluation of blast furnace performance, however measuring these parameters in real time presents a challenge. Usually, simplified mathematical models based on volume and position of the rotating chute for blast furnace burden charging predictions are used. This work consists in the development of a predictive model to understanding and optimization the blast furnace burden distribution equipped with a BLT (Bell less Top) using simulations of the burden charging with the discrete element method (DEM). The contact parameters used in DEM simulations were calibrated using experiments and verified against from literature. A realistic 3-D virtual model of the blast furnace installed in Rio de Janeiro were created for the DEM simulations. The DEM simulation results allowed for the improvement of an existing phenomenological burden distribution model for BLT equipped blast furnaces based on, three charging strategies for coke and metallic loads and hopper discharge algorithms for the rotating chute. The blast furnace burden distribution model based on DEM, developed in this work, showed improvements to determine the burden profile when compared to the original model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE EQUAÇÕES	XIX
LISTA DE ABREVIACÕES	XX
LISTA DE SIMBOLOS	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO	5
3.1.1 Produção de aço e suas rotas	5
3.1.2 O processo de redução no alto-forno.....	8
3.1.3 Matérias-primas.....	12
3.1.4 Sistema de carregamento e distribuição de carga no alto-forno.....	15
3.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS.	19
3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ALTO-FORNO	24
3.3.1 Simulação no alto-forno	24
3.3.2 Modelagem fenomenológica da distribuição de carga.	30
4 METODOLOGIA	37
4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MODELO EM DEM.....	37
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	40
4.2.1 Análise Granulométrica.....	41
4.2.2 Medida da massa específica	42
4.2.3 Verificação da calibração dos parâmetros de contato para as matérias-primas	43
4.3 SIMULAÇÕES COM DEM.....	47
4.3.1 Construção da geometria	48
4.3.2 Definição dos estudos de caso.....	52
4.3.3 Carregamento dos materiais no hopper	53
4.3.4 Descarga dos materiais do <i>hopper</i> no topo do alto-forno	58
4.4 PÓS-PROCESSAMENTO	66

4.5	DESENVOLVIMENTO DO MODELO FENOMENOLÓGICO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO TOPO DO ALTO-FORNO.	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	71
5.1.1	Análise Granulométrica.....	71
5.1.2	Medida da massa específica	72
5.1.3	Verificação da calibração dos parâmetros de contato para as matérias-primas	73
5.2	SIMULAÇÕES COM DEM.....	81
5.2.1	Implementação do modelo em três dimensões.....	81
5.2.2	Carregamento dos materiais no <i>hopper</i>	83
5.2.3	Descarga dos materiais no <i>hopper</i>	86
5.3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA	111
5.3.1	Estimação da velocidade de chegada na calha rotativa.....	111
5.3.2	Cálculo das trajetórias e modelo de empilhamento.....	114
6	CONCLUSÃO	121
7	BIBLIOGRAFIA	123

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - ROTAS DE PRODUÇÃO DE AÇO (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017)	7
FIGURA 3.2 - DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO AS DIFERENTES ZONAS DO ALTO-FORNO MOSTRADO POR PEACEY <i>ET AL.</i> (1979) E TAMBEM REPRESENTADO POR DEFENDI <i>ET AL.</i> (2006)...	9
FIGURA 3.3 - ETAPAS DE REDUÇÃO DO MINÉRIO NO ALTO-FORNO (GEERDES, 2015)	10
FIGURA 3.4 - EXEMPLO DE PERFIL DE REDUÇÃO DA CARGA PARA UM ALTO-FORNO O DIAGRAMA DE TÉRMICO (BURTEAUX, 1992), BASEADO NO TRABALHO DE RIST (1964)	11
FIGURA 3.5 - SINTER, PELOTA E MINÉRIO GRANULADO (GEERDES, 2015)	13
FIGURA 3.6 - COQUE E CARVÃO PULVERIZADO (GEERDES, 2015)	13
FIGURA 3.7 - TIPOS DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO ATUALMENTE UTILIZADOS (GEERDES, 2009), A ESQUERDA O SISTEMA DUPLO CONE E A DIREITA O SISTEMA BLT DA PAUL WURTH....	15
FIGURA 3.8 - CICLO DE EVOLUÇÃO DO TOPO BLT (PAUL WURTH, 2018).	16
FIGURA 3.9 - SISTEMA DE CARREGAMENTO DO TOPO BELL-LESS TOP (MANUAL DE OPERAÇÃO, PAUL WURTH 2010).	18
FIGURA 3.10 - CICLO DE ATUALIZAÇÃO DO DEM ENTRE INSTANTES DE TEMPO DE SIMULAÇÃO	20
FIGURA 3.11 - EVOLUÇÃO ANUAL DA INJEÇÃO DE ÓLEO E CARVÃO APÓS A SEGUNDA GUERRA MUNDIAL (NAITO <i>ET AL.</i> , 2015).....	26
FIGURA 3.12 - PROGRESSO DA MODELAGEM MATEMÁTICA EM ALTO FORNO. ADAPTADO DE ARIYAMA <i>ET AL.</i> (2014)	27
FIGURA 3.13 - EXEMPLOS DE REPRESENTAÇÕES DE PARTÍCULAS GRANULARES UTILIZANDO ARRANJOS DE ESFERAS	28
FIGURA 3.14 - ALGORITMO DE RESOLUÇÃO DA MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA ARIYAMA <i>ET AL.</i> (1993) (MODIFICADO).....	32
FIGURA 3.15 - ESQUEMA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO MODELO FENOMENOLÓGICO DE CARREGAMENTO DO ALTO-FORNO PROPOSTO POR PARK <i>ET AL.</i> (2011).	36
FIGURA 4.1 - ESQUEMA APRESENTANDO AS DIMENSÕES PRINCIPAIS DO ALTO-FORNO CONSIDERADO NESTE TRABALHO. O CONTORNO EM VERMELHO REPRESENTA AS PAREDES INTERNAS DO ALTO-FORNO.....	38
FIGURA 4.2 - EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO PARA A AMOSTRA DE COQUE GROSSO.....	44

FIGURA 4.3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CAIXA E DO TUBO UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS	46
FIGURA 4.4 - RESUMO ESQUEMÁTICO DOS ENSAIOS REALIZADOS DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS	46
FIGURA 4.5 - DISTRIBUIDOR ROCKER.....	48
FIGURA 4.6 - <i>HOPPERS</i> GÊMEOS DO TOPO DO ALTO-FORNO.....	49
FIGURA 4.7 - LMG DO TOPO DO ALTO-FORNO INSTALADA NA PARTE INFERIOR DO <i>HOPPER</i>	49
FIGURA 4.8 - BACIA DE DESGASTE.....	50
FIGURA 4.9 - FUNIL DE DESGASTE E CONEXÃO COM O <i>FEEDER SPOUT</i>	50
FIGURA 4.10 - VISTA EM CORTE DO <i>FEEDER SPOUT</i>	51
FIGURA 4.11 - VISTAS LATERAL E SUPERIOR DA CALHA ROTATIVA DO SISTEMA BLT.	51
FIGURA 4.12 - TELA DO SOFTWARE EDEM MOSTRANDO O DETALHE DA CORREIA TRANSPORTADORA E O VETOR (EM AZUL) QUE INDICA O MOVIMENTO DO PLANO DE MOVIMENTAÇÃO DA MESMA. NO DETALHE A GEOMETRIA DA FÁBRICA DE PARTÍCULAS CIRCULADA EM PRETO	55
FIGURA 4.13 - IMAGEM DA PARTE INFERIOR DO HOPPER IMPLEMENTADA NO DEM MOSTRANDO A VÁLVULA CONTROLADORA DE FLUXO LMG (EM VERMELHO), À ESQUERDA TEM-SE A VÁLVULA NA POSIÇÃO FECHADA E À DIREITA A VÁLVULA NA POSIÇÃO ABERTA.....	62
FIGURA 4.14 - UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO BED BLOCK, DESCARGA DE COQUE SIMULADA (ESQUERDA), DESCARGA DE CARGA METÁLICA A SER SIMULADA SOBRE O LEITO DE COQUE (CENTRO) E JUNÇÃO DO LEITO DESCARREGADO DO COQUE COM A DESCARGA DE MINÉRIO A REALIZAR (DIREITA).	65
FIGURA 4.15 - TELA DO EDEM ANALYST QUE MOSTRA AS CAIXAS DE ANÁLISE (GEOMETRY BIN)	67
FIGURA 4.16 - COORDENADAS DAS CAIXAS DE SELEÇÃO: À ESQUERDA TEM-SE A CAIXA DE SELEÇÃO 1, EM VERDE NA FIGURA 4.15 E À DIREITA, TEM-SE A CAIXA DE SELEÇÃO 2, EM AZUL NA FIGURA 4.15.....	68
FIGURA 4.17 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CURVA DE TRAJETÓRIA E SEUS RESPECTIVOS PONTOS DE IMPACTO CALCULADA PELO MODELO DE PARK <i>ET AL.</i> (2011)	70
FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE SINTER, TAL COMO RECEBIDA NO LTM (TAMBORES 1 E 2), COMPARADA À GRANULOMETRIA CONSIDERADA PELA USINA NO CARREGAMENTO DO ALTO-FORNO.	71

FIGURA 5.2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE COQUE, TAL COMO RECEBIDA NO LTM, COMPARADA À GRANULOMETRIA CONSIDERADA NA ANÁLISE DE ROTINA NO CARREGAMENTO DO ALTO-FORNO.	72
FIGURA 5.3 - TESTE DE ÂNGULO DE REPOUSO COM COQUE GROSSO.....	73
FIGURA 5.4 - RESULTADO DE ENSAIO DE ÂNGULO DE REPOUSO (ESQUERDA) COM AMOSTRA DE COQUE CARACTERIZADA PREVIAMENTE NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA MINERAL COMPARADA À SUA RESPECTIVA SIMULAÇÃO DEM (DIREITA) (LIMA, 2016).....	73
FIGURA 5.5 - TESTE DE ÂNGULO DE REPOUSO COM <i>SMALL</i> COQUE.....	74
FIGURA 5.6 - PILHA DE SÍNTER SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER, PELOTAS E COQUE DE CIMA PARA BAIXO RESPECTIVAMENTE. EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).	75
FIGURA 5.7 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE SÍNTER FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE COQUE. EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).	75
FIGURA 5.8 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE SÍNTER FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE PELOTAS. EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).	76
FIGURA 5.9 - PILHA DE COQUE SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER, PELOTAS E COQUE (DE CIMA PARA BAIXO). EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).	77
FIGURA 5.10 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE COQUE FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER.....	77
FIGURA 5.11 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE COQUE FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE PELOTAS.....	78
FIGURA 5.12 - PILHA DE PELOTAS SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER, PELOTAS E COQUE DE CIMA PARA BAIXO, RESPECTIVAMENTE. EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).....	79
FIGURA 5.13 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE PELOTAS FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER.....	79
FIGURA 5.14 - VISTA SUPERIOR DA PILHA DE PELOTAS FORMADA SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE COQUE.....	80
FIGURA 5.15 - PILHA DE MINÉRIO DE FERRO SOBRE LEITO DE PARTÍCULAS DE SÍNTER, PELOTAS E COQUE DE CIMA PARA BAIXO RESPECTIVAMENTE. EXPERIMENTO (À ESQUERDA) E SIMULAÇÃO DEM (À DIREITA).	80

FIGURA 5.16 - MODELO 3D DO DISTRIBUIDOR <i>ROCKER</i> (ESQUERDA) E DOS <i>HOPPERS</i> DO TOPO (DIREITA) DO ALTO-FORNO.	81
FIGURA 5.17 - MODELO 3D DA VÁLVULA <i>LMG</i> (ESQUERDA) E BACIA DE DESGASTE (DIREITA) DO ALTO-FORNO.	81
FIGURA 5.18 - MODELOS 3D DO FUNIL DE DESGASTE E CONEXÃO COM O <i>FEEDER SPOUT</i> DO ALTO-FORNO (ESQUERDA) E <i>FEEDER SPOUT</i> DO ALTO-FORNO (DIREITA)	82
FIGURA 5.19 - MODELO 3D DA CALHA ROTATIVA DO ALTO-FORNO.	82
FIGURA 5.20 - MODELO 3D DO ALTO-FORNO.	83
FIGURA 5.21 - <i>HOPPER</i> COMPLETAMENTE CARREGADO COM A CARGA DE COQUE (CASO E1). NESSA SIMULAÇÃO, AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO, ENQUANTO AS PARTÍCULAS AMARELAS REPRESENTAM O COQUE INTERNO. VISTA DE CORTE TRANSVERSAL DE 50 CM DE ESPESSURA A PARTIR DO CENTRO (ESQUERDA) E VISTA EM PERSPECTIVA, MOSTRANDO A CARGA COMPLETA (DIREITA).	84
FIGURA 5.22 - COMPARAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO <i>HOPPER</i> (FATIA COM 0,5 M DE LARGURA) ENTRE AS ESTRATÉGIAS M1 (DIREITA) E M2 (ESQUERDA).	85
FIGURA 5.23 - CÓDIGO DE CORES DEFINIDO NA ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES EM DEM, POR TIPO DE MATERIAL E BALANÇA ENTRE PARÊNTESES.	85
FIGURA 5.24 - EVOLUÇÃO DAS TAXAS DE DESCARGA DO HOPPER PARA O CARREGAMENTO C1. A TAXA TOTAL É REPRESENTADA PELA CURVA VERDE E, EM PRETO, SUA MÉDIA MÓVEL COM PERÍODO IGUAL A 10 S. A LINHA VERMELHA REPRESENTA A TAXA DESEJÁVEL DE 141 KG/S.....	87
FIGURA 5.25 - EVOLUÇÃO DAS TAXAS DE DESCARGA DO HOPPER PARA O CASO M1. A TAXA TOTAL É REPRESENTADA PELA CURVA VERMELHA ENQUANTO A LINHA PRETA REPRESENTA A TAXA DESEJÁVEL DE 810 KG/S.....	88
FIGURA 5.26 - EVOLUÇÃO DAS TAXAS DE DESCARGA DO HOPPER PARA O CASO M2. A TAXA TOTAL É REPRESENTADA PELA CURVA VERMELHA ENQUANTO A LINHA PRETA REPRESENTA A TAXA DESEJÁVEL DE 810 KG/S.....	88
FIGURA 5.27 - POSIÇÃO FECHADA DA LOWER MATERIAL GATE (<i>LMG</i>) (À ESQUERDA); POSIÇÃO EM ABERTO PARA TAXA REQUERIDA PARA A VAZÃO DE COQUE DE 141 KG/S (NO CENTRO); E POSIÇÃO EM ABERTO PARA TAXA REQUERIDA PARA A VAZÃO DE CARGA METÁLICA DE 810 KG/S (À DIREITA).	89

FIGURA 5.28 - DESCARGA DO MINÉRIO M1, O PRIMEIRO QUADRO CORRESPONDE A CARGA INICIAL NO <i>HOPPER</i> , OS QUADROS POSTERIORES SÃO CORRESPONDENTES AO MOMENTO DE DESCARGA A CADA 30 SEGUNDOS.....	90
FIGURA 5.29 - DESCARGA DO MINÉRIO M2, O PRIMEIRO QUADRO CORRESPONDE A CARGA INICIAL NO <i>HOPPER</i> , OS QUADROS POSTERIORES SÃO CORRESPONDENTES AO MOMENTO DE DESCARGA A CADA 30 SEGUNDOS.....	91
FIGURA 5.30 - DESCARGA DO COQUE C1, O PRIMEIRO QUADRO CORRESPONDE A CARGA INICIAL NO <i>HOPPER</i> , OS QUADROS POSTERIORES SÃO CORRESPONDENTES AO MOMENTO DE DESCARGA A CADA 30 SEGUNDOS.....	92
FIGURA 5.31 - PERFIL BASE DE DISTRIBUIÇÃO: VISTA EM PERSPECTIVA (ESQUERDA) E VISTA FRONTAL (DIREITA)	93
FIGURA 5.32 - DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA RADIAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE COQUE RELATIVA AO CASO D4	95
FIGURA 5.33 - DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA RADIAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE COQUE RELATIVA AO CASO D5	95
FIGURA 5.34 - DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA RADIAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE COQUE RELATIVA AO CASO D8	95
FIGURA 5.35 - ALTURA CALCULADA DO LEITO DE PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DO RAIOS DO ALTO-FORNO PARA AS TRÊS SIMULAÇÕES DE CARREGAMENTO DE COQUE	96
FIGURA 5.36 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO DO CARREGAMENTO DE COQUE NO TOPO DO ALTO-FORNO (CASO D4) A CADA 30 SEGUNDOS. AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO, ENQUANTO AS PARTICULAS AMARELAS O COQUE INTERNO.	96
FIGURA 5.37 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO DO CARREGAMENTO DE COQUE NO TOPO DO ALTO-FORNO (CASO D5 - CCI UTILIZANDO P10) A CADA 30 SEGUNDOS. AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO, ENQUANTO AS PARTICULAS AMARELAS O COQUE INTERNO.	97
FIGURA 5.38 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO DO CARREGAMENTO DE COQUE NO TOPO DO ALTO-FORNO (CASO D8 - L2 CCF) A CADA 30 SEGUNDOS. AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO, ENQUANTO AS PARTÍCULAS AMARELAS O COQUE INTERNO.	98
FIGURA 5.39 - DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA RADIAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE MATERIAL PARA O CASO D6	100
FIGURA 5.40 - DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA RADIAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE MATERIAL PARA O CASO D7	100

FIGURA 5.41 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DO CARREGAMENTO DE CARGA METÁLICA NO TOPO DO ALTO-FORNO (CASO D6). AS PARTÍCULAS SÃO COLORIDAS EM FUNÇÃO DO TIPO, SENDO AS DE <i>SMALL</i> COQUE CINZA, SINTER A VERDES, PELOTAS VERMELHAS, MINÉRIO GRANULADO ROXAS E SINTER B AZUIS.	101
FIGURA 5.42 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DO CARREGAMENTO METÁLICA NO TOPO DO ALTO-FORNO (CASO 22). AS PARTÍCULAS SÃO COLORIDAS EM FUNÇÃO DO TIPO, SENDO AS DE <i>SMALL</i> COQUE CINZA, SÍNTER A VERDES, PELOTAS VERMELHAS, MINÉRIO GRANULADO ROXAS E SÍNTER B AZUIS.	102
FIGURA 5.43 - DISPOSIÇÃO FINAL DO LEITO DE PARTÍCULAS METÁLICAS CARREGADO NO ALTO-FORNO PARA O CASO D6 (À ESQUERDA) E CASO D7 (À DIREITA).	103
FIGURA 5.44 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO ALIMENTAÇÃO DE CARGA METÁLICA NO TOPO DO ALTO-FORNO INICIALMENTE CONTENDO COQUE CARREGADO PELA ESTRATÉGIA L2 CCI (CASO D9). AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO.....	105
FIGURA 5.45 - VISTA EM CORTE DA EVOLUÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE CARGA METÁLICA NO TOPO DO ALTO-FORNO INICIALMENTE CONTENDO COQUE CARREGADO PELA ESTRATÉGIA L2 CCF (CASO D11). AS PARTÍCULAS PRETAS REPRESENTAM O COQUE EXTERNO.....	106
FIGURA 5.46 - DISTRIBUIÇÕES MÁSSICAS E PERCENTUAIS RADIAIS DOS MATERIAIS DESCARREGADOS NO ALTO-FORNO PARA O CASO D8. À ESQUERDA O PERCENTUAL DE CARGA METÁLICA, ONDE A COLORAÇÃO VERMELHA REPRESENTA AUSÊNCIA DE COQUE. À DIREITA O PERCENTUAL DE COQUE ONDE A COLORAÇÃO VERMELHA REPRESENTA A AUSÊNCIA DE CARGA METÁLICA.....	108
FIGURA 5.47 - DISTRIBUIÇÕES MÁSSICAS E PERCENTUAIS RADIAIS DOS MATERIAIS CARREGADOS NO ALTO-FORNO PARA O CASO D11. À ESQUERDA O PERCENTUAL DE CARGA METÁLICA, ONDE A COLORAÇÃO VERMELHA REPRESENTA AUSÊNCIA DE COQUE. À DIREITA O PERCENTUAL DE COQUE ONDE A COLORAÇÃO VERMELHA REPRESENTA A AUSÊNCIA DE CARGA METÁLICA.....	108
FIGURA 5.48 - RELAÇÃO M/C EM FUNÇÃO DO RAI DO FORNO PARA OS CASOS D9 E D11.....	109
FIGURA 5.49 - DIÂMETRO MÉDIO FINAL PARA O CASO D9	109
FIGURA 5.50 - DIÂMETRO MÉDIO FINAL PARA O CASO D11	110
FIGURA 5.51 - DISPOSIÇÃO FINAL DO LEITO DE PARTÍCULAS METÁLICAS CARREGADO NO ALTO-FORNO PARA O CASO D9 (À ESQUERDA) E CASO D11 (À DIREITA).	111

FIGURA 5.52 - CORREÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO NO <i>FEEDER SPOUT V2v</i> (LINHA PRETA) EM RELAÇÃO AO MODELO AJUSTADO <i>V2vmod</i> (LINHA LARANJA) DEMONSTRADO NA EQUAÇÃO 5.1.	113
FIGURA 5.53 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NA SAÍDA PARA $Q=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ E $Q=0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DA PONTA DA CALHA EM RELAÇÃO AO CENTRO DO ALTO-FORNO.	114
FIGURA 5.54 - TRAJETÓRIAS PARA AS POSIÇÕES DA CALHA PARA O D6.	115
FIGURA 5.55 - TRAJETÓRIAS PARA AS POSIÇÕES DA CALHA PARA O D5.	115
FIGURA 5.56 - TRAJETÓRIAS PARA AS POSIÇÕES DA CALHA PARA D8.	115
FIGURA 5.57 - MEDIANA DAS DISTRIBUIÇÕES MÁSSICAS RADIAIS NO CARREGAMENTO EM FUNÇÃO DO TIPO DE MATERIAL E ÂNGULO DA CALHA.	116
FIGURA 5.58 - TRAJETÓRIAS DAS PARTÍCULAS CALCULADAS A PARTIR DO MODELO FENOMENOLÓGICO MODIFICADO DE PARK <i>ET AL.</i> (2011) E COMPARAÇÃO COM PONTO DE REFERÊNCIA NAS TRAJETÓRIAS OBTIDAS DAS SIMULAÇÕES EM DEM.	117
FIGURA 5.59 - PERFIL FORMADO PELO MODELO FENOMENOLÓGICO NA DISTRIBUIÇÃO DA CARGA METÁLICA COMPARADO A SUA RESPECTIVA SIMULAÇÃO DEM (CASO D6)	118
FIGURA 5.60 - PASSOS DE ATUALIZAÇÃO DO PERFIL: À ESQUERDA REPRESENTA A INTEGRAÇÃO DE 10 PASSOS COM INCREMENTO Δh , NO CENTRO 18 PASSOS DE INTEGRAÇÃO E A DIREITA COM 30 PASSOS DE INTEGRAÇÃO REPRESENTANDO TODO VOLUME CARREGADO NA VOLTA.	119
FIGURA 5.61 - PERFIL CARREGADO. CADA VOLTA É REPRESENTADA POR UM CONTORNO PRETO E CADA POSIÇÃO DA CALHA ROTATIVA É REPRESENTADA POR UMA COR (LARANJA, AMARELO, VERDE CLARO, VERDE ESCURO E AZUL)	119
FIGURA 5.62 - PERFIL DE CARREGAMENTO OBTIDO COM O MODELO FENOMENOLÓGICO NA DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DE COQUE COMPARADO A SUA RESPECTIVA SIMULAÇÃO DEM (CASO D5).	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - PRODUÇÃO DE AÇO NO MUNDO (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).....	6
TABELA 3.2 - PUBLICAÇÕES RECENTES ABORDANDO SIMULAÇÕES DEM DE ALTOS-FORNOS E RESPECTIVOS PARÂMETROS E CRITÉRIOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.....	29
TABELA 3.3 - SUMÁRIO DAS VARIÁVEIS DO MODELO DE ESTIMATIVA DO ÂNGULO DE REPOUSO.	35
TABELA 3.4 - PARÂMETROS DOS CARREGAMENTOS METÁLICO E DE COQUE UTILIZADOS POR PARK <i>ET AL.</i> (2011).....	35
TABELA 4.1 - RESUMO DOS DADOS DE PROJETO DO ALTO-FORNO UTILIZADO NESSE TRABALHO	39
TABELA 4.2 - DADOS DO SISTEMA DE CARREGAMENTO	39
TABELA 4.3 - DADOS OPERACIONAIS DO ALTO-FORNO	40
TABELA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO DE ABERTURA DE PENEIRA USADA NO PENEIRAMENTO DE CADA MATERIAL.....	42
TABELA 4.5 - FAIXA DE TAMANHOS E MASSAS DOS MATERIAIS USADOS NOS ENSAIOS	45
TABELA 4.6 - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	52
TABELA 4.7 - PARÂMETROS DO MODELO DE CONTATO PARA OS COQUES NAS BALANÇAS SBC01 E SBC02.....	52
TABELA 4.8 - PARÂMETROS DO MODELO DE CONTATO PARA O <i>SMALL</i> COQUE NA BALANÇA NUT	52
TABELA 4.9 - PARÂMETROS DO MODELO DE CONTATO PARA AS PELOTAS NA BALANÇA SBP01	53
TABELA 4.10 - PARÂMETROS DO MODELO DE CONTATO PARA O SINTER NA BALANÇA SBS01 E SBS02	53
TABELA 4.11 - PARÂMETROS DO MODELO DE CONTATO PARA O MINÉRIO GRANULADO NA BALANÇA SBP02.....	53
TABELA 4.12 - NOMENCLATURA DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES DO CARREGAMENTO DO ALTO-FORNO E BALANÇAS DE DESCARGA DA CASA DE ESTOCAGEM (STOCK HOUSE).....	54
TABELA 4.13 - ESTRATÉGIA DE ENCHIMENTO DOS <i>HOPPERS</i>	57
TABELA 4.14 - DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS USADOS NAS SIMULAÇÕES DEM	58

TABELA 4.15 - SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO DA CALHA L2 CCI (MOVIMENTAÇÃO A) IMPLEMENTADA NAS SIMULAÇÕES DEM	60
TABELA 4.16 - SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO DA CALHA L2 CCI P10 (MOVIMENTAÇÃO B) IMPLEMENTADA NAS SIMULAÇÕES DEM	60
TABELA 4.17 - SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO DA CALHA C IMPLEMENTADA (CARGA METÁLICA).	61
TABELA 4.18 - SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO DA CALHA D IMPLEMENTADA (CCF L2).....	61
TABELA 4.19 - TAXA MÁSSICA DE DESCARGA UTILIZANDO NA ESTRATÉGIA INDUSTRIAL.....	62
TABELA 4.20 - CONFIGURAÇÕES DO VETOR QUE CONSTITUI O EIXO DE ROTAÇÃO DA VÁLVULA LMG NAS SIMULAÇÕES DEM	63
TABELA 4.21 - SUMÁRIO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	64
TABELA 5.1 - MASSA ESPECÍFICA POR BALANÇA DA CASA DE ESCOCAGEM.	72

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 3.1 - REDUÇÃO INDIRETA	12
EQUAÇÃO 3.2 - RENDIMENTO DE GÁS	12
EQUAÇÃO 3.3 - FORÇA NORMAL DE CONTATO.	21
EQUAÇÃO 3.4 - MODULO DE YOUNG'S EQUIVALENTE.....	21
EQUAÇÃO 3.5 - RAIOS EQUIVALENTE DE DUAS ESFERAS EM CONTATO	21
EQUAÇÃO 3.6 - FORÇA NORMAL DE AMORTECIMENTO	22
EQUAÇÃO 3.7 - MASSA EQUIVALENTE DAS DUAS ESFERAS.	22
EQUAÇÃO 3.8 - RIGIDEZ NORMAL.....	22
EQUAÇÃO 3.9 - FORÇA TANGENCIAL.	22
EQUAÇÃO 3.10 - RIGIDEZ TANGENCIAL.	22
EQUAÇÃO 3.11 - FORÇA TANGENCIAL DE AMORTECIMENTO.....	23
EQUAÇÃO 3.12 - ATRITO DE ROLAMENTO.....	23
EQUAÇÃO 3.13 – TEMPO CRÍTICO	24
EQUAÇÃO 3.14 - SEGUNDA LEI DE NEWTON.	24
EQUAÇÃO 3.15 - EQUAÇÃO DO TORQUE	24
EQUAÇÃO 3.16 - VELOCIDADE DE ESCOAMENTO NO FEEDER SPOUT.....	33
EQUAÇÃO 3.17 - VELOCIDADE AS PARTÍCULAS NA SAÍDA DA CALHA ROTATIVA	33
EQUAÇÃO 3.18 - VELOCIDADE RADIAL.....	33
EQUAÇÃO 3.19 - VELOCIDADE VERTICAL	34
EQUAÇÃO 3.20 - VELOCIDADE TANGENCIAL	34
EQUAÇÃO 3.21 - TRAJETÓRIA NO EIXO HORIZONTAL.....	34
EQUAÇÃO 3.22 - TRAJETÓRIA NO EIXO VERTICAL.....	34
EQUAÇÃO 3.23 - ÂNGULO FORMADO ENTRE O CENTRO DO ALTO-FORNO E A PILHA.....	35
EQUAÇÃO 3.24 - ÂNGULO FORMADO ENTRE A PILHA E A PAREDE DO ALTO-FORNO.	35
EQUAÇÃO 4.1 - CÁLCULO DA DENSIDADE ESPECÍFICA	42
EQUAÇÃO 5.1 - VELOCIDADE DE ESCOAMENTO NO FEEDER SPOUT MODIFICADA	112
EQUAÇÃO 5.2 - VOLUME DE UM TROCO CÔNICO	112

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	– Associao Brasileira de normas técnicas
BLT	– <i>Bell Less Top</i> (topo de carregamento do alto-forno)
CCF	– Coque Central Final (ou <i>Coke Central Feed</i>)
CCI	– Coque central inicial
CPU	– <i>Central Processing Unit</i>
CT-BAS	– Controle Basculante
CT-ROT	– Controle de Rotao
DEM	– Método dos Elementos Discretos
GPU	– <i>Graphics Processing Unit</i>
ISO	– <i>International Organization for Standardization</i>
LMG	– <i>Lower Material Gate</i> (Válvula controladora de fluxo)
LTM	– Laboratório de Tecnologia Mineral
NKK	– Nippon Kokan
NUT	– Balana de <i>small</i> coque
PVC	– Policloreto de Vinila.
RPM	– Rotaes Por Minuto
SBC01	– Balana de coque externo
SBC02	– Balana de coque interno
SBP01	– Balana de pelota
SBP02	– Balana de minério granulado
SBS01	– Balana de Sínter A
SBS02	– Balana de Sínter B
STEP	– <i>STandard for the Exchange of Product model data</i>

LISTA DE SIMBOLOS

A_{max}	.....	Angula máximo de repouso (°)
C	.....	Constante do modelo fenomenológico (-)
d	.....	Diâmetro da garganta do alto-forno (m)
D	.....	Diâmetro da partícula (m)
e	.....	Coefficiente de restituição (-)
E	.....	Módulo de elasticidade de Young (Pa)
E^*	.....	Equivalente ao Módulo de elasticidade de Young (Pa)
F_n	.....	Força normal (N)
F_n^d	.....	Força normal de amortecimento (N)
F_s	.....	Fator de forma (-)
F_t	.....	Força tangencial de amortecimento (N)
g	.....	Aceleração da gravidade (m/s ²)
G^*	.....	Equivalente ao módulo de cisalhamento (Pa)
H_d	.....	Comprimento do feeder spout (m)
K_f	.....	Fator de correção para a equação de Torricelli (-)
L	.....	Comprimento da calha rotativa (m)
\dot{Q}	.....	Vazão volumétrica de descarga (m ³ /s)
R	.....	Raio da partícula (m)
R^*	.....	Raio equivalente entre duas partículas (m)
R_{feed}	.....	Raio superior do feeder spout (m)
S_n	.....	Rigidez normal (N/m)
S_t	.....	Rigidez tangencial (N/m)
t	.....	Tempo (s)
T	.....	Torque (N/m)
V_{1v}	.....	Velocidade na entrada da calha rotativa (m/s)
V_{2v}	.....	Velocidade na saída da calha rotativa (m/s)
V_{2vmod}	.....	Velocidade na saída da calha rotativa da equação modificada (m/s)
V_3	.....	Velocidade das partículas na saída da calha rotativa (m/s)
\vec{V}_n^{rel}	.....	Velocidade relativa normal (m/s)

V_r	.....	Componente radial da velocidade da partícula ao deixar a calha rotativa (m^3/s)
\vec{V}_t^{rel}	.....	Velocidade relativa tangencial (m^3/s)
V_{tc}	.....	Volume do feeder spout (m^3/s)
V_z	.....	Componente axial da velocidade da partícula ao deixar a calha rotativa (m^3/s)
V_θ	.....	Componente angular da velocidade da partícula ao deixar a calha rotativa (m^3/s)
X_x	.....	Distância do centro do alto-forno ao ponto de empilhamento (m^3/s)
\vec{a}	.....	Aceleração da partícula (m/s^2)
m^*	.....	Massa equivalente das duas esferas (kg)
r_{feed}	.....	Raio inferior do feeder spout (m)
t_{ct}	.....	Tempo crítico (s)
Φ_{cor}	.....	Fator de correção (-)
η_{Co2}	.....	Rendimento gasoso (%)
a^*	.....	Aceleração da partícula (m/s^2)
β_p	.....	Ângulo de empilhamento entre parede do alto-forno e pico da pilha ($^\circ$)
δ_n	.....	Sobreposição normal entre duas partículas (m)
δ_t	.....	Sobreposição tangencial (m)
μ_f	.....	Coefficiente de atrito (-)
μ_r	.....	Coefficiente de rolamento de fricção (-)
μ_s	.....	Coefficiente de fricção estática (-)
τ_i	.....	Atrito de rolamento (-)
ω_i	.....	Vetor unitário da velocidade angular do objeto no ponto de contato (-)
ϑ_p	.....	Ângulo de empilhamento entre centro do alto-forno e pico da pilha ($^\circ$)
ν	.....	Razão de Poisson (-)
α	.....	Ângulo de descarga da calha (rad)
β	.....	Parâmetro dependente do coeficiente de restituição (-)
ρ	.....	Massa específica (kg/m^3)
ω	.....	Velocidade angular da calha rotativa (rad/s)

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros altos-fornos conhecidos para a produção de ferro gusa, então chamados de *flussöfen*, datam do século XV (Rizzo, 2009). O processo de produção via alto-forno evoluiu consideravelmente no século XX. No início do século XX, os altos-fornos possuíam um diâmetro de cadinho de 4 a 5 metros e produziam aproximadamente 100.000 toneladas de gusa por ano, no final do século XX, os maiores altos-fornos tinham de 14 a 15 metros de diâmetro do cadinho e estavam produzindo entre 3 e 4 milhões de toneladas por ano (Geerdes, 2015).

Durante o desenvolvimento do processo via alto-forno que ocorreu no último século, no ano de 1967 foi desenvolvido um dos melhores modelos para o entendimento da operação do alto-forno, chamado de “*A dual graphic representation of the blast-furnace mass and heat balances*” por A. Rist e N.Meysson. Também chamado de diagrama de Rist. O diagrama de Rist é um modelo tipo “caixa preta” e incorpora as principais características de operação de um alto-forno, apresenta soluções para vários problemas através de balanços de massa e energia em estado estacionário que relaciona o grau de oxidação do gás com o grau de oxidação da carga (Fujihara *et al.*, 2015).

Embora a operação dos altos-fornos ainda esteja amplamente baseada na experiência operacional, a modelagem matemática do processo tem a cada dia ganhado espaço, e se tornou uma ferramenta essencial de otimização, onde a utilização de técnicas avançadas de simulação, como o Método dos Elementos Discretos (DEM), pode mudar a forma de modelar e analisar o alto-forno.

A utilização do DEM em simulações de alto-forno busca prever o comportamento da população das partículas através das suas contribuições individuais, permitindo assim, a análise de distúrbios em regiões específicas gerando uma melhor compreensão dos efeitos locais, especialmente em regiões onde não se tem a capacidade de medição, quer seja pelo custo ou natureza do local. Dessa forma, muitos trabalhos vêm utilizando o DEM com o intuito de prever de forma mais realista o comportamento das partículas no interior do alto-forno, como feito por Mitra (2016).

Como mencionado, a técnica tem elevada capacidade de previsão do comportamento das partículas, dessa forma, o modelo de DEM apresentado nesse trabalho tem capacidade de avaliar os seguintes efeitos:

- Segregação mássica na formação da pilha no interior do reator, sendo uma resposta direta do escoamento das partículas pelo sistema de carregamento e do algoritmo de movimentação da calha rotativa.
- Efeitos de mistura da carga metálica no alto-forno, como o escoamento do *small* coque e minério granulado na carga metálica.
- Efeitos de mistura no coque carregado, bem como a segregação granulométrica no sistema de carregamento.
- Formação de carga mista, permitindo prever a penetração de carga metálica na camada de coque.

Entretanto, o DEM demanda um custo computacional muito elevado, o que torna as simulações dispendiosas, podendo demorar dias ou semanas a simulação de uma única descarga do topo, tipicamente realizada em poucos minutos. Como o elevado tempo de processamento impossibilita a utilização do DEM no acompanhamento direto das operações, foi ajustado, a partir do modelo desenvolvido em DEM, um modelo fenomenológico que permite uma avaliação mais simplificada da distribuição da carga no topo do alto-forno em tempo real.

As simulações com o método dos elementos discretos viabilizam avaliar e entender os efeitos de segregação no carregamento e formação do perfil da carga, permitindo melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem na distribuição de carga. Adicionalmente, os resultados das simulações DEM podem ser utilizados como ponto de partida para análises do fluxo gasoso com a utilização de técnicas como a fluidodinâmica computacional.

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de um modelo matemático fenomenológico de distribuição de carga em escala real baseado em simulações DEM para um alto-forno de uma usina siderúrgica localizada na cidade do Rio de Janeiro. O modelo permitiu a avaliação dos efeitos na distribuição de carga, tendo como resposta o

perfil de carregamento e empilhamento dos materiais e suas propriedades no interior do reator, como distribuição mássica e granulométrica por material e a mistura entre as camadas de coque e carga metálica.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho consistiu no desenvolvimento de um modelo matemático fenomenológico preditivo da distribuição de carga de um alto-forno dotado de um sistema de carregamento do tipo BLT (*Bell Less Top*).

Para tal, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Uso do método dos elementos discretos para a realização de simulações de todo o sistema de carregamento do topo do alto-forno do tipo BLT considerando diferentes estratégias de enchimento do *hopper* e de movimentação da calha rotativa;
- Desenvolvimento de um modelo fenomenológico de acompanhamento em tempo real da distribuição de carga, ajustado a partir dos resultados das simulações do carregamento das matérias-primas no topo do alto-forno realizadas com o método dos elementos discretos;
- Análise crítica dos efeitos de segregação durante o carregamento do alto-forno buscando identificar oportunidades de melhorias da operação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica do estado da arte dos principais aspectos abordados no trabalho, onde:

- I. Trata-se do processo de fabricação de ferro gusa com foco no funcionamento e estrutura do alto-forno; são detalhadas as principais características das matérias-primas utilizadas no processo produtivo e os principais aspectos dos sistemas de carregamento *bell-less top* (BLT);
- II. Apresenta-se o método dos elementos discretos (DEM) e o modelo de contato utilizado para descrever a interação entre partículas na zona granular do alto-forno;
- III. Revisa-se a evolução do processo de modelagem do alto-forno utilizando o método dos elementos discretos (DEM) e da abordagem fenomenológica utilizada para a construção dos modelos de carregamento.

3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO

3.1.1 Produção de aço e suas rotas

Em 2017, a produção de aço bruto no Brasil foi de 34,8 milhões de toneladas, que representou um aumento de 10,1% quando comparado ao ano de 2016. O aumento foi progressivo em 2018 e atingiu uma produção total de 35,4 milhões de toneladas, representando acréscimo de 12% quando comparado ao ano de 2016. O aumento de produção demonstra sinais de recuperação do setor (Instituto Aço Brasil 2018), no entanto a maior competitividade e pressão governamental, tem forçado o setor industrial no sentido de redução de custos e impacto ambiental.

Os grupos empresariais associados ao Instituto Aço Brasil faturaram em 2017, R\$ 81,6 bilhões, sendo 21,6% a mais do que em 2016. Entretanto, mesmo com o aumento de produção em 2017 e 2018 o Brasil caiu de 8º para o 9º lugar no ranking mundial como mostrado na Tabela 3.1. Na América Latina o Brasil ocupa a primeira posição, e conta com cerca de 50% de toda a produção de aço na região.

Tabela 3.1 - Produção de aço no mundo (Instituto aço Brasil, 2018)

Produção anual de aço no mundo (milhões de toneladas)						
Pais	2013	2014	2015	2016	2017	2018
China	822	822,3	803,8	807,6	870,9	928,3
Índia	81,3	87,3	89,0	95,5	101,5	106,5
Japão	110,6	110,7	105,1	104,8	104,7	104,3
EUA	86,9	88,2	78,8	78,5	81,6	86,6
Coréia do Sul	66,1	71,5	69,7	68,6	71,0	72,5
Rússia	69,0	71,5	70,9	70,5	71,5	71,7
Rep. Fed. Alemanha	42,6	42,9	42,7	42,1	43,3	42,4
Turquia	34,7	34	31,5	33,2	37,5	37,3
Brasil	34,2	33,9	33,3	31,6	34,8	35,4
Itália	24,1	23,7	22,0	23,4	24,1	24,5
Irã	15,4	16,3	16,1	17,9	21,2	24,5
Formosa	22,3	23,1	21,4	21,8	22,4	23,2
Irã	32,8	27,2	23,0	24,2	21,4	21,1
México	18,2	18,9	18,2	18,8	19,9	20,2
França	15,7	16,1	15,0	14,4	15,5	15,4
Outros	174,5	181,8	179,7	174,6	188,8	195,2
Total	1650,4	1669,4	1620,2	1627,5	1730,1	1809,1

Na indústria, existem duas rotas principais de produção de aço: a rota via alto-forno e a produção de aço em aciaria elétrica. Ambas as rotas se diferem quanto aos tipos de produtos gerados e as matérias-primas utilizadas em seus processos.

A rota de produção via alto-forno produz, na maioria dos casos, produtos planos e muitas vezes voltados para aços especiais, ao passo que a produção por arco elétrico está mais voltada para produtos longos. A produção via alto-forno usa coque e carvão como combustíveis e principalmente, sínter, pelotas e minério granulado como materiais contendo óxido de ferro que será reduzido no alto-forno. Por outro lado, a aciaria elétrica usa energia elétrica para fundir principalmente a sucata que, após a mudança do estado físico, inicia o processo de refino do aço (Geerdes, 2015).

As rotas de produção do aço são também classificadas de forma semi-integrada ou integrada. Sendo que na rota semi-integrada a fonte de ferro utilizada advém principalmente da sucata de ferro, sendo essa a principal matéria-prima. Nesta rota, o processo de obtenção do

ferro líquido dá-se por meio da fusão de sucata ferrosa e ou do ferro gusa em fornos elétricos, onde posteriormente o ferro líquido será refinado e transformado em aço líquido.

No caso da rota integrada, a redução do minério de ferro ocorre em um reator chamado alto-forno que, através de um processo de oxirredução, transforma o óxido de ferro em ferro líquido ou ferro gusa. Posteriormente, o ferro gusa é refinado na aciaria dando origem ao aço líquido.

A Figura 3.1 apresenta de forma esquemática as duas principais rotas de produção de aço, onde observa-se a maior diversidade de classe de produtos que a usina integrada consegue produzir.

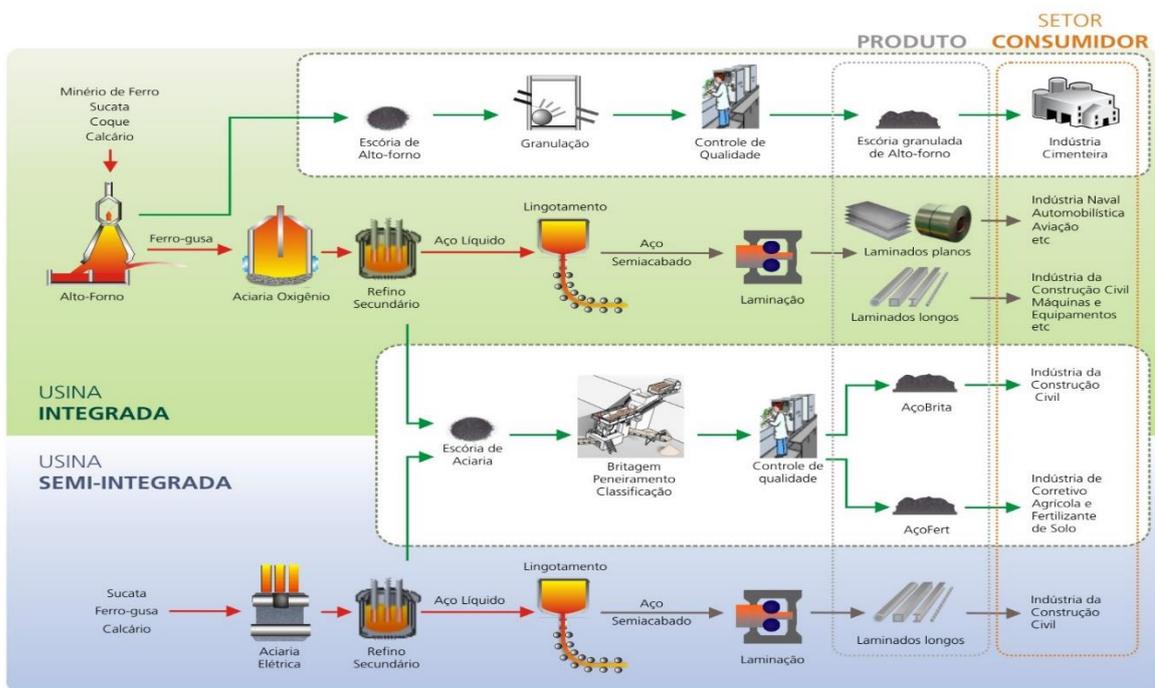


Figura 3.1 - Rotas de produção de aço (Instituto aço Brasil, 2017)

3.1.2 O processo de redução no alto-forno

O alto-forno é um reator que opera em regime permanente e em contracorrente, onde camadas de carga sólida descendente são aquecidas e reduzidas pelo gás ascendente. Na parte inferior do reator é injetado ar aquecido e, por muitas vezes, enriquecido com oxigênio. O ar injetado na parte inferior do alto-forno tem temperatura entre 1200°C e 1250°C que ao entrar em contato com o coque reage, aumentando a temperatura da região, podendo chegar na ordem de 2300°C; valor este calculado considerando um processo adiabático.

A carga carregada pelo topo (descendente) é distribuída no reator em temperatura ambiente, e ao descer a coluna, troca calor e massa com o gás ascendente, reduzindo o minério de ferro. Para que a transferência de calor e as reações ocorram adequadamente, é importante que a carga seja distribuída de forma a permitir um bom contato entre o sólido e o gás (Geerdes, 2015).

É sabido que o desempenho do alto-forno está intimamente associado à boa qualidade das matérias-primas e a um bom controle estratégico do processo. Nesse contexto, além da qualidade das matérias-primas, sua distribuição no interior do reator tem um papel fundamental na maximização da transferência de calor entre o gás e a carga que, por sua vez, contribui nas reações de redução do minério de ferro (Geerdes, 2015). Adicionalmente, uma distribuição de carga considerada satisfatória deve, além de maximizar a transferência de calor, estabilizar o fluxo de gás e o fluxo de calor exercido na parede do alto-forno.

Dentre os estudos realizados visando compreender o processo de produção de ferro gusa em altos-fornos, merecem destaque especial as descrições e análises dos resultados de dissecação dos altos-fornos congelados no Japão na década de 70. Esses experimentos em escala industrial que ocorreram entre os anos de 1968 até 1971 permitiram a identificação e a observação de forma mais detalhada das diferentes zonas presentes no alto-forno, bem como o mapeamento do impacto da estratégia de operação como feito por Kanbara *et al.* (1976).

Além dos estudos realizados pelos japoneses, diversos autores complementaram suas análises realizadas na busca de entender melhor os processos de transformação ocorridos no interior dos altos-fornos. Pode-se citar, por exemplo, o trabalho realizado por Santos (2009) que buscou entender e descrever o processo escoamento de líquidos dentro do cadinho.

O processo do alto-forno pode ser dividido em diferentes zonas, conforme apresentado esquematicamente na Figura 3.2:

- Zona granular: encontra-se na parte superior do alto-forno e é formada por coque e pela carga metálica distribuídas em camadas alternadas, nessa zona a matéria-prima sólida será aquecida pelo gás ascendente e iniciando as primeiras etapas de redução;
- Zona de amolecimento e fusão (zona coesiva): região onde ocorre a transição sólido-líquido da carga metálica, tornando suas camadas praticamente impermeáveis a passagem do gás, o qual escoam majoritariamente através das janelas de coque metalúrgico. A zona de coesão sofre grande influência da qualidade da matéria-prima, impactando principalmente sua espessura, temperatura de início de amolecimento e temperatura de final de fusão. Já o seu formato é definido pelo perfil de distribuição da carga no topo do reator;
- Zona de coque ativa: zona onde gusa e escória escoam através do coque, esta zona também pode ser chamada de zona de gotejamento;
- Zona de combustão: região que se situa à frente das ventaneiras e é provocada pelo ar soprado através delas que entra em combustão com o coque criando um espaço vazio a sua frente;
- Cadinho e homem morto: composto por uma camada de coque estagnado preenchendo todo o cadinho onde o ferro gusa e a escória estão contidos e escoados através do coque.

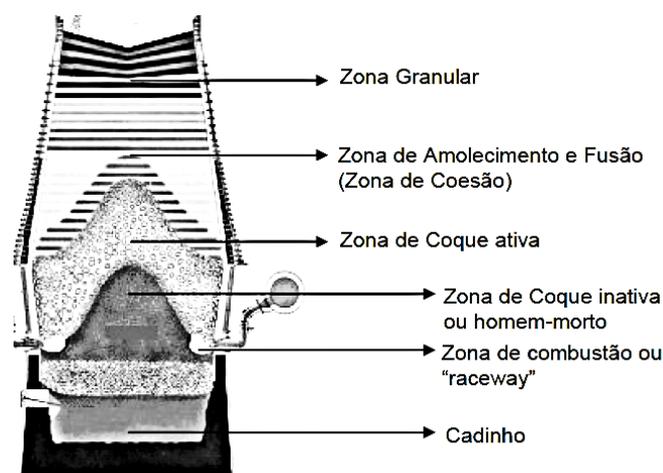


Figura 3.2 - Desenho esquemático mostrando as diferentes zonas do alto-forno mostrado por Peacey et al. (1979) e também representado por Defendi et al. (2006)

Tipicamente os altos-fornos possuem entre 15 a 25 metros de altura útil de carga (das ventaneiras à superfície da carga). A combustão do coque nos altos-fornos, que ocorre na parte inferior do reator e a fusão da carga metálica, criam espaços vazios que são ocupados pela carga granular descendente. O processo de combustão do coque e de combustíveis auxiliares, como gás natural e finos de carvão, na região inferior do alto-forno gera um gás que pode atingir temperaturas na ordem de 2300 °C. Após a combustão, o carbono se torna parcialmente oxidado e o produto da combustão é composto basicamente por CO, N₂ e H₂. O gás, durante sua passagem pelos interstícios da carga carregada, segue em direção ao topo do alto-forno e troca calor e massa com as partículas granulares no seu interior, e resulta na formação de perfis de temperatura e graus de oxidação do gás e da carga metálica reduzida ao descer a coluna do reator. Observa-se na Figura 3.3, que carga carregada no topo apresentando máximo grau de oxidação (hematita), sendo reduzida ao descer pela coluna de carga no interior do alto-forno (Geerdes, 2015).

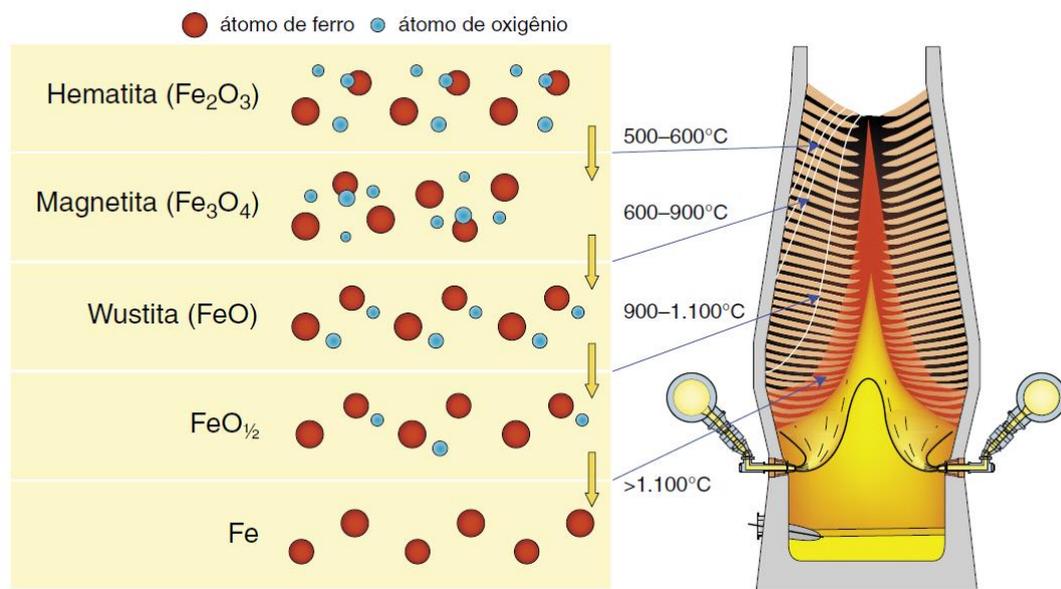


Figura 3.3 - Etapas de redução do minério no alto-forno (Geerdes, 2015)

A carga metálica no topo é carregada com um grau de oxidação (razão molar O/Fe) de aproximadamente 1,47, e que, na região das ventaneiras, deve estar totalmente reduzida em condições ideais, ou seja, apresentando grau de oxidação igual a zero. Já o gás introduzido pelas ventaneiras, após a combustão, apresenta grau de oxidação unitário (razão molar O/C) e máxima temperatura, o CO gerado permeia a coluna do alto-forno trocando calor e se oxidando

a CO_2 ao reduzir o óxido de ferro. No topo do alto-forno, objetiva-se que o gás tenha temperaturas na faixa de $100\text{ }^\circ\text{C}$, com grau de oxidação da ordem de aproximadamente 1,5. Deste modo, a troca de calor e massa entre o gás redutor e a carga durante o processo de redução gera um perfil de redução da carga, como pode ser visto na Figura 3.4. O perfil de redução relaciona as temperaturas de sólidos e gás ao grau de redução do minério em função da posição vertical no alto-forno.

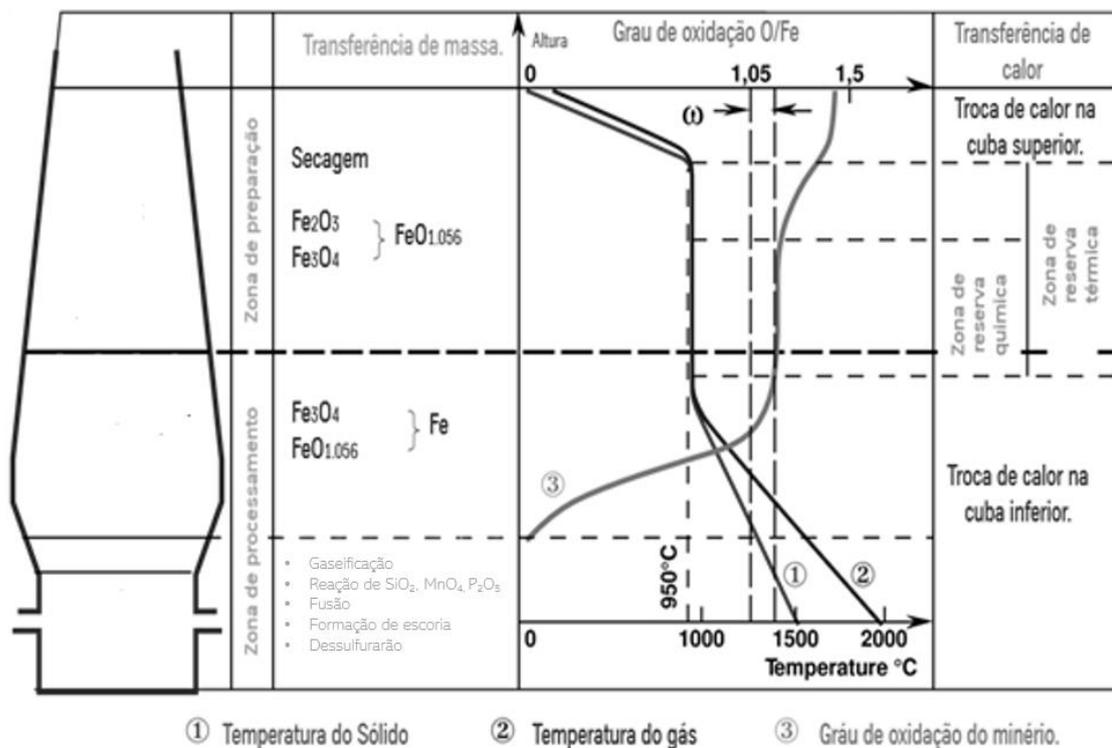


Figura 3.4 - Exemplo de perfil de redução da carga para um alto-forno o diagrama de térmico (Burteaux, 1992), baseado no trabalho de Rist (1964)

Uma medida de eficiência do processo é feita através da composição do gás no topo do alto-forno. Geralmente analisa-se a fração de nitrogênio (N_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio gasoso (H_2) na saída do reator. Como o processo de redução da carga metálica ocorre principalmente pelo gás CO que é transformado em CO_2 , mostrado na equação 3.1, a maior concentração de CO_2 no topo do alto-forno indica melhor capacidade do gás de reduzir a carga. Para melhor análise da capacidade de redução, utiliza-se a razão entre a concentração de CO_2 pela concentração de CO somada a de CO_2 , como medida

direta de eficiência do processo. A essa razão dá-se o nome de rendimento gasoso ou rendimento de CO₂ (η_{CO_2}), mostrado na equação 3.2 (Geerdes, 2015):



$$\eta_{CO_2} = \frac{\%CO_{2(g)}}{\%CO_{(g)} + \%CO_{2(g)}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Por fim, quanto maior for o rendimento gasoso, maior será a eficiência do processo e menor o consumo de combustíveis no alto-forno. Para que um maior rendimento seja atingido, faz-se necessário o uso de matérias-primas de características adequadas, como por exemplo: granulometria, teor de ferro e boa capacidade de redução, que aliada a estratégia adequada de carregamento no topo do alto-forno proporcionará um melhor contato gás-carga e eficiência no processo (Fujihara *et al.*, 2015)

3.1.3 Matérias-primas

As principais matérias-primas utilizadas no processo de fabricação de ferro gusa são divididas em três grandes grupos: os metálicos (usados como fonte de ferro), os carbonosos (como fonte de energia) e os fundentes (para ajuste da qualidade da escória).

Os principais componentes da carga metálica são os minérios granulados de ferro, sinter e pelota de minério de ferro, cuja imagens podem ser vistas na Figura 3.5. Em alguns casos pode-se ainda adicionar sucatas e ferro esponja (Geerdes, 2015).

Os combustíveis ou redutores sólidos tipicamente são o coque e o carvão mineral, mostrados na Figura 3.6. Pode-se acrescentar em alguns casos, carvão vegetal, gás natural e óleos como combustíveis.

O terceiro e último grupo de matérias-primas é composta pelos fundentes, como calcário, dolomita e quartzo. Estes são adicionados em menores quantidades e são utilizados

para ajuste da qualidade da escória (subproduto do processo de produção do ferro gusa). Pode-se ainda, em alguns casos, adicionar minério de titânio para proteção do cadinho (Rizzo, 2009).



Figura 3.5 - Sinter, Pelota e Minério granulado (Geerdes, 2015)



Figura 3.6 - Coque e Carvão pulverizado (Geerdes, 2015)

As matérias-primas metálicas e o coque são carregados no topo do reator por um equipamento que distribui os materiais. O alto-forno é carregado em bateladas e de forma alternada entre a carga de combustível (coque) e metálica (granulado, sinter e pelotas), o que resulta na formação de camadas de coque e carga metálica.

A separação da carga metálica e do coque é necessária dada as diferenças entre suas distribuições granulométricas e comportamentos metalúrgicos. Geralmente, o coque é classificado com granulometria entre 35 mm e 90 mm, enquanto a carga metálica é classificada

na faixa de 5 mm a 50 mm. Pode-se ainda carregar uma pequena fração de partículas menores de coque, denominada de *small coke*, na faixa de 10 a 35 mm junto à carga metálica. Dessa forma, maximiza-se a fração de espaços vazios na região superior do alto-forno, o que facilita o escoamento do gás ascendente mesmo com o material menos nobre.

Durante a etapa de carregamento do alto-forno, devido aos impactos sofridos pelas partículas seja no interior do hopper de carregamento ou mesmo contra o leito de partículas no topo do forno, pode ocorrer quebra das partículas das matérias-primas resultando na geração de finos. A presença de partículas finas reduz o volume de vazios no leito, o que resulta em perturbações no escoamento gasoso no alto-forno. Desta forma, as partículas de matérias-primas devem apresentar resistência à degradação por impacto e abrasão de forma a minimizar a geração de finos no forno.

No contexto de permeabilidade, o coque ganha muita importância, pois ele é o único material que permanece sólido da zona de carregamento no topo do alto-forno até a região do cadinho, e suas funções mais importantes são (Geerdes, 2015):

1. Combustível: Fornecer o calor para as reações químicas endotérmicas e para a fusão da escória e metal;
2. Agente redutor: produz gases para redução dos óxidos de ferro a partir da sua queima na região das ventaneiras.
3. Componente estrutural: atua como o único material que permanece sólido ao longo de todo o alto-forno, e como tal, deve sustentar toda a carga sobrejacente, de modo a prover um leito permeável aos gases ascendentes e líquidos descendentes.
4. Agente carburante: fornece o carbono necessário para carburar o ferro metálico.

Após a distribuição dos materiais na zona granular, inicia-se o processo de aquecimento. Nesse ponto, ainda na zona granular, ocorre a elevação da temperatura e secagem da carga. Em seguida iniciam as primeiras etapas de redução da carga metálica, como pode ser visto na Figura 3.4, e, à medida que a matéria-prima desce pela coluna do alto-forno, a carga metálica vai reduzindo até alcançar a zona de preparação e posteriormente a zona de coesão. Abaixo da zona de coesão, a carga metálica, em condições ideais, encontra-se totalmente na fase líquida.

A carga metálica composta por sinter, pelota e minério granulado não é misturada homogeneamente durante o enchimento do *hopper* no topo do alto-forno. Adicionalmente, durante a distribuição de carga, seus componentes ainda podem sofrer segregação mássica e granulométrica afetando diretamente a mistura a ser descarregada. As diferentes misturas durante a descarga do *hopper* afetam diretamente a formação da zona coesiva, adicionando variabilidade de qualidade e permeabilidade radialmente na coluna do alto-forno.

3.1.4 Sistema de carregamento e distribuição de carga no alto-forno

A distribuição de carga no alto-forno é uma importante etapa para o controle do processo produtivo e estabilidade do reator. Assim, ao longo do tempo muito se desenvolveu em termos de tecnologias, estratégias e mecanismos de carregamento das matérias-primas como mostrado por Naito *et al.* (2015).

Das características construtivas de um alto-forno, pode-se citar dois principais sistemas de carregamento (Geerdes, 2009):

- O sistema de duplo cone, para propósitos de distribuição de carga, frequentemente equipados com uma armadura móvel (sistema mais limitado).
- O topo sem cone (*bell-less top*), o qual permite uma distribuição mais flexível e precisa da carga.

Ambos os tipos de topos são esquematicamente mostrados na Figura 3.7.

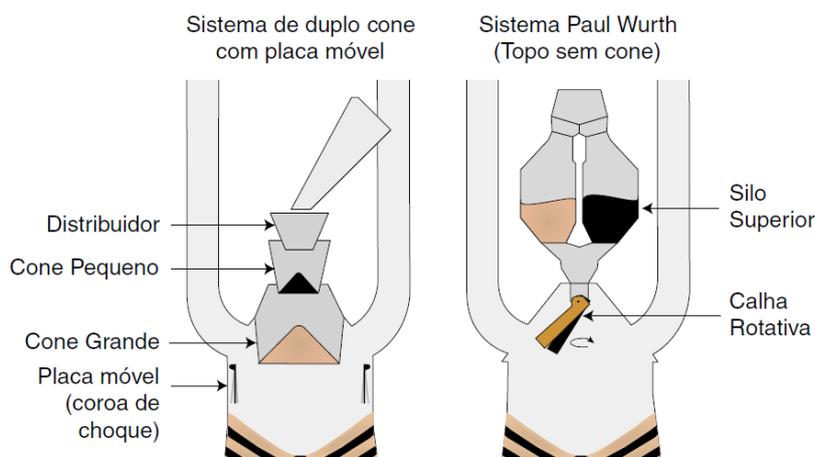


Figura 3.7 - Tipos de sistemas de carregamento atualmente utilizados (Geerdes, 2009), a esquerda o sistema duplo cone e a direita o sistema BLT da Paul Wurth

O objetivo do controle de distribuição de carga é maximizar a eficiência do gás no alto-forno, mantendo o equilíbrio adequado entre o fluxo periférico e central, a permeabilidade ao gás, o controle das camadas da carga no topo e a janela de coque no leito do alto-forno. A importância do controle de distribuição de carga tem sido reconhecida há muito tempo. Na década de 70 a dissecação dos altos-fornos no Japão mostrou que o perfil da distribuição de carga influencia a eficiência e produtividade do alto-forno (Kanbara *et al.*, 1976). Com base no conhecimento desenvolvido, as tecnologias de controle de distribuição de carga foram revolucionadas como a criação do sistema de carregamento tipo *bell less top* (Naito *et al.*, 2015).

Atualmente, cerca de 80% dos altos-fornos no mundo com menos de 20 anos tem o topo do tipo *bell less top* (BLT), que é um sistema de carregamento com grande flexibilidade de distribuição da carga. O percentual de utilização do sistema BLT é compatível com os dados de usinas do Japão no ano de 2013, onde 20 dos 27 altos-fornos em funcionamento no país eram equipados com esse sistema (Naito *et al.*, 2015).

Nos últimos anos o sistema *bell less top* evoluiu consideravelmente e atualmente no Brasil os grandes altos-fornos possuem esse sistema de carregamento. A tecnologia teve seu início na década de 70 com o *minicentral Feed BLT* que evoluiu para o *3 Hopper BLT* como mostrado na Figura 3.8.

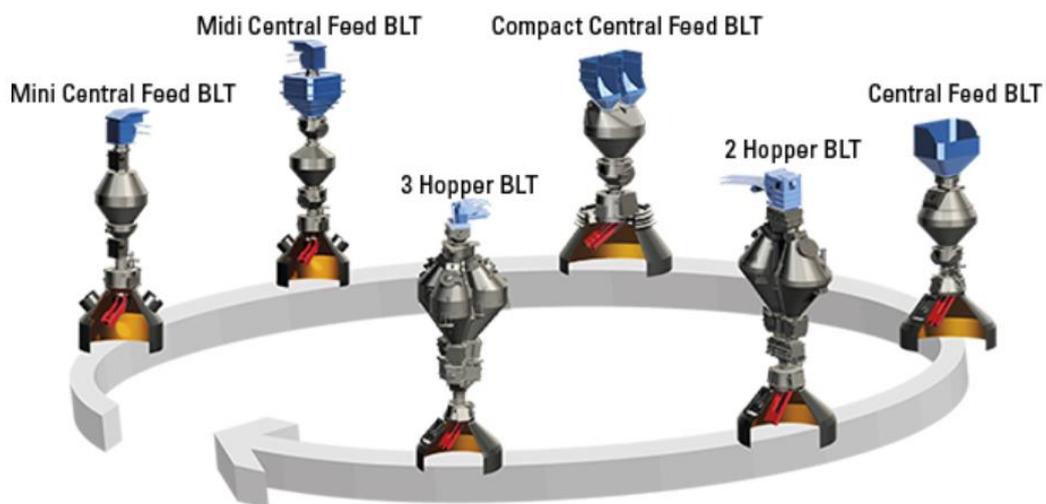


Figura 3.8 - Ciclo de evolução do topo BLT (Paul Wurth, 2018).

Nos altos-fornos equipados com sistema BTL (Figura 3.9), o topo do alto-forno é despressurizado e uma válvula na parte superior do forno (selo superior) se abre. Isso permite a entrada do material no *hopper* (silo) de carregamento. Após toda a carga ser carregada no interior do *hopper*, a válvula na parte superior se fecha e o sistema é novamente pressurizado até atingir a pressão interna do topo do alto-forno.

Com a pressão no interior do *hopper* equalizada à pressão do topo do alto-forno, uma válvula (selo inferior) na parte inferior é aberta e permite a descida da matéria-prima a partir da ação da força gravitacional. Ao descarregar o material no alto-forno, a válvula controladora de fluxo, chamada de LMG, atua regulando o volume de material que escoar até a calha distribuidora (ou calha rotativa).

A calha distribuidora possui um movimento rotativo em torno do eixo vertical do alto-forno com velocidade angular constante de 8 rpm. Durante a descarga, a ponta da calha se desloca ao longo do raio, permitindo a projeção da matéria-prima em posições variáveis no topo do alto-forno.

Normalmente, a operação desses sistemas é realizada com um sistema de controle que considera a distribuição pré-definida da carga no topo do alto-forno e, dependendo do tipo de carregamento, pode alterar o algoritmo de movimentação da calha rotativa de modo a atender as especificações da operação. O algoritmo de movimentação da calha rotativa em sistemas BLT varia entre as diversas usinas que o utilizam, dadas as particularidades das matérias-primas, como qualidade do coque, teor de ferro dos metálicos, granulometria, umidade, e também das características e estratégias dos diferentes altos-fornos (Manual de operação, Paul Wurth 2010).

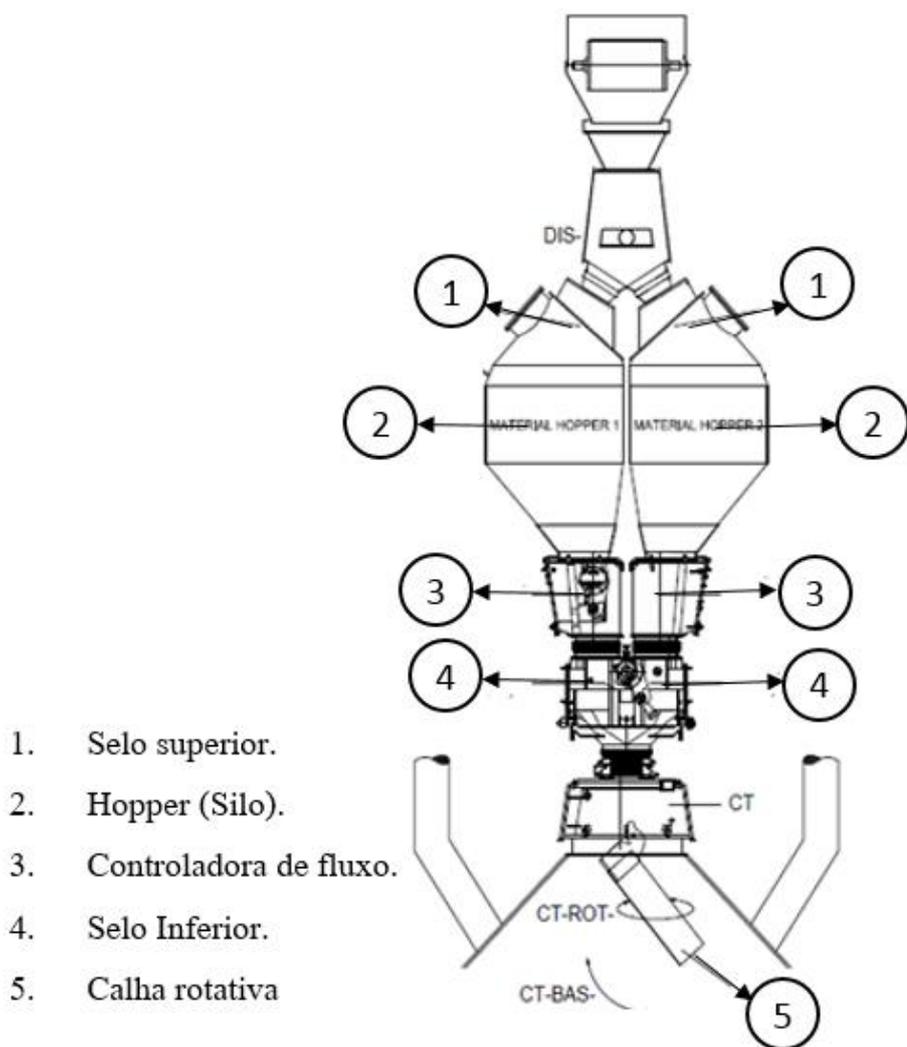


Figura 3.9 - Sistema de carregamento do topo bell-less top (Manual de operação, Paul Wurth 2010).

A tecnologia de carregamento BLT tem elevada versatilidade e vários graus de liberdade na otimização do perfil de carga no topo, viabilizado por seu movimento rotacional e translacional, como observado na Figura 3.9, com as abreviações CT-ROT e CT-BAS, respectivamente. Isso permite a descarga da matéria-prima no topo, em qualquer região na superfície da carga, controlando melhor a porosidade do leito de modo a não prejudicar o escoamento do gás no topo do reator.

3.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS.

Apresentado inicialmente por Cundall (1971) e aprimorado por Cundall e Strack (1979), o Método dos Elementos Discretos teve como objetivo inicial resolver problemas envolvendo solos na área geotécnica. No entanto, atualmente, é um método que se aplica a diversos campos de processamento industrial e tem ganhado força em áreas como mineração e siderurgia.

O Método dos Elementos Discretos, do inglês “*Discrete Element Method*” (DEM), é uma técnica matemática com aplicação computacional. O DEM permite acompanhar os esforços e movimentações de partículas em um sistema, quando submetidas a forças externas, interações com superfícies estáticas e dinâmicas e interações com outras partículas

Com o DEM é possível investigar o comportamento mecânico de materiais granulares, tanto a níveis microscópicos quanto macroscópicos, e pode-se dizer que é uma abordagem superior na modelagem descontínua de sistemas envolvendo partículas. O método considera as principais interações mecânicas, e não-mecânicas, no volume de controle calculado, permitindo que a resposta possa ser analisada detalhadamente e independente da escala.

No DEM, a interação das partículas é discreta e resolvida ao incorporar modelos de contato, a partir dos quais o movimento das partículas é calculado individualmente pela integração das equações do movimento que resultam do balanço de forças atuantes sobre cada partícula

Segundo Montellano *et al.* (2011), na indústria de granéis, o DEM é normalmente utilizado para determinar o comportamento de materiais granulares em silos e tremonhas, avaliando também as pressões exercidas pelo material armazenado e as modificações do fluxo na descarga de grãos. O DEM também é frequentemente utilizado na indústria farmacêutica, mineração, siderurgia e indústrias de alimentos, bem como no projeto de construções, terraplanagem e máquinas agrícolas.

A Figura 3.10 apresenta de forma esquemática o ciclo de cálculo do método dos elementos discretos, que após a etapa inicial de criação das partículas, tem-se (DEM Solutions, 2018):

- Realiza detecção das colisões entre elementos (partículas) vizinhos;
- Calcula as interações das colisões entre as partículas usando um modelo de contato;
- Integra o domínio de tempo ao sistema de equações de movimento;
- Determina as posições e velocidades das partículas individuais;
- Computa as quantidades de transporte relevantes, propriedades da população e analisa a evolução da estrutura;
- Atualiza as novas colisões e o balanço de forças.

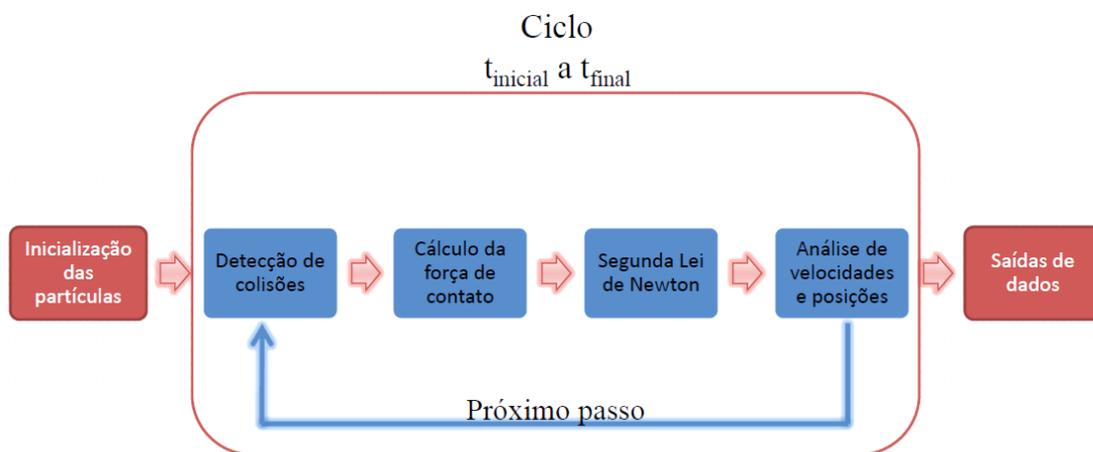


Figura 3.10 - Ciclo de atualização do DEM entre instantes de tempo de simulação

O primeiro passo é a detecção de contatos; uma vez que o contato entre elementos é detectado, deve-se calcular as forças resultantes desse evento. No caso do DEM, existe uma gama de modelos de contatos baseados na teoria de Hertz, que prevê, para partículas esféricas, que quando dois corpos curvos de diferentes raios de curvatura são colocados em contato, eles irão se tocar em um ponto ou ao longo de uma linha. A aplicação de pequenas cargas causa deformação elástica, aumentando a área de contato através das quais as cargas são distribuídas.

Uma boa estratégia para reduzir o custo computacional demandado nas simulações DEM é aproximar as geometrias dos elementos granulares por esferas; já que a teoria Hertz é desenvolvida para resolver o contato mecânico entre corpos esféricos Hertz-Mindlin (1953).

Devido à alta complexidade do modelo de Hertz, uma abordagem mais simples foi desenvolvida. No caso, o modelo Hertz-Mindlin (1953) é usado em substituição ao modelo

original de contato linear elástico de Hertz e baseia-se na teoria de Hertz para o cálculo da força de contato na direção normal e no modelo antiderrapante de Mindlin na direção tangencial.

O modelo de contato de Hertz-Mindlin é um dos modelos disponíveis no software comercial de simulação DEM chamado EDEM (DEM Solutions, 2018), sendo altamente indicado para descrever a zona granular do alto-forno. Este modelo implementado em sua versão sem deslizamento tem sido usado por diversos pesquisadores, seja na modelagem de fluxos granulares (como em chutes, silos e carregamento de altos-fornos), ou mesmo na simulação de equipamentos de mistura como utilizado por Mitra (2016) e Xu *et al.* (2018).

No modelo de Hertz-Mindlin a força de contato normal, F_n , pode ser calculada pela equação 3.3.

$$F_n = \frac{3}{4} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 3.3}$$

δ_n é a sobreposição normal, E^* e R^* podem ser calculados pelas equações 3.4 e 3.5, respectivamente.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - \nu_j^2)}{E_j} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad \text{Equação 3.5}$$

E_i , ν_i , R_i , E_j , ν_j e R_j são, respectivamente, o Módulo de elasticidade de Young, a Razão de Poisson e o raio de cada esfera em contato de subscrito i e j. O raio R^* é o raio equivalente de duas esferas em contato.

A força normal de amortecimento é dada pela equação 3.6:

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} V_n^{\vec{rel}} \quad \text{Equação 3.6}$$

$V_n^{\vec{rel}}$ é a velocidade relativa normal, m^* é a massa equivalente das duas esferas dada pela média harmônica na equação 3.7 com partículas de subscrito i e j, S_n é a rigidez normal:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad \text{Equação 3.8}$$

O parâmetro β da equação 3.6 é dado pela relação $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$, sendo e o coeficiente de restituição à força tangencial F_t , δ_t é a sobreposição tangencial e S_t a rigidez tangencial dada pela equação 3.10:

$$F_t = -S_t \delta_t \quad \text{Equação 3.9}$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde G^* é equivalente ao módulo de cisalhamento e a força tangencial de amortecimento F_t^d pode ser dada por:

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* V_t^{rel}}$$

Equação 3.11

Na qual V_t^{rel} é a velocidade relativa tangencial. A força tangencial é limitada pela fricção de Coulomb $\mu_s F_n$, onde μ_s é o coeficiente de fricção estática.

O atrito de rolamento é dado por:

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i$$

Equação 3.12

Onde μ_r é o coeficiente de rolamento de fricção, e ω_i é o vetor unitário da velocidade angular do objeto no ponto de contato.

Como mostrado por John *et al.* (2000), a teoria completa de Hertz é bastante complexa para se aplicar ao código baseado em DEM usando a forma real das partículas, já que seu desenvolvimento é para superfícies parabólicas. Porém, pode-se adequar à geometria das partículas utilizando conjuntos de esferas e assim reduzir a demanda computacional na detecção de contatos de partículas irregulares, obtendo uma adequação entre a precisão dos cálculos e viabilidade de aplicação.

Com o modelo de força de contato e parâmetros definidos, inicia-se o passo que é a aplicação da segunda lei de Newton e calcula-se o deslocamento para cada contato. No entanto, o sistema é transiente e dependente do tempo, com isso, é importante ajustar adequadamente o espaço de tempo entre os ciclos de cálculo das movimentações das partículas, pois tem impacto direto na estabilidade da integração.

A adequada definição do passo de tempo da integração numérica é essencial, pois elevados intervalos de tempo podem levar à sobreposição completa das partículas e assim à perda de informação dos contatos e alteração no balanço de energia.

Para tal, utiliza-se um percentual do tempo de duração do menor tempo de contato do sistema, onde para um modelo de esferas macias calcula-se como (DEM Solutions, 2014):

$$t_{ct} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k}{m^*} \left(\frac{\beta^{*2}}{1 + \beta^{*2}} \right)}} \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde $\beta^* = \frac{\pi}{\ln(e)}$, sendo e o coeficiente de restituição; neste caso, é interessante definir m^* sendo da menor partícula do sistema e, para melhorar a sua acurácia, utilizar apenas um percentual do tempo crítico t_{ct} .

Por fim, calcula-se pela equação 3.14 e equação 3.15 a aceleração e o torque de cada partícula no sistema.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{Equação 3.14}$$

$$T = I\alpha^* \quad \text{Equação 3.15}$$

3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ALTO-FORNO

3.3.1 Simulação no alto-forno

A simulação de processos industriais evoluiu nos últimos anos e atualmente técnicas mais avançadas como o DEM tem ampla aplicação em diversos ramos da ciência. No caso específico dos altos-fornos, muitos autores têm buscado entender o comportamento do equipamento sob certas condições de operação, como por exemplo Ariyama *et al.* (2010). Já outras pesquisas complementam esse conhecimento entendendo o comportamento dos materiais expostos a certas condições de processamento, como feito por Tavares e Carvalho (2012), que avaliaram o comportamento de degradação de um minério itabirítico brasileiro durante operações de manuseio.

Na modelagem do processo do alto-forno, dito anteriormente, um avanço significativo foi alcançado na década de 1970 com as análises da dissecação feitas por Kanbara *et al.* (1976), época em que a modelagem matemática estava sendo fortemente aplicada. Naquele momento, os principais modelos baseavam-se na solução de equações diferenciais oriundas dos balanços de massa e energia do sistema que era definido em uma dimensão, como por exemplo, os modelos propostos por Yagi *et al.* (1970).

Com o melhor entendimento dos fenômenos, foram desenvolvidos abordagens de simulação para duas e três dimensões em regime permanente por Sugiyama *et al.* (1987), e três dimensões em regime transiente por Takatani *et al.* (1999). Com a crise do petróleo na década de 70, a elevação do preço dos óleos combustíveis aumentou o custo de operação dos altos-fornos e fontes de energias alternativas ganharam força. Dos combustíveis auxiliares utilizados nesse período, a injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras foi a que mais se destacou, evoluindo significativamente ao longo dos últimos 30 anos. Acompanhando o desenvolvimento da injeção de carvão, modelos matemáticos de 4 fases foram propostos, adicionado as partículas finas como uma fase nas atuais três fases consideradas (Austin *et al.*, 1997). Para melhor entendimento dessa evolução recomenda-se a leitura de “*Recent Progress on Advanced Blast Furnace Mathematical Models Based on Discrete Method*” de Ariyama *et al.* (2014).

Observa-se na Figura 3.11 a evolução do consumo de diferentes combustíveis nos altos-fornos do Japão desde o fim da segunda guerra mundial. Uma análise mais detalhada encontra-se em Naito *et al.* (2015).

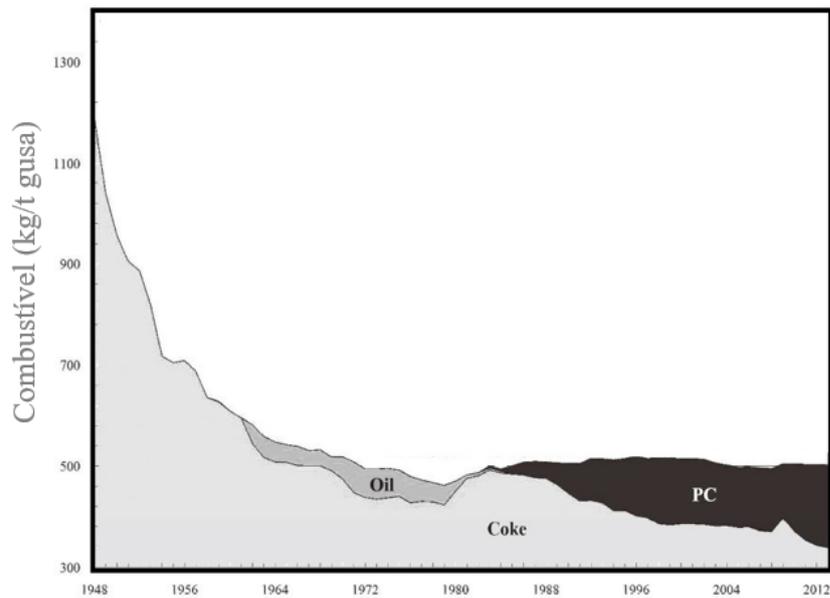


Figura 3.11 - Evolução anual da injeção de óleo e carvão após a segunda guerra mundial (Naito *et al.*, 2015)

À luz desse cenário de modelagem matemática do alto-forno, pode ser observado na Figura 3.12 um diagrama com todas as etapas de evolução na modelagem em altos-fornos (Ariyama *et al.*, 2014).

Atualmente, técnicas de modelagem avançada, como o método dos elementos discretos (DEM) tem permitido um entendimento mais aprofundamento do processo do alto-forno. Isso devido ao fato de o DEM ser capaz de avaliar o comportamento individual das partículas e suas influências nos materiais granulares, tornando-o potencial ferramenta para entender os fenômenos de segregação, degradação e distúrbios localizados no reator. Nos últimos anos a aplicabilidade do método dos elementos discretos (DEM) nos altos-fornos expandiu-se, isso devido ao desenvolvimento e progresso da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores. Essa abordagem, entretanto, apresenta limitações práticas para serem desenvolvidas, tais como a representação das fases na zona de coesão, incorporação de partículas finas e o acoplamento da degradação mecânica a frio e a quente que ocorre no reator (Ariyama *et al.*, 2014).

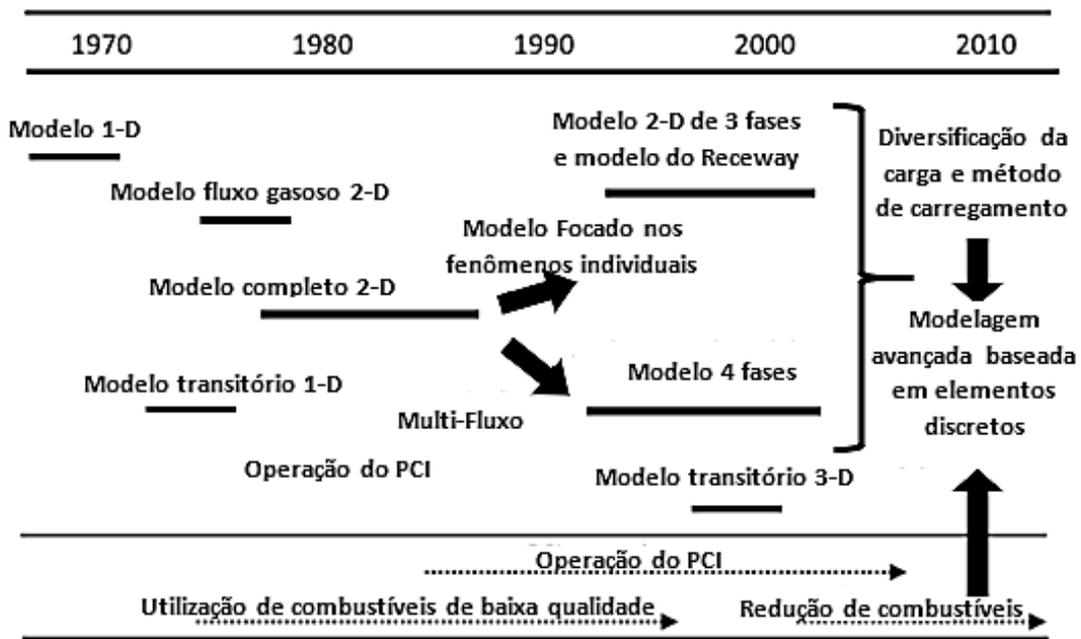


Figura 3.12 - Progresso da modelagem matemática em alto forno. Adaptado de Ariyama *et al.* (2014)

Teoricamente é possível descrever com DEM todo o sistema granular presente no alto-forno. Entretanto mesmo com a recente evolução na capacidade computacional, o esforço demandado para registrar a presença de inúmeras partículas, detectar e calcular os resultados das interações entre elas e integrar as equações do movimento de cada uma das partículas, é muito grande. Desta forma, muitos autores têm reduzido a escala do problema ou dividido o sistema em partes, pois a solução completa do alto-forno em escala real exige o processamento de centenas de milhões de partículas.

Como o objetivo da simulação é representar e solucionar da melhor forma possível os problemas em escala real, a avaliação do escalonamento deve ser feita com muito cuidado, especialmente no ajuste da geometria para se evitar efeitos colaterais. Como constatado por Mitra *et al.* (2016), o escalonamento 1:10 da garganta do alto-forno gerou efeitos de parede que dificultaram a adequada representação dos fenômenos na distribuição de carga. Observa-se na Tabela 3.2 uma grande variação no módulo de Young's e nos coeficientes de restituição, atrito estático e dinâmico utilizados nas simulações em altos-fornos, pois acabam absorvendo os efeitos de escalonamento.

Como pode ser visto na Tabela 3.2, a abordagem via DEM exige alguns parâmetros de entrada para partículas e geometria, visto da coluna 4 a 13. A definição e calibração dos parâmetros dos modelos de contato usados nas simulações DEM devem ser feitas adequadamente, pois são extremamente críticos e muitas vezes difíceis de se avaliar.

A resposta das simulações não depende dos parâmetros isoladamente, e sim do conjunto de parâmetros definido, como mostrado por Yan *et al.* (2015) que avaliaram a resposta no ângulo de repouso, fluxo mássico e formato da pilha, a partir da variação do módulo de Young's, coeficiente de restituição, atrito estático e atrito dinâmico. Neste estudo foi observado que o módulo de Young's em determinadas faixas tem forte efeito no tempo computacional, porém pouco afeta o resultado das simulações. Já os coeficientes de atrito estático e dinâmico são interdependentes. Sendo que o aumento do coeficiente de atrito estático potencializa o efeito do coeficiente de atrito dinâmico na resposta do ângulo de repouso e fluxo granular

As simulações em DEM buscam representar de forma mais realista possível as condições de operação de um processo envolvendo partículas granulares, por consequência implica no aumento da demanda computacional. Para contrabalancear o aumento do nível de detalhe, pode-se dividir o problema a ser simulado em estágios, ou partes, como a abordagem utilizada por Xu *et al.* (2018), que simularam a segregação em hoppers em estágios.

No que diz respeito na descrição detalhada das partículas, pode-se citar por exemplo, os ajustes nas formas das partículas irregulares, que podem ser representadas como poliedros (Potapov e cambell, 2011). Um exemplo de arranjos de esferas é apresentado na

Figura 3.13.

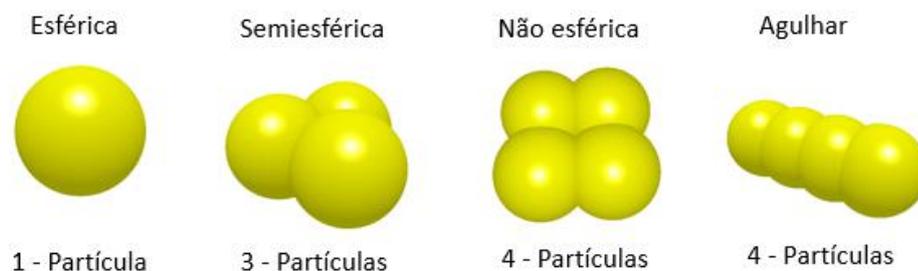


Figura 3.13 - Exemplos de representações de partículas granulares utilizando arranjos de esferas

Tabela 3.2 - Publicações recentes abordando simulações DEM de altos-fornos e respectivos parâmetros e critérios utilizados nas simulações

Fonte e Ano	Equipamento simulado	Materiais	Densidade (kg/m³)	Módulo de Young's (Gpa)	Razão de Poisson	Coefficiente de atrito estático	Coefficiente de atrito dinâmico	Coefficiente de restituição	Modelo de força de contato	Massa total	Número de partículas	Diâmetro da partícula (mm)	Razão de escala da partícula	Escala do equipamento
XU, et al., 2018	Bell-Less Top com dois hoppers	Coque Parede Correia Coque-Coque Coque-Parede Coque-Correia	1050 4500 1200	0,022 5,00 0,01	0,22 0,3 0,4	- - - 0,56 0,41 0,9	- - - 0,15 0,09 0,34	- - - 0,18 0,2 0,1	Hertz-Mindlin	23t	191.665	Diâmetro do coque entre 37,5-120 mm	2:3	1:1
Narita, et al., 2018	Bell-Less Top	Coque Minério	1050 3300	0,54 3,5	0,22 0,25	-	-	-	Não informado	10 kg 75 kg	-	Diâmetro do coque entre 19-75mm	1:1	1:3
Mitra, et al., 2016	Bell-Less Top	Coque Pelota Coque-Aço Pelota-Aço	1050 4800	0,022 0,025	0,2 0,25	- - 0,5 0,5	- - 0,35 0,25	- - 0,3 0,3	Hertz-Mindlin	Até 3888 kg	-	De 7,5 até 18mm Diâmetro de 3 mm - -	1:4	1:10
Ariyama, et al., 2010	Leito de partículas	Minério	3950	400	0,24	0,5	0,1	-	Não informado	-	60.000	Diâmetro entre 0,5 e 10mm - -	1:1	1:1
Nogami, et al., 2011	Alto-forno completo	Coque Minério	1100 4000	1 1 e 0,02	0,21 0,24	0,3 0,3	-	-	Voigt model	-	600.000	Coque - 300 mm Minério - 150 mm	Não informado	1:1
Ariyama, et al., 2014	Alto-forno completo	Coque Minério	1000 4100	0,05 até 1 0,05 até 1	0,21 0,24	0,3 0,3	0,1	-	Voigt model	-	600.000	Coque - 300 mm Minério - 150 mm	Não informado	1:1

3.3.2 Modelagem fenomenológica da distribuição de carga.

Para aproveitar plenamente a flexibilidade do sistema de carregamento dos altos-fornos equipados com o sistema *bell-less top*, são utilizados modelos matemáticos fenomenológicos de distribuição de carga que orientam os operadores do alto-forno no carregamento de matérias-primas. Esses modelos fornecem informações que permitem ao operador do alto-forno buscar as condições ótimas de operação, como por exemplo, a maximização do rendimento gás no topo do alto-forno (ηCO_2), estabilização da descida da carga no reator e ainda, controlar do fluxo de calor na parede do alto-forno.

A principal vantagem da modelagem fenomenológica é o menor tempo de processamento computacional quando comparado ao DEM. Os modelos fenomenológicos de carregamento do alto-forno permitem avaliar a distribuição de carga quase que em tempo real; enquanto a abordagem com DEM pode demandar dezenas de horas para realização de uma simulação de descarga de apenas um *hopper*. Portanto, o DEM torna-se inviável como um sistema de controle direto do processo.

Os modelos de distribuição de carga no topo do alto-forno devem prever o impacto das ações no perfil da carga às mudanças do algoritmo de distribuição. No entanto, essa previsão depende da sua acurácia e foi observado por Shi *et al.* (2015) que a mesma depende do modelo de trajetória de queda, perfil de empilhamento e descida do leito de carga, que pode afetar especialmente o perfil na parte periférica.

Na modelagem fenomenológica de carregamento de altos-fornos, alguns autores utilizaram modelos físicos construídos em escala reduzida para calibrar os parâmetros dos modelos de carregamento. Uma vez calibrados os parâmetros do modelo deve-se realizar o processo de *scale-up*, como feito por Ariyama *et al.* (1993) ou em outros casos analisa-se o modelo em escala reduzida inferindo o resultado do modelo em escala no equipamento em operação. No Japão foi utilizado um modelo de alto-forno construído em escala reduzida, igual a 1/10 do tamanho original dos altos-fornos 1 e 2 da NKK com o objetivo de se avaliar a distribuição de carga no topo do alto-forno, que por sua vez, gerou dados para subsidiar o desenvolvimento de um modelo matemático fenomenológico de distribuição de carga (Hattori *et al.*, 1993).

Outros autores também trabalharam com modelos físicos do alto-forno construídos em escala reduzida, como Park *et al.* (2011). Park utilizou dois modelos físicos em escala reduzida, sendo 1/12 e 1/5 do tamanho real do alto-forno, e complementaram suas análises com simulações usando um modelo virtual construído em DEM. Durante o desenvolvimento do modelo matemático de distribuição de carga no topo do alto-forno, Park *et al.* (2011) Ajustaram equações empíricas para o cálculo do empilhamento das partículas no topo do alto-forno e para as curvas de descarga usando os resultados do modelo físico com análise de imagem. Adicionalmente, utilizaram um modelo em DEM para ajustar o formato e ponto de impacto das curvas de distribuição para os ângulos 46°, 40°, 32°, e 23°. O modelo de empilhamento foi ajustado a partir de um modelo de acrílico, onde definiu-se os coeficientes das equações 3.23 e 3.24 e ajustando o modelo a partir da análise de imagem do modelo em escala 1/12 e DEM.

Na maioria dos modelos fenomenológicos publicados, o algoritmo de resolução das equações é bem similar. Na Figura 3.14 observa-se um algoritmo de solução típico, apresentado por Ariyama *et al.* (1993).

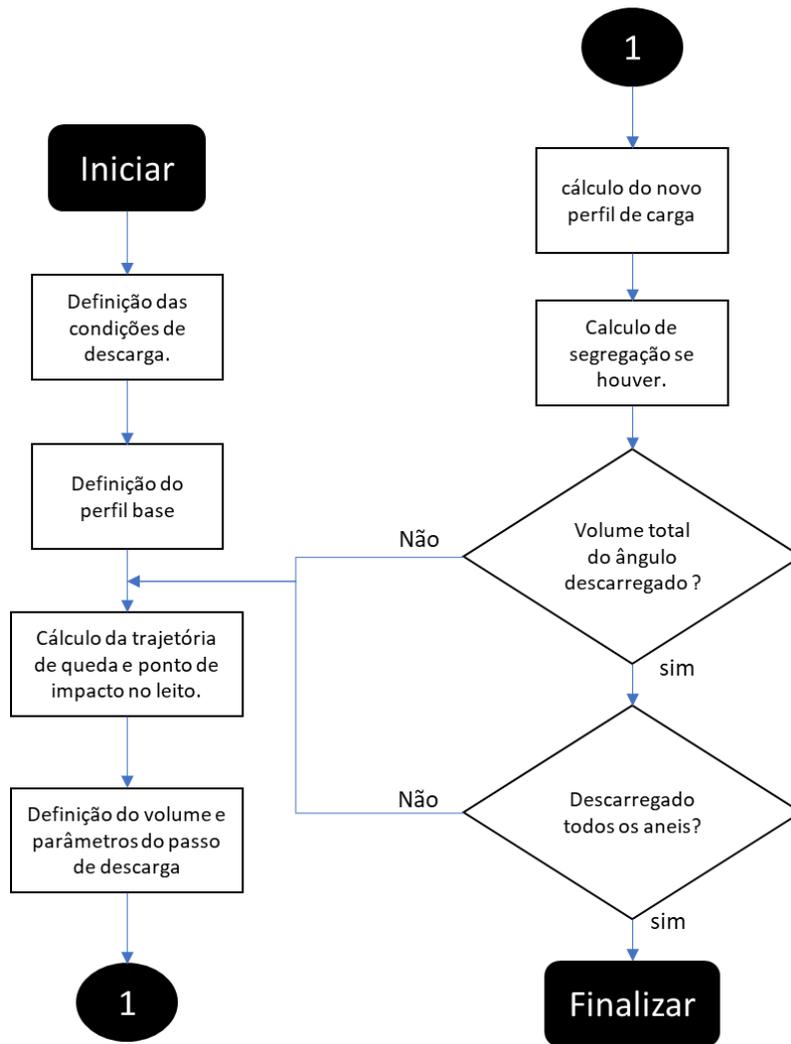


Figura 3.14 - Algoritmo de resolução da modelagem de distribuição de carga Ariyama *et al.* (1993) (Modificado)

O algoritmo de resolução inicia com a definição das condições da descarga e de um perfil base de carga que normalmente é definido empiricamente na parte superior do alto-forno. Na sequência, são calculados a trajetória e o ponto de impacto no leito de partículas. Durante o carregamento no leito o ponto de impacto se altera, seja pela descida da carga ou pela mudança do ângulo de descarga, com isso, a inclusão de um algoritmo de descida de carga pode resultar em aumento significativo na acurácia da resolução como mostrado por Shi *et al.* (2015).

Para o cálculo da curva de trajetória, deve-se inicialmente calcular a velocidade de saída do material no *feeder spout* como feito por Park *et al.* (2011) e Radhakrishnan

(2001) que utilizaram a equação 3.16 para calcular a velocidade de escoamento da matéria-prima no *feeder spout*.

$$V_{2v} = [V_{1v}^2 + 2gH_d]^{0,5} K_f \quad \text{Equação 3.16}$$

na qual V_{1v}^2 e V_{2v} são respectivamente as velocidades de entrada e de saída do feeder spout, H_d é o comprimento do feeder spout (em m), g é a gravidade (em m/s²) e K_f é o fator de correção para as colisões. Ou seja, trata-se de um modelo de queda livre (Equação de Torricelli) multiplicado por um fator de correção K_f . Geralmente ajusta-se o fator K_f durante um teste de trajetória com uma vazão de descarga constante das matérias-primas do *hopper*. Entretanto, é sabido que durante a descarga do *hopper* a vazão de descarga pode flutuar, e o modelo proposto não seria sensível a essa variação podendo levar a erros no cálculo da trajetória.

Com a definição de V_{2v} , pode-se calcular V_3 que é a velocidade das partículas na saída da calha rotativa, sendo definida pela equação abaixo (Radhakrishnan e Ram, 2001).

$$V_3 = \left[\omega^2 \cos\alpha (\cos\alpha + \mu_f \sin\alpha) L^2 \Phi_{cor}^2 + 2g(\sin\alpha + \mu_f \cos\alpha) L^2 \Phi_{cor} + (V_{2v} \sin\alpha)^2 \right]^{0,5} \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde, ω é a velocidade angular (em radianos/s), μ_f é o coeficiente de fricção entre as partículas e a superfície da calha, L é o comprimento da calha (em m), α é o ângulo entre a calha e a horizontal (em radianos) e Φ_{cor} é o fator de correção.

V_3 pode ser decomposto em três coordenadas, V_r velocidade radial, V_z velocidade vertical e V_θ velocidade tangencial, dando origem equações abaixo.

$$V_r = V_3 \cos(\alpha) \quad \text{Equação 3.18}$$

$$V_z = -V_3 \sin(\alpha) \quad \text{Equação 3.19}$$

$$V_\theta = r_c \omega \quad \text{Equação 3.20}$$

Como se trata de um modelo bidimensional, a componente V_θ não é utilizada na solução. Assim, utiliza-se V_r e V_z para calcular a posição das partículas nos eixos horizontal (X) e vertical (Y), respectivamente.

$$X = V_3 \cos(\alpha) \cdot t \quad \text{Equação 3.21}$$

$$Y = V_3 \sin(\alpha) \cdot t + \frac{gt^2}{2} \quad \text{Equação 3.22}$$

na qual t é o tempo transcorrido desde o momento que a partícula deixa a ponta da calha (em s).

A componente radial tem sua velocidade constante ao longo do tempo, no entanto, a componente axial sofre efeito da aceleração da gravidade e por isso é acrescentado o termo $\frac{gt^2}{2}$.

Com a trajetória definida, avança-se mais um passo no algoritmo e define-se o ponto de contato com o perfil base, avançando para o modelo de empilhamento.

A Tabela 3.3 mostra as variáveis da equação do ângulo de repouso, onde ϑ_p é o ângulo entre o centro do alto-forno e o pico da pilha, e β_p é o ângulo formado entre o pico da pilha e a parede do alto-forno, na Tabela 3.4 pode-se observar os principais parâmetros utilizados em um experimento em escala 1:5 (Park *et al.*, 2011).

Tabela 3.3 - Sumário das variáveis do modelo de estimativa do ângulo de repouso.

Máximo ângulo de repouso (°)	A_{max}
Diâmetro da partícula (m)	D
Fator de forma (-)	F_s
Diâmetro da garganta do topo do alto-forno (m)	d
Distância do centro do alto-forno ao ponto de impacto (m)	X_x
Constante (-)	C

Tabela 3.4 - Parâmetros dos carregamentos metálico e de coque utilizados por Park *et al.* (2011)

Parâmetros	Material	Valor
Máximo ângulo de repouso – A_{max} (°)	Metálico	35,3
	Coque	38,4
Diâmetro da partícula – d (m)	Metálico	0,004
	Coque	0,008
Fator de forma - F_s (-)	Metálico	0,70
	Coque	0,85
Comprimento da calha (m)	-	0,9

A constante C utilizada nas definições de ϑ_p e β_p foi obtida através de análise de imagem em modelos em escala e com o uso de simulação por DEM

$$\vartheta_p = A_{max} C \frac{D^{0,05}}{4F_s^{0,05}} \quad \text{Equação 3.23}$$

$$\beta_p = A_{max} C \frac{D^{0,05}}{4F_s^{0,05}} \cdot \frac{d^{1,4}}{2X_x \cdot 5.8} \quad \text{Equação 3.24}$$

A conclusão do cálculo pelo modelo de Park é realizada com a estimativa do volume da carga descarregada a partir do ponto de contato da trajetória no perfil base, no topo do alto-forno, conforme os passos descritos abaixo:

- I. Calcula-se a velocidade de saída do *feeder spout* V_{2v} .
- II. Com V_{2v} , calcula-se a velocidade de saída da calha rotativa V_3 .
- III. Define-se a trajetória calculando as coordenadas (X, Y), como função do tempo de queda.
- IV. Define-se o novo ponto de contato com a trajetória X e Y.
- V. Calcula-se o volume equivalente a descarga realizada a partir dos ângulos ϑ_p e β_p .
- VI. Atualiza-se o perfil da carga.
- VII. Define-se o novo ponto de contato com a trajetória X e Y.
- VIII. Define-se os novos ângulos ϑ_p e β_p .
- IX. Calcula-se o volume equivalente da nova descarga realizada e retorna até o passo VI até que o volume seja totalmente descarregado.

O ciclo deve ser repetido até a que toda a batelada de matéria-prima seja descarregada no topo do alto-forno. Na Figura 3.15, pode-se verificar o esquema com os principais parâmetros do modelo apresentado por Park *et al.* (2011).

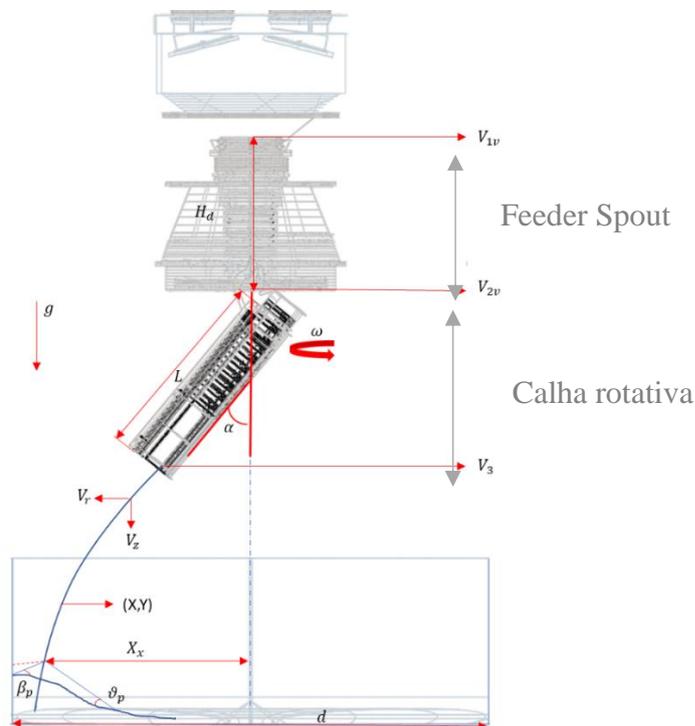


Figura 3.15 - Esquema dos principais parâmetros do modelo fenomenológico de carregamento do alto-forno proposto por Park *et al.* (2011).

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada nesta dissertação é dividida em cinco etapas principais que serão abordadas individualmente neste capítulo. A primeira parte, trata da definição do escopo do modelo do alto-forno utilizado. A segunda parte apresenta a caracterização das matérias-primas. A terceira parte apresenta a elaboração e a metodologia para a realização das simulações DEM do carregamento do alto-forno. A penúltima parte apresenta o pós-processamento das simulações DEM e por fim, a quinta parte apresenta a metodologia para o desenvolvimento do modelo fenomenológico de distribuição de carga no topo do alto-forno.

4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MODELO EM DEM

Os modelos de distribuição de carga têm como objetivo representar adequadamente os fenômenos ocorridos no carregamento dos altos-fornos. Dada a especificidade tanto das matérias-primas quanto da geometria e operação dos altos-fornos, optou-se por desenvolver o modelo baseado na geometria de dois altos-fornos idênticos atualmente em operação na cidade do Rio de Janeiro. Tanto as simulações DEM quanto o desenvolvimento do modelo tridimensional foram baseados em um modelo em escala real dos altos-fornos escolhidos (escala 1:1). A utilização da escala real, embora custosa computacionalmente, minimiza a necessidade de utilização de modelos para conversão de resultados de escala reduzida para a escala real do reator.

Um esquema apresentando as principais dimensões e características de projeto do alto-forno escolhido são apresentados na Figura 4.1 e Tabela 4.1.

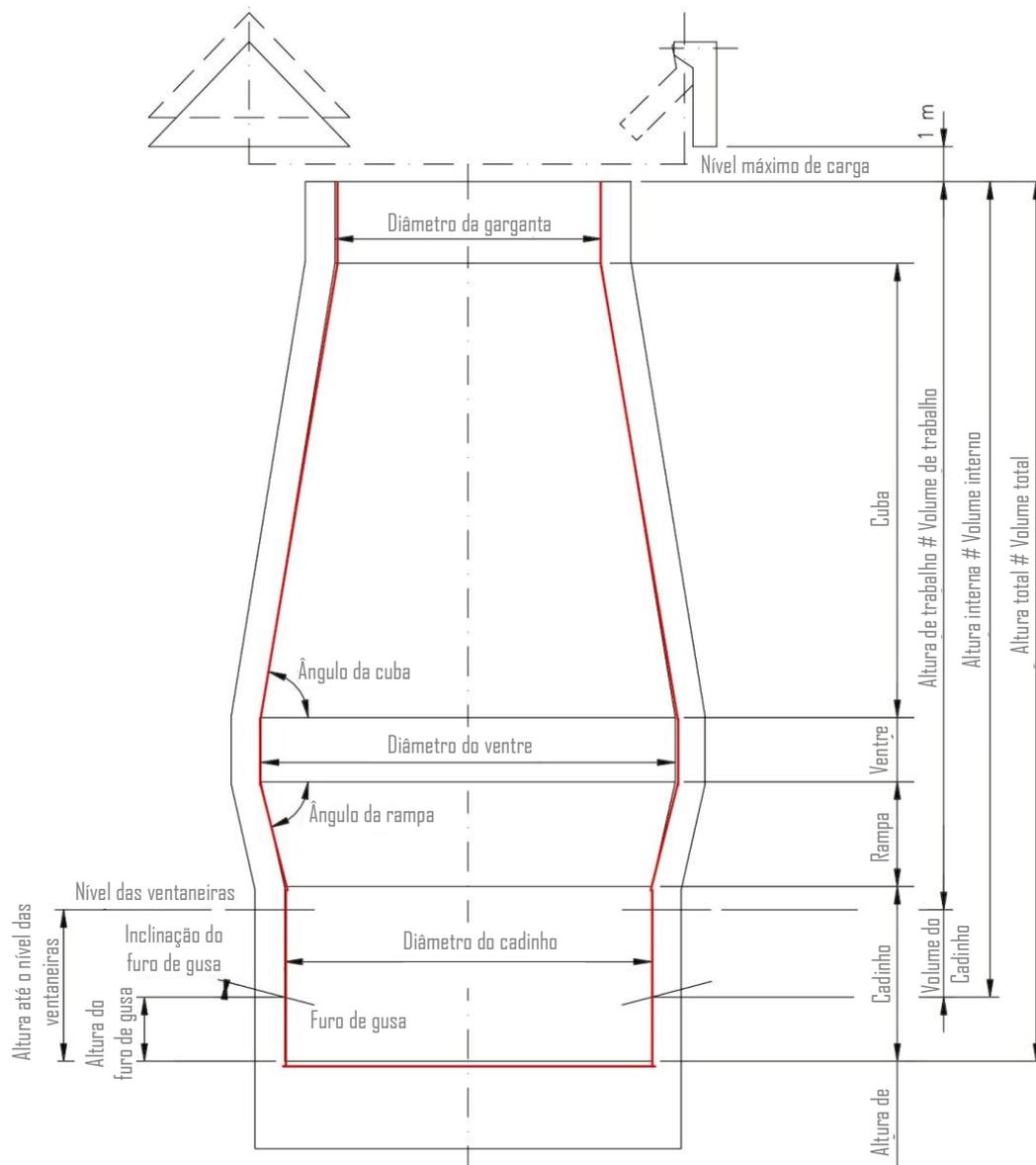


Figura 4.1 - Esquema apresentando as dimensões principais do alto-forno considerado neste trabalho. O contorno em vermelho representa as paredes internas do alto-forno

Tabela 4.1 - Resumo dos dados de projeto do alto-forno utilizado nesse trabalho

Dados de projeto do alto-forno		
Dado de Projeto	Unidade	Valor
Produção	t/ano	2.650.000
Produção	t/d	7500
Disponibilidade	%	97
Furo de gusa	n°	2
Número de ventaneiras	n°	32
Diâmetro do cadinho	mm	12.000
Diâmetro do ventre	mm	14.520
Diâmetro da garganta	mm	8.500
Altura do cadinho	mm	7.600
Altura da rampa	mm	3.300
Altura do ventre	mm	2.600
Altura da cuba	mm	15.500
Altura de trabalho	mm	25.000
Volume de trabalho	m ³	3.284

A Tabela 4.2 mostra os principais dados de projeto do sistema de carregamento que foi o objeto de estudo desse trabalho.

Tabela 4.2 - Dados do sistema de carregamento

Dados de projeto do carregamento		
Dado de Projeto	Unidade	Valor
Volume do <i>hopper</i> do topo	m ³	70
Pressão do <i>hopper</i> do topo	bar	2,5
Diâmetro da válvula selo superior	mm	1235
Diâmetro da controladora de fluxo	mm	870
Diâmetro da válvula selo inferior	mm	990
Capacidade de descarga		
Coque	m ³ /s	0,2-0,7
Carga metálica	m ³ /s	0,2-1,0
Calha de distribuição		
Comprimento da calha	mm	3800
Velocidade de rotação	RPM	8
Velocidade de translação	°/S	0-1,6
Faixa de movimentação	°	2-52
Força motriz	-	Energia hidráulica

As condições gerais de carregamento foram definidas de acordo com as condições operacionais vigentes na planta, assim os estudos de caso foram definidos para permitir o melhor entendimento em função dos parâmetros operacionais em utilização Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados operacionais do alto-forno

Dados de projeto do alto-forno		
Dado de Projeto	Unidade	Valor
Produção	t/d	7.500
<i>Fuel Rate</i>	kg/t	505
Sínter/Pelota/Minério granulado	%	55/30/15
Volume de ar soprado	Nm ³ /h	290.000
Temperatura de sopro	°C	1.250
Temperatura de gusa	°C	1.480 – 1.500
Pressão de topo do alto-forno	Bar	2,5
Pressão na base do alto-forno	Bar	4,5
Enriquecimento de oxigênio	%	5
Injeção de carvão <i>rate</i>	kg/t	160
Volume de gás no topo	Nm ³ /h	449.500
Temperatura do gás no topo	° C	150 - 200
Pressão de topo do alto-forno	Bar	2,5
Corridas por dia	n°	6-10
Produção por corrida	t	975-1.225
Tempo entre corridas	min	15-30
Material carregado por dia	cargas	150-180

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Amostras das matérias-primas utilizadas nos dois altos-fornos adotados nesse trabalho foram coletadas na usina. Desta foram, foram enviadas ao Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM (COPPE/UFRJ) duas amostras de coque e uma amostra de sínter para caracterização das suas propriedades relevantes à realização das simulações DEM. Além dessas duas matérias-primas, a usina também utiliza minério granulado e pelotas de minério de ferro na composição da carga metálica, entretanto, esse tipo de material já havia sido previamente caracterizado em outros trabalhos do grupo do LTM (Laboratório de Tecnologia Mineral)

4.2.1 Análise Granulométrica

Uma das formas de se avaliar a qualidade física das matérias-primas é pela determinação da distribuição de tamanhos de partícula (granulometria). Para isto, foi utilizado o procedimento rotineiro de análise da granulometria por peneiramento mecânico a seco, seguindo a norma ISO 4701. No entanto, para que a amostra represente adequadamente o material que se deseja caracterizar, o método de coleta da amostra deve garantir que ela seja representativa desse universo, no que diz respeito aos parâmetros de interesse como citado por Goes *et al.* (1991).

Para garantir a representatividade das amostras de sinter e coque utilizadas no trabalho, foram utilizadas informações de 30 amostras coletadas compostas por sete incrementos diários, cujo coque é caracterizado em coque interno e externo, sendo o coque interno produzido na coqueria em operação na cidade do Rio de Janeiro, e o coque externo produzido em uma coqueria chinesa.

No caso do minério de ferro granulado e pelotas foram consideradas as análises granulométricas informadas no carregamento do lote, que por sua vez, são medidas em incrementos retirados a cada 90 t durante o abastecimento do trem que chega à usina.

As aberturas de peneiras utilizadas nas análises granulométricas das amostras foram definidas em função do tipo de material, conforme especificado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Distribuição de abertura de peneira usada no peneiramento de cada material

Abertura de peneira (mm)	Coque	Sínter	Pelota	Minério granulado	Small coke
120,0	X				
90,0	X				
80,0		X			
75,0	X				
63,5		X			
60,0	X				
50,0		X		X	
40,0	X	X			
35,0	X			X	X
20,0	X				X
18,0			X		
12,0			X		
10,0	X	X	X		X
8,0			X		
6,3				X	
5,0		X			

4.2.2 Medida da massa específica

A medição de massa específica para os materiais seguiu o procedimento descrito abaixo:

- Separação de lotes de 100 fragmentos na fração 9,5 x 6,7 mm.
- Pesagem do conjunto de partículas, para determinar a massa média das partículas.
- Seleção de 30 fragmentos (aleatoriamente), pesagem de cada um dos fragmentos a seco e submersos em água em um recipiente de volume conhecido, usando uma balança digital com precisão de centésimos de grama. O cálculo da densidade relativa de cada partícula a partir da equação 4.1.

$$\rho = \frac{m_{sec}}{m_{ppH_2O} - m_{pH_2O}} * \rho_{H_2O}$$

Equação 4.1

na qual, m_{sec} é a massa seca da partícula, m_{ppH_2O} é a massa do picnômetro com água mais a massa da partícula seca, m_{pH_2O} é a massa do conjunto partícula imerso no picnômetro com água e ρ_{H_2O} é a massa específica da água, o resultado ρ é a massa específica do material analisado.

4.2.3 Verificação da calibração dos parâmetros de contato para as matérias-primas

Uma amostra de 72,7 kg de coque foi preparada a partir da amostra original coletada na usina. Esta amostra foi separada em duas faixas, uma delas contendo todas as partículas retidas na peneira de abertura quadrada de 35 mm (coque grosso) e a outra contendo as partículas passantes na malha de 35 mm e retida na abertura de 10 mm (coque fino ou *small* coque).

A amostra de sinter foi recebida em dois tambores (Sinter A e Sinter B) totalizando 20 kg de massa e peneirada a seco para caracterização granulométrica. Essas amostras representam os sistemas de carregamento das balanças de sinter A e B.

No caso das pelotas e minério de ferro granulado, os parâmetros de contato obtidos foram oriundos de trabalhos realizados anteriormente no LTM e são reportados na Tabela 4.9 e Tabela 4.11, respectivamente.

4.2.3.1 Ensaio de ângulo de repouso

O ensaio de ângulo de repouso consiste em dispor uma certa quantidade de partículas sobre uma superfície plana, de modo que seja formada uma pilha. O ângulo de repouso, é o ângulo formado pela reta imaginária tangente à superfície da pilha e o plano horizontal.

Dependendo das características do material a ser ensaiado, o ensaio pode ser realizado de diferentes maneiras. No caso do coque grosso, utilizou-se um tambor de 51 cm de altura por 58 cm de diâmetro, de capacidade igual a 0,2 m³. O volume aparente de amostra adicionado ao tambor foi igual a 0,087 m³. O tambor foi rotacionado a uma velocidade de 4,5 %s permitindo, portanto, o escoamento das partículas de seu interior para o plano horizontal localizado a 42 cm do eixo de rotação do tambor. Registrou-se a altura máxima da pilha com uma trena. Todo o ensaio foi registrado em vídeo utilizando

uma câmera convencional com velocidade de aquisição de 60 quadros por segundo. A Figura 4.2 apresenta uma imagem durante o descarregamento da amostra de coque sobre o plano horizontal.

Para as amostras de *small* coque e sinter, repetiu-se o mesmo procedimento de formação de pilha, desta vez utilizando um tambor de menor volume, cujas dimensões são: diâmetro 30,0 cm e altura 31,5. Os volumes das amostras de *small* coque e sinter totalizaram cerca de 7.400 cm³.



Figura 4.2 - Execução do ensaio de determinação do ângulo de repouso para a amostra de coque grosso

4.2.3.2 Ensaio de ângulo de repouso sobre leito de partículas

Adicionalmente, com a finalidade de verificar a aplicabilidade dos parâmetros de contato das interações entre os diversos materiais presentes nas simulações de DEM do banco de dados do LTM, foram realizados ensaios adicionais de ângulo de repouso sobre leitos de partículas. Nestes ensaios, utilizou-se partículas em escala reduzida, ou seja, foram utilizados os materiais com granulometria truncada no limite de 40 mm, conforme pode ser visto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Faixa de tamanhos e massas dos materiais usados nos ensaios

Coque		
Tamanho	37,5 x 25 mm	< 25 mm
Massa	3,54 kg	9,04 kg
Granulado		
Tamanho	37,5 x 6,3 mm	
Massa	36,01 kg	
Pelotas de minério de ferro		
Tamanho	18 x 12 mm	12 x 10 mm
Massa	28,56 kg	4,99 kg
Sínter		
Tamanho	40 x 10 mm	< 10 mm
Massa	25,06 kg	17,98 kg

Para preparar o leito de partículas, utilizou-se uma base de madeira com geometria característica de um paralelepípedo com altura de 20 mm e com suas arestas medindo 472 mm e 515 mm. Estas medidas permitem que seja adicionado um leito de partículas de até 4862 cm³. Para produzir uma pilha de material foi utilizado um tubo cilíndrico de PVC com 94 mm de diâmetro interno, 400 mm de altura e com 3 mm de espessura, equivalente a 59032 mm³ de volume interno, como ilustra a Figura 4.3.

Os ensaios foram realizados com o total de duas repetições para cada tipo de combinação entre os materiais. Os primeiros ensaios foram realizados usando o leito e pilha com o mesmo tipo de partícula. Posteriormente, foram realizados ensaios utilizando um mesmo leito para cada tipo de material e alternando apenas o material para produzir a pilha. A Figura 4.4 ilustra o esquema utilizado para realizar os ensaios.

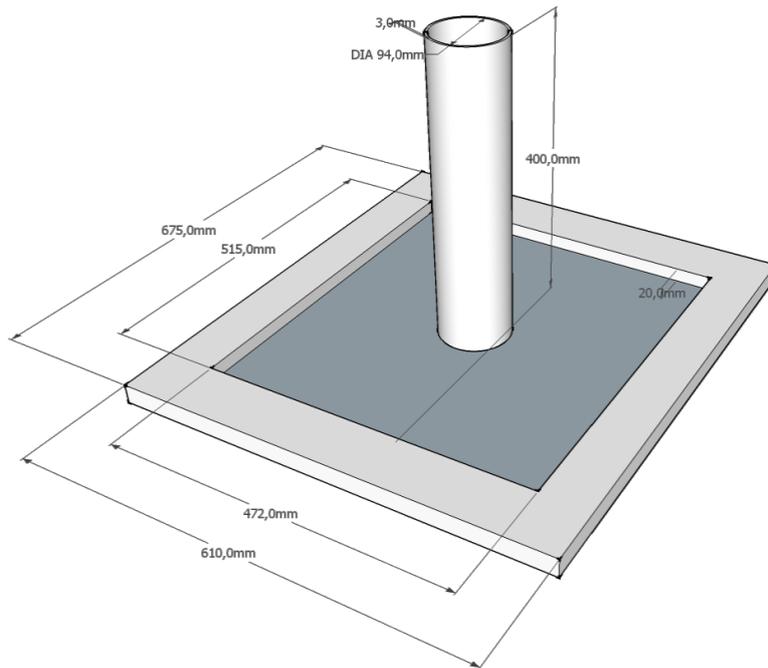


Figura 4.3 - Representação esquemática da caixa e do tubo utilizados nos ensaios de determinação do ângulo de repouso sobre leito de partículas

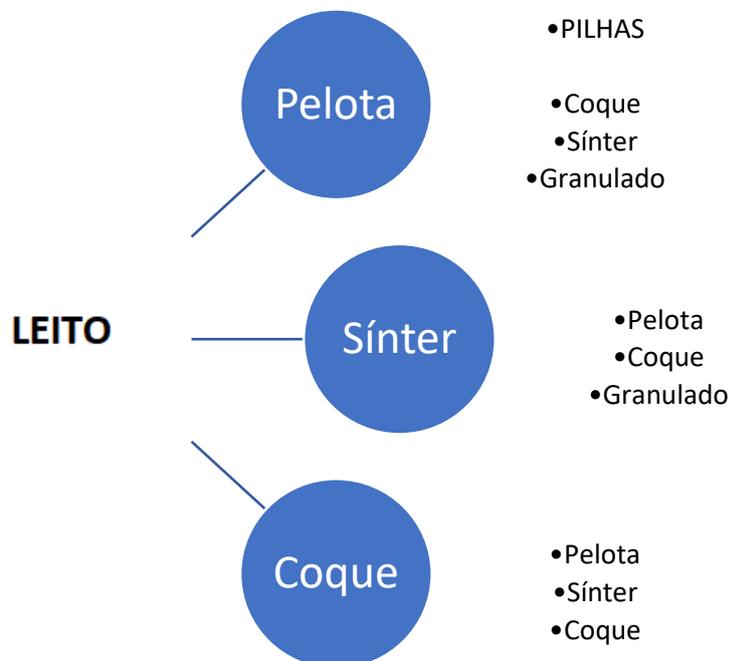


Figura 4.4 - Resumo esquemático dos ensaios realizados de determinação do ângulo de repouso sobre leito de partículas

Foram registradas fotos frontais para aferir os ângulos de repouso resultantes de cada uma das repetições. Além da foto frontal, para o primeiro ensaio foi ainda registrada uma foto de vista superior para cada combinação a fim de verificar o espalhamento da pilha formada sobre o leito de partículas.

4.2.3.3 Estratégia para definição dos parâmetros para as simulações

Os parâmetros de contato dos materiais granulares utilizados na simulação foram obtidos a partir de resultados de experimentos em laboratório ou da literatura conforme apresentado na seção 4.2.3.2. O modelo de contato utilizado nas simulações, Hertz-Mindlin (*no slip*), demanda, para cada material que sejam informados os valores da razão de Poisson, massa específica e módulo de cisalhamento. No presente trabalho, as massas específicas das partículas foram obtidas conforme apresentado na seção 4.2.3.1. Adicionalmente, optou-se por utilizar um valor padrão para a razão de Poisson, igual a 0,25, mesmo valor adotado por Lima (2016) e por Carvalho e Silva (2018). Finalmente, para o módulo de cisalhamento, utilizou-se o valor de 10^8 Pa, que fornece boas aproximações para os resultados de simulações DEM garantindo que a simulação fosse executada em tempo viável.

Os parâmetros do modelo de contato, coeficientes de atrito estático e de rolamento, bem como o coeficiente de restituição foram definidos para as iterações partícula-partícula presente nas simulações DEM. Os parâmetros que regem o contato entre duas partículas de materiais diferentes são definidos pela média aritmética entre os coeficientes desses dois materiais em relação à interação com a superfície de borracha. Essa hipótese foi utilizada com sucesso por Lima (2016) e por Carvalho e Silva (2018). Dessa forma verificou-se os coeficientes das partículas de coque externo, coque interno, *small coque*, pelota, sínter A, sínter B e minério granulado.

4.3 SIMULAÇÕES COM DEM

Dividiu-se a execução das simulações em DEM em duas etapas, a primeira refere-se à construção do ambiente 3D de simulação, onde foi utilizado Autodesk Autocad® para a construção da geometria. Na segunda etapa, foram definidas as condições de

simulação de modo a representar fielmente a operação dos altos-fornos em funcionamento no Rio de Janeiro.

4.3.1 Construção da geometria

A construção da geometria foi baseada no projeto de dois altos-fornos idênticos em operação no Rio de Janeiro, onde utilizou-se o software Autocad® 2019 (Autodesk, 2019). A construção baseada nos desenhos 2D e desenvolvido em escala de 1:1. Cada parte foi construída de forma isolada e exportada com arquivo tipo “.STEP” que posteriormente foram importados para o EDEM® e montadas em ambiente virtual. Para preservação dos dados industriais as dimensões dos equipamentos abaixo não foram representadas.

4.3.1.1 Construção do distribuidor rocker

Pode-se observar na Figura 4.5 o distribuidor *rocker*, equipamento instalado na parte superior dos *hoppers* que é responsável por direcionar o material que chega pela correia transportadora instalada no topo do sistema para encher seu respectivo *hopper*. O distribuidor *rocker* conta com acionamento hidráulico permitindo uma inclinação de 45° para a realização do direcionamento das partículas.

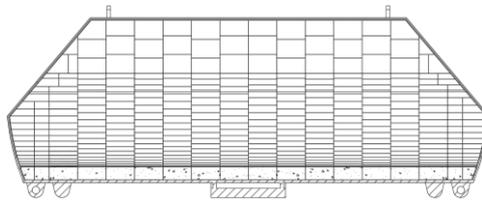


Figura 4.5 - Distribuidor rocker

4.3.1.2 Construção dos hoppers do topo

Na Figura 4.6 observa-se os *hoppers* gêmeos do topo do alto-forno. Após passar pelo distribuidor *rocker*, o material é direcionado para o *hopper* onde fica armazenado até ser descarregado no alto-forno. O *hopper* opera em batelada, e enquanto um realiza a

descarga de coque ou carga metálica no topo do alto-forno, o segundo recebe o novo material para ser descarregado, ou seja, não descarregam ao mesmo tempo.

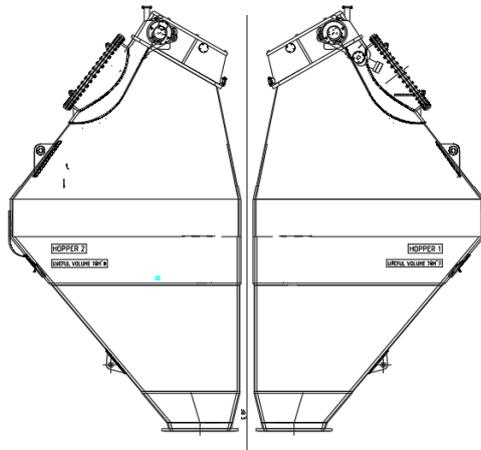


Figura 4.6 - *Hoppers* gêmeos do topo do alto-forno.

4.3.1.3 Construção da válvula controladora de fluxo

Observa-se na Figura 4.7 a válvula controladora de fluxo (LMG – *Lower Material Gate*), a LMG é um equipamento que fica instalado abaixo dos *hoppers* do topo e tem a função de controlar o fluxo granular que escoam pelo *hopper*, para tal, conta com um sistema de acionamento hidráulico que movimenta o disco inferior variando a abertura e a vazão de material. Durante a descarga a posição de controle fica fixa e caso haja desvio no fluxo granular a posição é corrigida para a próxima descarga.

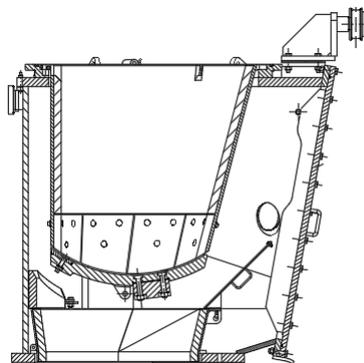


Figura 4.7 - LMG do topo do alto-forno instalada na parte inferior do *hopper*.

4.3.1.4 Construção da bacia de desgaste

Na Figura 4.8 pode-se observar a bacia de desgaste, equipamento conectado abaixo das válvulas controladoras de fluxo e abaixo da válvula selo inferior. Como na descarga do material a válvula selo inferior fica aberta e não tem contato com as partículas, essa foi representada na posição aberta pela adição apenas de sua estrutura, onde preservou-se as posições e alturas de cada válvula instalada no topo.

Abaixo do selo inferior, a bacia de desgaste faz o direcionamento das partículas descarregada do *hopper* para o funil de descarga que será direcionado para o *feeder spout*.

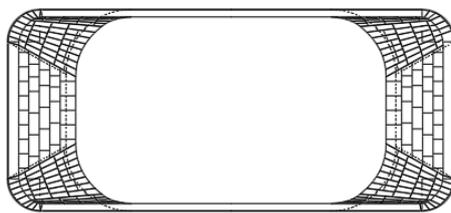


Figura 4.8 - Bacia de desgaste.

4.3.1.1 Funil de direcionamento e feeder spout.

Observa-se na Figura 4.9 a conexão do funil de desgaste na bacia de desgaste e direcionamento para o *feeder spout*. Esse sistema é responsável por direcionar as partículas descarregadas do *hopper* para a calha distribuidora. Na Figura 4.10 observa-se o *feeder spout*, equipamento responsável por direcionar as partículas da bacia para a calha distribuidora.

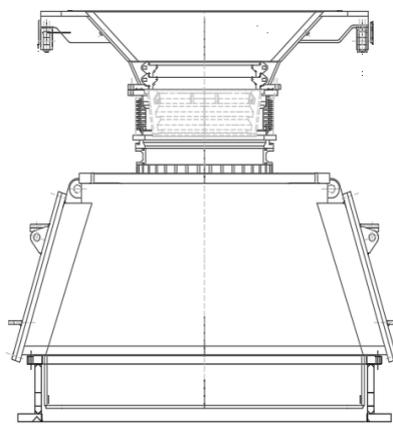


Figura 4.9 - Funil de desgaste e conexão com o *feeder spout*.

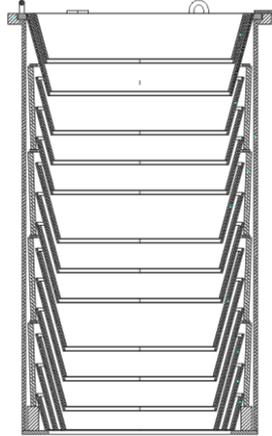


Figura 4.10 - Vista em corte do *feeder spout*.

4.3.1.2 Construção da calha de distribuição

Ao passar pelo *feeder spout* o material é direcionado para a calha distribuidora rotativa onde, através de um algoritmo de distribuição que a movimenta, faz com que as partículas que deixam o *hopper* encontrem sua adequada posição no leito do alto-forno. A calha tem rotação fixa de 8 RPM e capacidade de inclinação de distribuição que vai de 0° até 45° . Ângulos menores que 11° podem resultar no choque das partículas descarregadas contra o travessão localizado na ponta da calha rotativa.

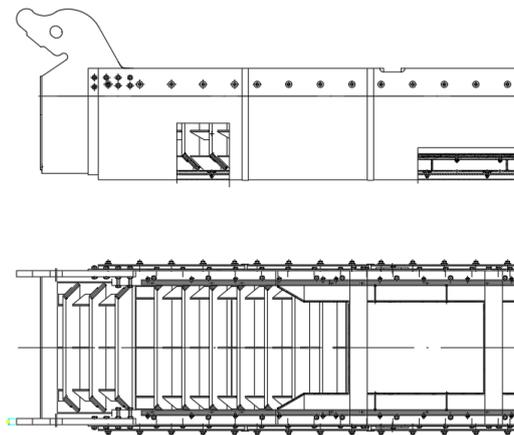


Figura 4.11 - Vistas lateral e superior da calha rotativa do sistema BLT.

4.3.2 Definição dos estudos de caso

A simulação do processo de carregamento do alto-forno partindo do enchimento do hopper foi segmentada em três partes visando melhorar a eficiência computacional e de pós-processamento: o carregamento dos materiais no *hopper*, a descarga do material no topo do alto-forno e a análise combinada pela descarga da carga metálica sobre um leito de coque.

Os parâmetros utilizados nas simulações estão reportados da Tabela 4.6 à Tabela 4.11, os parâmetros foram validados com os experimentos realizados na seção 5.1.3.

Tabela 4.6 - Propriedades dos materiais utilizados nas simulações

Partícula	Código da Balança	Massa específica (kg/m ³)	Razão de Poisson	Módulo de cisalhamento (Pa)
Coque Interno	SBC01	1180	0,25	1,00E+08
Coque Externo	SBC02	1180	0,25	1,00E+08
<i>Small</i> coque	NUT	1180	0,25	1,00E+08
Pelota	SBP01	3948	0,25	1,00E+08
Minério Granulado	SBP02	3800	0,25	1,00E+08
Sínter 1	SBS01	4037	0,25	1,00E+08
Sínter 2	SBS02	4037	0,25	1,00E+08
Geometria (Parede)	-	-	0,25	1,00E+08

Tabela 4.7 - Parâmetros do modelo de contato para os coques nas balanças SBC01 e SBC02

Coefficiente	Coque SBC01	Coque SBC02	Parede
Restituição (-)	0,4	0,4	0,4
Atrito estático (-)	0,3	0,3	0,4
Atrito de rolamento	0,2	0,2	0,1

Tabela 4.8 - Parâmetros do modelo de contato para o *Small* coque na balança NUT

Coefficiente (-)	<i>Small</i> coque NUT	Pelota SBP01	Sínter A SBS01	Sínter B SBS02	Granulado SBP02	Parede
Restituição	0,40	0,44	0,35	0,35	0,45	0,40
Atrito estático	0,30	0,40	0,26	0,26	0,32	0,40
Atrito de rolamento	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,10

Tabela 4.9 - Parâmetros do modelo de contato para as pelotas na balança SBP01

Coeficiente (-)	<i>Small</i> coque NUT	Pelota SBP01	Sínter A SBS01	Sínter B SBS02	Granulado SBP02	Parede
Restituição	0,44	0,48	0,43	0,43	0,35	0,39
Atrito estático	0,39	0,49	0,35	0,35	0,39	0,50
Atrito de rolamento	0,21	0,21	0,17	0,17	0,36	0,25

Tabela 4.10 - Parâmetros do modelo de contato para o Sinter na balança SBS01 e SBS02

Coeficiente (-)	<i>Small</i> coque NUT	Pelota SBP01	Sínter A SBS01	Sínter B SBS02	Granulado SBP02	Parede
Restituição	0,35	0,43	0,30	0,30	0,43	0,30
Atrito estático	0,26	0,35	0,22	0,22	0,35	0,54
Atrito de rolamento	0,21	0,17	0,21	0,21	0,17	0,25

Tabela 4.11 - Parâmetros do modelo de contato para o minério granulado na balança SBP02

Coeficiente (-)	<i>Small</i> coque NUT	Pelota SBP01	Sínter A SBS01	Sínter B SBS02	Granulado SBP02	Parede
Restituição	0,45	0,35	0,43	0,43	0,5	0,35
Atrito estático	0,32	0,39	0,35	0,35	0,35	0,39
Atrito de rolamento	0,2	0,36	0,17	0,17	0,2	0,36

4.3.3 Carregamento dos materiais no hopper

Um dos objetivos da simulação computacional foi compreender o comportamento da mistura das matérias-primas e segregação desses materiais durante a distribuição de carga no topo do alto-forno. Para isso, simulou-se primeiramente o carregamento dos materiais em um dos *hoppers* do sistema BLT. Essa simulação tem início da com a descarga dos materiais das balanças dos silos de estocagem (*Stock House*) para a correia transportadora que leva a carga de matérias-primas para o topo do alto-forno.

Na usina, o carregamento do *hopper* no topo se dá por 7 balanças, sendo 6 balanças estáticas com precisão de 0,5%, e 1 balança dinâmica com precisão de 1%. Duas balanças estáticas alimentam coques de dois tipos, externo e interno. Outras duas balanças estáticas alimentam sínter, que embora sejam essencialmente o mesmo material, neste trabalho serão adotadas as denominações de sínter A e B indicando sua origem em função das

diferentes balanças. Por fim, tem-se ainda uma balança para pelotas de minério de ferro e outra para minério granulado. A balança dinâmica é usada no carregamento de *small* coque e a nomenclatura dos materiais e seus respectivos códigos podem ser vistos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Nomenclatura das matérias-primas utilizadas nas simulações do carregamento do alto-forno e balanças de descarga da casa de estocagem (Stock House)

Definição de nomenclatura			
Material	Código	Balança	Precisão
Coque externo	SBC01	Estática	0,5%
Coque interno	SBC02	Estática	0,5%
<i>Small</i> coque	NUT	Dinâmica	1,0%
Pelotas	SBP01	Estática	0,5%
Sínter A	SBS01	Estática	0,5%
Sínter B	SBS02	Estática	0,5%
Minério Granulado	SBP02	Estática	0,5%

Na realização das simulações, as partículas foram inseridas a partir de uma geometria semicircular posicionada perpendicularmente à correia transportadora. Essa geometria é denominada de fábrica de pode ser vista na Figura 4.12. As partículas foram posicionadas na área disponível na superfície desta geometria. A fim de acelerar o processo de criação de partículas, as mesmas são inseridas na simulação já com velocidade cujos componentes nas direções x, y e z para este caso são -1,91 m/s, 0 m/s e 0,59 m/s, resultando em 2 metros por segundo no sentido de movimentação da correia. Isso permite que as partículas apareçam na simulação com velocidade compatível com aquela impressa pela correia transportadora, o que resulta um perfil adequado no fluxo de partículas sobre a mesma. A correia, por sua vez, teve a cinemática de plano configurada em 2 metros por segundo conforme apresentado pela seta azul na Figura 4.12.

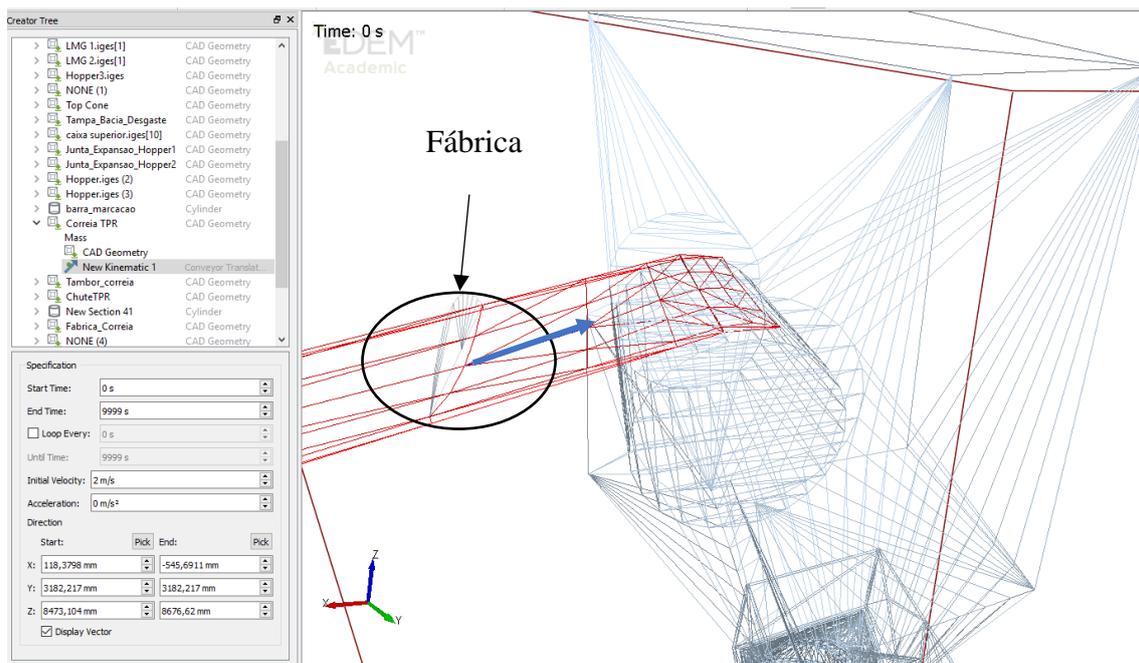


Figura 4.12 - Tela do software EDEM mostrando o detalhe da correia transportadora e o vetor (em azul) que indica o movimento do plano de movimentação da mesma. No detalhe a geometria da fábrica de partículas circulado em preto

Para otimizar a avaliação dos cenários de carregamento, foram definidas 3 estratégias de carregamento do *hopper* do topo. As estratégias de simulação foram nomeadas como C1, M1 e M2 e equivalem respectivamente ao carregamento do coque, primeiro modelo de carga metálica e segundo modelo de carga metálica, como descritos abaixo:

C1: O modelo de carregamento do coque, consiste no carregamento de uma batelada de coque, contendo 30% de coque externo e 70% de coque interno. Nos primeiros 80 segundos de enchimento do *hopper*, o carregamento é composto integralmente de coque interno. Transcorridos 80 segundos, o carregamento é realizado com uma mistura de coque interno e externo na proporção de 50% cada. Mais detalhes desse carregamento são apresentados na Tabela 4.13

M1: Nesta estratégia de carregamento de carga metálica, o *hopper* é carregado com uma mistura composta por 15% de minério granulado, 55% de sínter, 30% de pelotas e 16% de small coque (equivalente à razão de 56 kg de *small coque* para cada tonelada de ferro gusa produzida no alto-forno). Na estratégia M1, o carregamento do *hopper* é iniciado com uma mistura de *small coque*, sínter A e pelotas. Após 120 segundos, tem

início o carregamento de minério granulado e do sínter B. Mais detalhes desse carregamento são apresentados na Tabela 4.13

M2: Nesta estratégia o carregamento de carga metálica, o *hopper* é carregado com uma mistura composta por 15% de minério granulado, 55% de sínter, 30% de pelotas e 16% de *small* coque (equivalente à razão de 56 kg de *small* coque para cada tonelada de ferro gusa produzida no alto-forno). Na estratégia M2, o carregamento do *hopper* é iniciado com uma mistura de minério granulado, sínter A e pelotas. Após 50 segundos, tem início o carregamento de sínter B e com 100 segundos de descarga tem o início a alimentação de *small* coque. Mais detalhes desse carregamento são apresentados na Tabela 4.13

Nas estratégias de carregamento M1 e M2 o distanciamento entre o minério e o *small* coque foi baseado nos limites de projeto do sistema de carregamento que permitirá avaliar o modelo mais adequado para a indústria. No modelo de carregamento desejado industrialmente, é objetivado que o *small* coque seja descarregado próximo à parede do alto-forno e o minério granulado seja descarregado próximo ao centro do reator e a análise dos dois modelos permitirá um melhor entendimento da descarga, especialmente em caso de segregação dentro do *hopper*.

A Tabela 4.13 apresenta, para cada uma das estratégias de enchimento do *hopper* proposta no trabalho, as massas totais de cada matéria-prima, suas respectivas taxas de alimentação e o instante de tempo no qual se inicia a descarga na correia, tal estratégia baseia-se nos limites dos equipamentos instalados.

Adicionalmente, face à diferentes granulometrias apresentadas pelos materiais considerados no carregamento do alto-forno, fez-se necessário adequar as distribuições granulométricas desses materiais para sua representação virtual nas simulações em DEM. Desta forma, considerou-se, para cada material, uma distribuição de partículas esféricas, contida em 4 ou 5 classes de tamanhos definidas em função de seu diâmetro médio.

Tabela 4.13 - Estratégia de enchimento dos *hoppers*

Estratégia de enchimento do <i>hopper</i>	Material	Código da balança	Massa total (kg)	Taxa de alimentação (kg/s)	Início da alimentação (s)
C1	Coque externo	SBC01	5242	53,5	80
	Coque interno	SBC02	12230	58,3	0
M1	<i>Small</i> coque	NUT	3328	13,9	0
	Pelotas	SBP01	28618	115	0
	Sínter A	SBS01	24463	111,1	0
	Sínter B	SBS02	24463	111,1	50
	Minério	SBP02	13847	115,0	120
M2	<i>Small</i> coque	NUT	3328	13,9	100
	Pelotas	SBP01	28618	115	0
	Sínter A	SBS01	24463	111,1	50
	Sínter B	SBS02	24463	111,1	100
	Minério	SBP02	13847	115,0	0

Para as simulações realizadas considerando somente partículas de coque, utilizou-se as partículas baseadas em sua granulometria real, ou seja, em escala 1:1. Nas simulações dos casos considerando a carga metálica, a granulometria foi representada por partículas com diâmetros maiores do que aquelas encontradas no material real. Nesse caso, o fator de escalonamento do diâmetro das partículas usadas nas simulações DEM em relação às partículas reais foi de 1,5 vezes. Adicionalmente, para evitar a presença de partículas muito pequenas na simulação, o diâmetro mínimo foi truncado em 10 mm. Isso fez-se necessário devido ao grande número de partículas presentes em uma única batelada de descarga do *hopper*, cujo número estimado se aproxima de 10 milhões de partículas, dada a presença de partículas de pequeno tamanho de pelotas e sínter. Esse grande número de partículas inviabilizaria a realização das simulações DEM desejadas. A estratégia de uso de partículas escalonadas foi adotado com sucesso previamente em outros trabalhos, como em Lima (2016). Com o aumento da escala das partículas, as simulações foram realizadas com um número reduzido de partículas, ou seja, próximo a 3 milhões de elementos individuais nas simulações.

As distribuições granulométricas como utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Distribuições granulométricas dos materiais usados nas simulações DEM

Nome EDEM	<i>Coke</i> SBC01	<i>Coke</i> SBC02	NUT	Sínter A SBS01	Sínter SBS02	Minério SBP02	Pelota SBP01
Material	Coque Externo	Coque Interno	<i>Small coke</i>	Sínter	Sínter	Minério	Pelotas
Tamanho (mm)	% na classe	% na classe	% na classe	% na classe	% na classe	% na classe	% na classe
53,25	-	-	-	0,40	0,40	-	-
51,65	31,01	7,51	-	-	-	-	-
48,69			-	-	-	-	-
42,09	-	-	-	1,73	1,73	-	-
40,83	40,48	15,08	-	-	-	-	-
37,20	20,27	41,38	-	-	-	-	-
33,54	-	-	-	4,37	4,37	25,00	-
31,83	-	-	-	-	-	-	1,68
28,07	-	-	1,07	-	-	-	-
25,98	-	-	-	13,50	13,50	10,00	28,32
24,35	6,18	27,41	-	-	-	-	
22,19	-	-	33,93	-	-	-	70,00
19,98	-	-	-	-	-	-	-
18,60	2,06	8,62	-	-	-	-	-
18,38	-	-	-	24,00	24,00	15,00	-
16,77	-	-	25,71	-	-	-	-
14,24	-	-	11,29	-	-	-	-
12,99	-	-	-	56,00	56,00	50,00	-
12,74	-	-	12,00	-	-	-	-
11,22	-	-	16,00	-	-	-	-
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

4.3.4 Descarga dos materiais do *hopper* no topo do alto-forno

Para a simulação da descarga do *hopper* foram considerados, no plano de simulações, três algoritmos de movimentação da calha, sendo dois deles referentes ao carregamento de coque e um terceiro para o carregamento metálico. Posteriormente, um quarto algoritmo de movimentação foi acrescentado ao estudo e será descrito adiante.

Esses algoritmos foram baseados na estratégia utilizada no carregamento dos altos-fornos em operação na cidade do Rio de Janeiro e baseado nesses dados foi definido a movimentação da calha rotativa utilizando no software EDEM® (DEM Solutions, 2018). Para a preservação dos dados industriais os ângulos reais foram substituídos pelo subscrito da posição de descarga.

No carregamento de coque, foi inicialmente prevista a avaliação da descarga quando operada segundo o algoritmo denominado L2 CCI, ou seja, o carregamento inicia-se na posição central. Nesta estratégia, a calha rotaciona inicialmente no ângulo mais central com relação ao eixo vertical do alto-forno, promovendo o carregamento das partículas na região central do topo do alto-forno e depois disso se desloca para a parede. Os parâmetros relacionados à implementação desse algoritmo de movimentação da calha rotativa (movimentação A) são mostrados na Tabela 4.15

Posteriormente, ao analisar os resultados do descarregamento do coque sob o algoritmo L2 CCI constatou-se que havia margem para melhorias, como por exemplo o um ajuste no ponto mais central e um maior faixa de posições para a distribuição no topo. Adicionalmente, foi definida uma nova posição na movimentação da calha na região periférica, denominada P10. Esta nova configuração deu origem à lógica de movimentação da calha rotativa L2 CCI P10 (ou modificado), chamada de movimentação B, cuja configuração é mostrada na Tabela 4.16

Para a terceira movimentação, considerou-se uma única lógica de movimentação da calha rotativa para as simulações com carga metálica dada pela configuração apresentada na Tabela 4.17 (movimentação C). Por último foi criada a lógica de movimentação onde a distribuição do coque central é realizada no final da descarga do coque, a configuração foi definida objetivando a comparação com as movimentações A e B, a lógica foi adicionada ao plano de estudos e denominada de movimentação D, sua programação também está descrita na Tabela 4.18.

Tabela 4.15 - Sequência de movimentação da calha L2 CCI (Movimentação A) implementada nas simulações DEM

Movimento	Início do deslocamento para a nova posição (s)	Início da descarga (s)	Velocidade de mudança de inclinação (°/s)	Número de voltas equivalente	Código da posição L2
Posição inicial	-	2,50		2,8	CCI
Mudança de ângulo 1	23,50	25,45	13	3	9
Mudança de ângulo 2	47,95	48,08	-13	3	8
Mudança de ângulo 3	70,60	70,71	-13	3	7
Mudança de ângulo 4	93,20	93,34	-13	2	6
Mudança de ângulo 5	108,35	108,5	-13	2	5

Tabela 4.16 - Sequência de movimentação da calha L2 CCI P10 (Movimentação B) implementada nas simulações DEM

Movimento	Início do deslocamento para a nova posição (s)	Início da descarga (s)	Velocidade de mudança de inclinação (°/s)	Número de voltas equivalente	Código da posição L2
Posição inicial	-	2,50		3,4	CCI
Mudança de ângulo 1	28,00	29,17	13	1	10
Mudança de ângulo 2	35,50	35,65	-13	2	9
Mudança de ângulo 3	50,50	50,65	-13	2	8
Mudança de ângulo 4	65,50	65,64	-13	2	7
Mudança de ângulo 5	80,50	80,62	-13	2	6
Mudança de ângulo 6	95,50	95,62	-13	2	5
Mudança de ângulo 8	118,00	118,11	-13	1	4

Tabela 4.17 - Sequência de movimentação da calha C implementada (carga metálica).

Movimento	Início do deslocamento para a nova posição (s)	Início da descarga (s)	Velocidade de mudança de inclinação (°/s)	Número de voltas equivalente	Código da posição L2
Posição inicial	-	2,5		3	8
Mudança de ângulo 1	25,00	25,12	-13	3	7
Mudança de ângulo 2	47,62	47,75	-13	3	6
Mudança de ângulo 3	70,25	70,40	-13	3	5
Mudança de ângulo 4	92,90	93,05	-13	3	4

Tabela 4.18 - Sequência de movimentação da calha D implementada (CCF L2)

Movimento	Início do deslocamento para a nova posição (s)	Início da descarga (s)	Velocidade de mudança de inclinação (°/s)	Número de voltas equivalente	Código da posição L2
Posição inicial	-	2,5		3	8
Mudança de ângulo 1	25	25,12	-13	3	7
Mudança de ângulo 2	47,62	47,74	-13	2	6
Mudança de ângulo 3	62,74	62,88	-13	2	5
Mudança de ângulo 4	77,88	78,02	-13	2	4
Mudança de ângulo 5	93,02	94,35	-13	3,5	CCF

4.3.4.1 Calibração da abertura da LMG no DEM e definição do leito base

A fim de reproduzir a taxa de descarga do *hopper* adotada na operação industrial e que é listada na Tabela 4.19, fez-se necessário ajustar a posição da válvula controladora de fluxo (LMG - *lower material gate*) para cada um dos casos de descargas da carga metálica e coque. No caso da descarga de coque, a taxa mássica de descarga é 141 kg/s, enquanto para a carga metálica, a taxa de descarga adotada foi 810 kg/s.

Tabela 4.19 - Taxa mássica de descarga utilizando na estratégia industrial

Estratégia de carregamento	Taxa mássica de descarga (kg/s)	Tempo de descarga (s)
C1	141	118,5
M1	810	112,5
M2	810	112,5

Durante o controle de vazão, a posição de abertura da válvula é mantida em posição fixa na estratégia industrial. Dessa forma, para determinar a posição de controle da LMG, foram realizadas simulações de descarga considerando diversas posições de abertura; essas simulações foram simplificadas com domínio de simulação reduzido de modo que não haja formação de leito no topo do alto-forno. Posteriormente, definiu-se, a partir dos resultados dessas simulações as posições ótimas para cada um dos casos. Na Figura 4.13 é possível ver as posições (fechada e aberta) da válvula LMG.

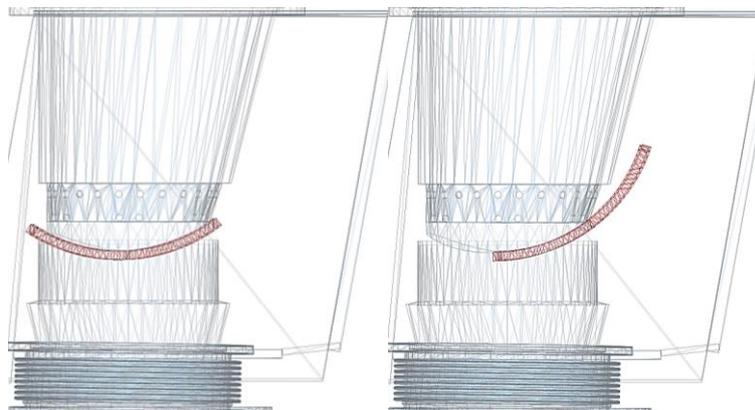


Figura 4.13 - Imagem da parte inferior do hopper implementada no DEM mostrando a válvula controladora de fluxo LMG (em vermelho), à esquerda tem-se a válvula na posição fechada e à direita a válvula na posição aberta.

No DEM, fez-se necessário definir o eixo de rotação para o reposicionamento da LMG. Neste caso, as coordenadas iniciais e finais do vetor que define o eixo rotação são apresentadas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Configurações do vetor que constitui o eixo de rotação da válvula LMG nas simulações DEM

Eixo	Posição inicial (m)	Posição final (m)
x	0	1,0
y	2,4	2,41
z	-7,2	-7,2

A definição do leito base foi realizada pela medição do perfil formado pelas partículas no topo do alto-forno. Para estimar o perfil do leito formado, utilizou-se uma trena a laser para medir a altura do leito do alto-forno durante uma parada programada. Essa medição foi utilizada para definir o leito de partículas utilizado nas simulações DEM.

4.3.4.2 Configuração da descarga sobreposta, carga metálica sobre o leito de coque.

Com o intuito de representar e avaliar a operação de carregamento do alto-forno, foram realizadas duas simulações de descarga do *hopper* combinada, onde após a descarga do coque foi realizada a descarga da carga metálica.

O primeiro caso combinado (D9) foi definido a partir do leito de partículas de coque que resultou da alimentação C1 e da descarga da movimentação A, ou L2 CCI. Com o leito criado, o *hopper* recebeu as partículas da carga metálica idêntica àquela gerada na simulação do enchimento M1 e algoritmo de movimentação C. Nesta simulação, além do posicionamento do leito, atribuiu-se à base sobre a qual foi disposto o leito de coque, uma velocidade de descida de 0,0022 m/s, que corresponde à condição normal de operação.

A simulação do segundo caso combinado (D11) foi realizada em condições em que o leito de coque resultou da alimentação C1 e da descarga da movimentação D. Tendo sido o leito criado, o *hopper* recebeu as partículas da carga metálica idêntica àquela gerada na simulação do enchimento M1 e algoritmo de movimentação C.

A Tabela 4.21 apresenta a lista de simulações realizadas, na qual cada caso simulado recebe um nome de prefixo E, no caso de simulações de enchimento do *hopper*, ou de prefixo D, no caso das simulações de carregamento do topo do alto-forno. A Tabela 4.21 também informa o tipo de carregamento de coque (C1), ou de carga metálica (M1 ou M2), e o tipo de algoritmo de descarga utilizado na calha rotativa, que pode ser do tipo de movimentação A, B, C ou D, conforme apresentado na seção 4.3.4. Para os casos combinados a coluna “Fonte do leito de partículas” indica sobre qual leito de material está sendo realizado a descarga simulada.

Tabela 4.21 - Sumário das simulações realizadas

Descrição	Tipo de material	Código	Fonte de partículas	Fonte do leito de partículas	Algoritmo da calha
Enchimento	Coque	Caso E1	C1	-	-
Enchimento	Carga metálica	Caso E2	M1	-	-
Enchimento	Carga metálica	Caso E3	M2	-	-
Descarga	Coque	Caso D4	C1	-	Movimentação A
Descarga	Coque	Caso D5	C1	-	Movimentação B
Descarga	Carga metálica	Caso D6	M1	-	Movimentação C
Descarga	Carga metálica	Caso D7	M2	-	Movimentação C
Descarga	Coque	Caso D8	C1	-	Movimentação D
Descarga	Carga metálica	Caso D9	M1	Caso D4	Movimentação C
Descarga	Carga metálica	Caso D11	M1	Caso D8	Movimentação C

Em virtude do grande número de partículas presentes nas simulações do carregamento do alto-forno foram adotadas estratégias para otimização das simulações. Para reduzir o tempo demandado para a descarga do coque, e posterior enchimento e descarga do *hopper* de carga metálica na análise combinada, foi utilizada uma técnica de simulação disponível no software EDEM[®]. Neste caso, um arranjo de partículas de uma simulação de descarga previamente realizada é importado para outra simulação utilizando a função *Bed Block*. Isso torna possível inserir o leito de partículas desejado no topo do

alto-forno e associá-lo a um *hopper* previamente simulado. A simulação de descarga do material presente no *hopper* sobre o leito de partículas no topo do alto-forno foi então iniciada a partir desse ponto. A sequência desse processo pode ser observada na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Utilização da função Bed Block, descarga de coque simulada (esquerda), descarga de carga metálica a ser simulada sobre o leito de coque (centro) e junção do leito descarregado do coque com a descarga de minério a realizar (direita).

4.3.4.3 Configuração das simulações

As simulações em DEM dos estudos de caso foram realizadas utilizando estação de trabalho equipada processador Intel Xeon CPU E-5 V4 @3.6 GHz, 64 GB de memória RAM DDR5 e GPU Nvidia GeForce 1080ti e utilização do software EDEM® 2017 fornecido pela DEM Solutions (DEM Solutions, 2017).

O método de integração adotado foi o método de Euler com passo simples. O tamanho do passo de tempo utilizado na integração foi equivalente a 30% do tempo de Rayleigh (T_R). Os dados parciais das simulações foram armazenados em intervalos de tempo de 0,1 segundo. Estas informações incluem as posições, orientações e velocidades das partículas e geometrias. A totalidade das informações oriundas das simulações foram armazenadas em intervalos de 1 segundo, ou seja, a cada 10 salvamentos parciais. O salvamento das informações por completo permite que a simulação seja interrompida e, por exemplo, seja utilizado como fonte para realização para uma nova simulação ou seja, retomada normalmente a partir do último ponto de salvamento completo.

4.4 PÓS-PROCESSAMENTO

A análise adequada das simulações DEM requer a preparação de diversas rotinas de pós-processamento. Para isto, foram preparadas no módulo EDEM Analyst, caixas de análise denominadas “*Geometry Bin*”. A primeira, em verde na Figura 4.15, representa o topo do alto-forno, atua como registro das partículas que o alcançam ao passar pela calha rotativa. A segunda caixa de análise, em azul na Figura 4.15, localiza-se imediatamente abaixo da calha rotativa, e tem o objetivo de registrar a identidade e componentes x,y e z do vetor velocidade de cada partícula que é projetada pela calha.

A configuração das caixas de análise é apresentada na Figura 4.16, onde deve-se definir as coordenadas do centro da caixa, bem como suas dimensões nos três eixos cartesianos. A caixa de seleção 1 em verde será responsável para a extração do leito de partículas formado durante a descarga, já a seleção 2 em azul, será responsável pela extração das informações dos materiais que deixam a calha rotativa em direção ao leito de partículas.

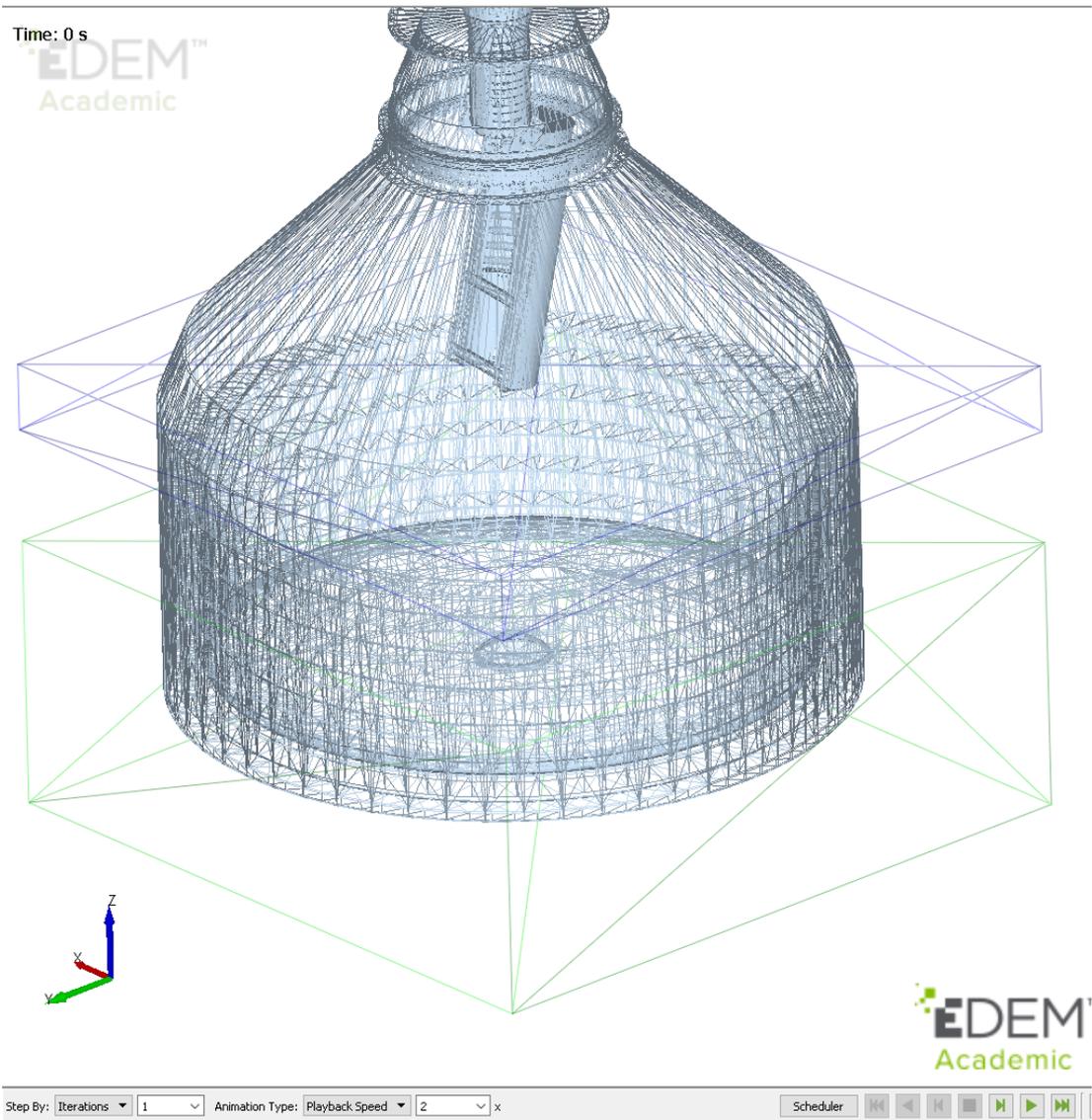


Figura 4.15 - Tela do EDEM Analyst que mostra as caixas de análise (geometry bin)

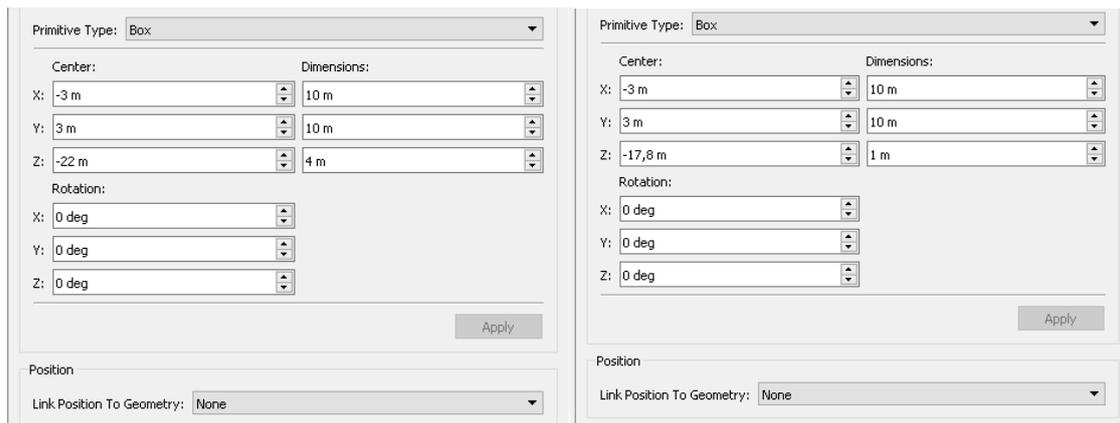


Figura 4.16 - Coordenadas das caixas de seleção: à esquerda tem-se a caixa de seleção 1, em verde na Figura 4.15 e à direita, tem-se a caixa de seleção 2, em azul na Figura 4.15.

Uma vez que as caixas de análise foram previamente configuradas, foi configurado o arquivo de extração de dados das simulações. Essa extração tem por objetivo obter informações relevantes ao fluxo granular como a posição, diâmetro, massa, velocidade e identificação de cada partícula. Posteriormente essas informações foram levadas a mais uma etapa de pós-processamento com rotinas escritas em Matlab[®] R2015 (Mathworks, 2015) que permitiram a análise quantitativa em cada instante salvo da simulação.

A estratégia na etapa de pós-processamento passa primeiro pela identificação das partículas, onde extrai-se o número de identificação de cada partícula no domínio de simulação, posteriormente esse valor é correlacionado as propriedades físicas como massa, diâmetro e tipo de material. Por fim, extrai-se as massas totais de cada tipo de partículas a cada instante de tempo em que a simulação foi salva.

Adicionalmente, são registradas as identificações e o vetores velocidade das partículas que deixam a calha rotativa. Dessa forma é possível projetar sua trajetória e posteriormente verificar sua posição final de descanso no topo do alto-forno em função do tipo de partícula, diâmetro e posição da calha.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO FENOMENOLÓGICO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO TOPO DO ALTO-FORNO.

Com base no modelo de distribuição de carga de Park *et al.* (2011), utilizou-se os resultados das simulações de carregamento do alto-forno realizadas em DEM para calibrar os parâmetros do modelo.

Das simulações DEM foram extraídas as velocidades de chegada e saída das partículas ao passarem pelo *feeder spout* e calha rotativa até atingirem o leito de partículas no alto-forno. A partir dos resultados em DEM corrigiu-se o fator K_f na equação 3.16, ajustando-se a velocidade V_{2v} , e o fator ϕ_{cor} da equação 3.17 de forma a ajustar a curva de trajetória definido pelas coordenadas (X,Y) à trajetória resultante da simulação DEM, resultando portanto, no mesmo ponto de impacto que o obtido no modelo virtual, como representado pelo esquema na Figura 4.17.

A partir da solução das equações 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 define-se a trajetória das partículas da saída do *hopper* no topo do alto-forno até o leito de partículas na garganta do alto-forno. Com as curvas definidas para cada ângulo de movimentação da calha é necessário definir o ângulo de empilhamento em cada região de descarga. Para tal, soluciona-se as equações 3.23 e 3.24.

Para a solução das equações de empilhamento, deve-se definir os seguintes parâmetros: A_{max} , D , F_S , d , X_x e C que são, o ângulo máximo de empilhamento, diâmetro médio das partículas, fator de forma, diâmetro da garganta do alto-forno, distância do centro até o ponto de impacto e constante de correção, respectivamente.

O diâmetro médio, fator de forma, diâmetro da garganta são previamente conhecidos após a definição das características das matérias-primas e do alto-forno, já a distância do centro ao ponto de empilhamento passou a ser conhecida com a solução das equações de trajetória. Os parâmetros A_{max} e C (Fator de correção), foram determinados a partir da análise das imagens do empilhamento com as simulações em DEM. Assim, determinou-se os parâmetros A_{max} e C , encontrando os ângulos ϑ_p , β_p equivalentes ao modelo em DEM a partir das equações 3.23 e 3.24. Na Figura 4.17 é mostrado um esquema da distribuição e os principais parâmetros do modelo fenomenológico.

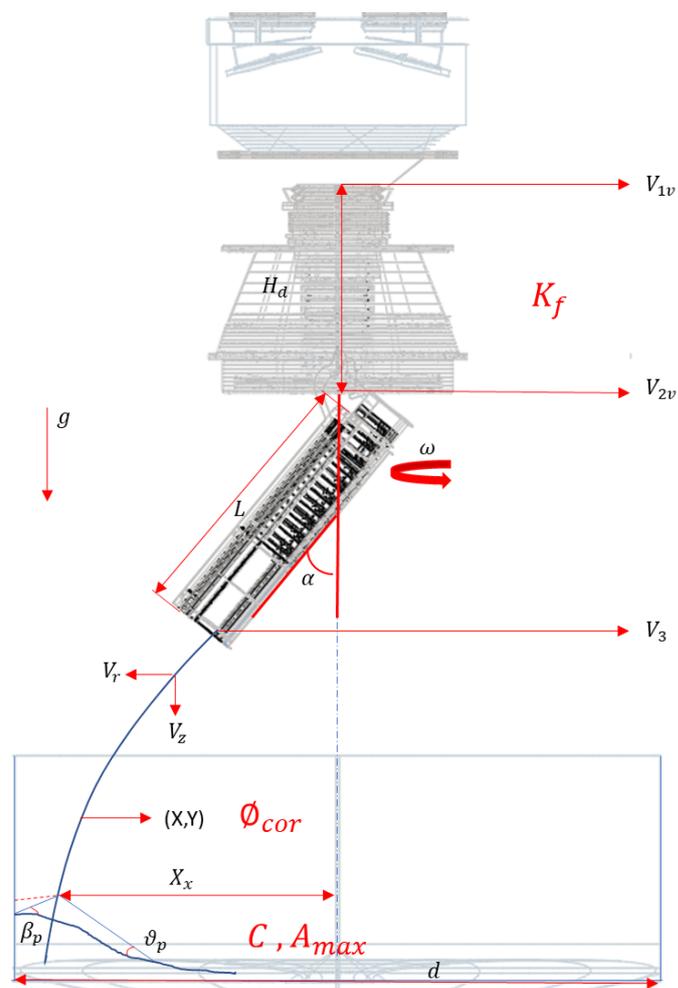


Figura 4.17 - Representação esquemática da curva de trajetória e seus respectivos pontos de impacto calculada pelo modelo de Park *et al.* (2011)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Análise Granulométrica

A granulometria das amostras de sinter tais como recebidas no LTM foi comparada à granulometria obtida das amostragens de rotina realizadas na usina. Os resultados são apresentados na Figura 5.1 e mostram que a análise realizada apresentou quase 100% das partículas passantes na peneira de 53 milímetros enquanto a fração passante em 9,5 mm foi, em média igual a 32,0 %, contra 24,1 % obtido na análise granulométrica realizada na usina. Observa-se que a análise granulométrica realizada na usina utiliza uma quantidade limitada de peneiras, mas de modo geral, pelo formato das curvas obtida pode-se dizer que as amostras são correspondentes.

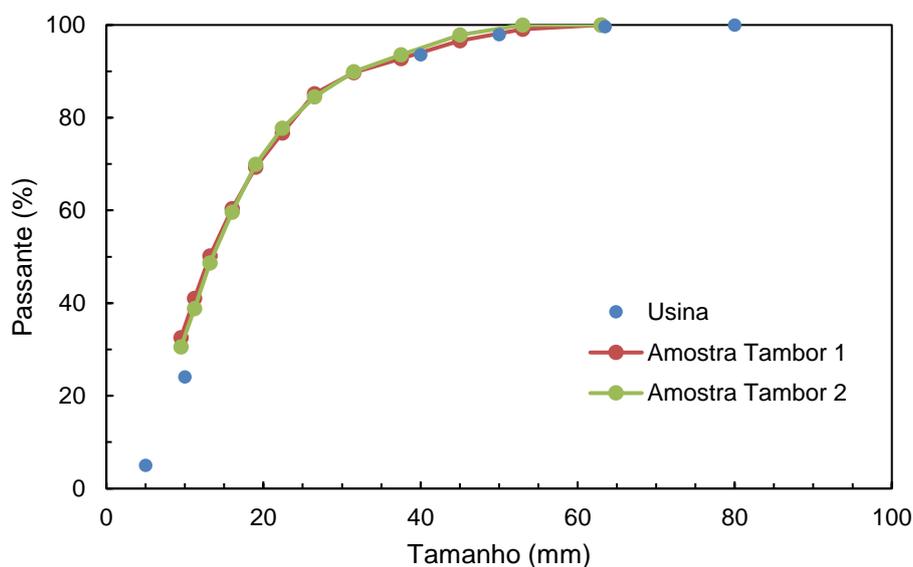


Figura 5.1 - Distribuição granulométrica da amostra de sinter, tal como recebida no LTM (tambores 1 e 2), comparada à granulometria considerada pela usina no carregamento do alto-forno.

O mesmo procedimento foi feito para o coque interno recebido no LTM, a granulometria apresentou-se similar àquela considerada pela usina no carregamento do alto-forno. O percentual de material abaixo de 20 mm foi igual a 1,7 %, contra 1,6 % reportado nas análises de rotina. Os resultados são apresentados na Figura 5.2.

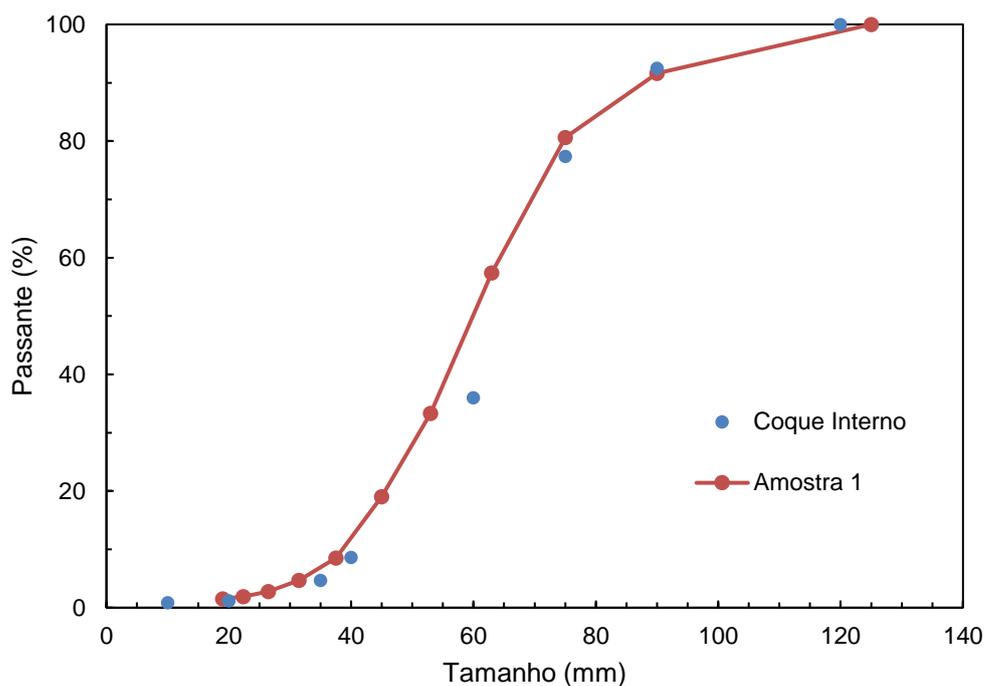


Figura 5.2 - Distribuição granulométrica da amostra de coque, tal como recebida no LTM, comparada à granulometria considerada na análise de rotina no carregamento do alto-forno.

5.1.2 Medida da massa específica

A medição de massa específica foi realizada conforme o procedimento descrito na seção 4.2.2 para sínter e coque interno. Os valores de massa específica para pelota (Barrios et al., 2013) e minério granulado foram extraídos do banco de dados do LTM. Os resultados de massa específica por tipo de material são apresentados Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Massa específica por balança da casa de escocagem.

Partícula	Balança	Massa específica (kg/m ³)
Coque Interno	SBC01	1180
Coque Externo	SBC02	1180
<i>Small coque</i>	NUT	1180
Pelota	SBP01	3948
Minério Granulado	SBP02	3800
Sínter A	SBS01	4037
Sínter B	SBS02	4037

5.1.3 Verificação da calibração dos parâmetros de contato para as matérias-primas

5.1.3.1 Ensaio sobre leito plano

No resultado do ensaio de ângulo de repouso sobre leito plano, a amostra de coque grosso apresentou ângulo de repouso igual a 35° como pode ser observado na Figura 5.3, valor muito próximo daquele obtido em uma caracterização anterior com o coque submetido ao mesmo procedimento de ensaio, que resultou em um ângulo de repouso médio igual a 35° , cujas imagens do experimento e da simulação computacional podem ser vistas na Figura 5.4.



Figura 5.3 - Teste de ângulo de repouso com coque grosso



Figura 5.4 - Resultado de ensaio de ângulo de repouso (esquerda) com amostra de coque caracterizada previamente no Laboratório de Tecnologia Mineral comparada à sua respectiva simulação DEM (direita) (Lima, 2016).

A amostra de *small* coque apresentou ângulo de repouso igual a 31°, cujo resultado pode ser visto na Figura 5.5, sendo este valor ligeiramente menor do que aquele obtido com a amostra de coque grosso.



Figura 5.5 - Teste de ângulo de repouso com *small* coque

5.1.3.2 Ensaio de ângulo de repouso sobre leito de partículas

Os resultados dos ensaios de ângulo de repouso sobre leito de partículas mostraram que os diferentes materiais granulados presentes no alto-forno interagem de maneira semelhante. O ensaio, descrito na seção 4.2.3.2, reproduziu em escala reduzida o empilhamento dos materiais sobre os leitos formados por diferentes materiais.

Os resultados dos ensaios físicos, bem como das simulações em DEM representativas de cada caso, usando os parâmetros definidos nas Tabela 4.6 a Tabela 4.11, são apresentadas na seção 4.3.2, para cada um dos materiais empilhados.

Caso 1 – Pilhas de sinter

Os resultados do empilhamento de partículas de sinter mostraram que a pilha formada apresenta maior ângulo de repouso (36°) quando as partículas são liberadas sobre o leito de partículas de coque, enquanto para os demais leitos, os ângulos resultantes foram de 33° e 32° para os ensaios com leitos de partículas do próprio sinter e de pelotas, respectivamente. As simulações DEM também apresentaram os efeitos dos diferentes

materiais, embora tenham resultado em ângulos ligeiramente menores (36° , 32° e 27°) para os ensaios com leitos de coque, sinter e pelota, respectivamente, como pode ser observado na Figura 5.6. Imagens adicionais evidenciando o espalhamento das partículas na pilha de sinter são apresentadas na Figura 5.7 e na Figura 5.8, nas quais pode-se observar que o alcance das partículas da pilha na simulação DEM foi semelhante ao comportamento observado experimentalmente.

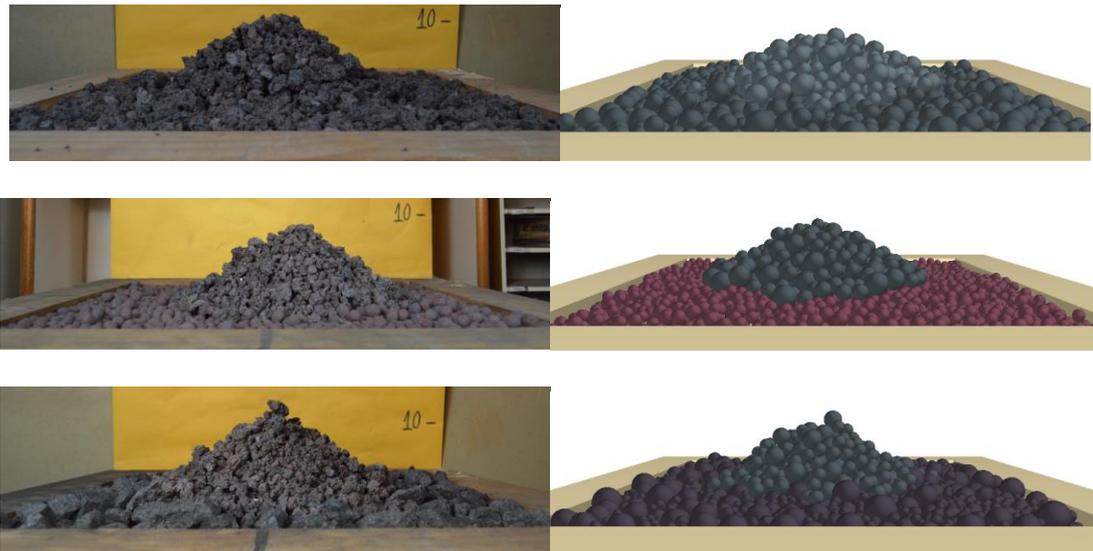


Figura 5.6 - Pilha de sinter sobre leito de partículas de sinter, pelotas e coque de cima para baixo respectivamente. Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita).

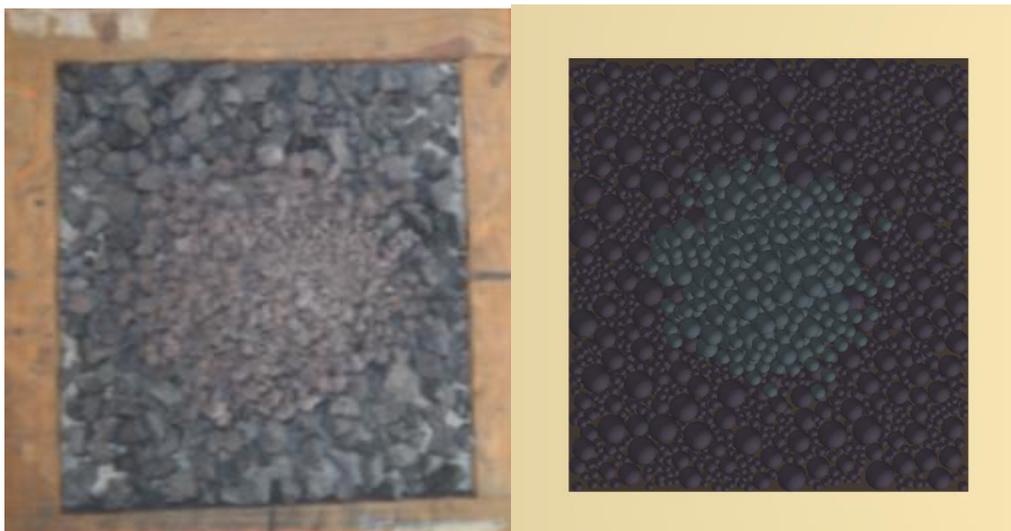


Figura 5.7 - Vista superior da pilha de sinter formada sobre leito de partículas de coque. Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita).



Figura 5.8 - Vista superior da pilha de sinter formada sobre leito de partículas de pelotas. Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita).

Caso 2 – Pilhas de coque

No caso das pilhas de coque, os ângulos obtidos experimentalmente foram de 32°, 32° e 37° para os leitos de sinter, pelotas e coque. Observou-se que dado a maior granulometria do coque, o leito formado por suas partículas apresentou maior capacidade em limitar o espalhamento da pilha, resultando no maior ângulo de repouso. Esse fato também foi observado na simulação DEM, cujos ângulos resultantes foram de 30°, 32° e 34° e podem ser observados na Figura 5.9. Adicionalmente, a Figura 5.10 e a Figura 5.11 apresentam as comparações dos ensaios realizados sobre leito de sinter e pelotas com suas respectivas simulações DEM.

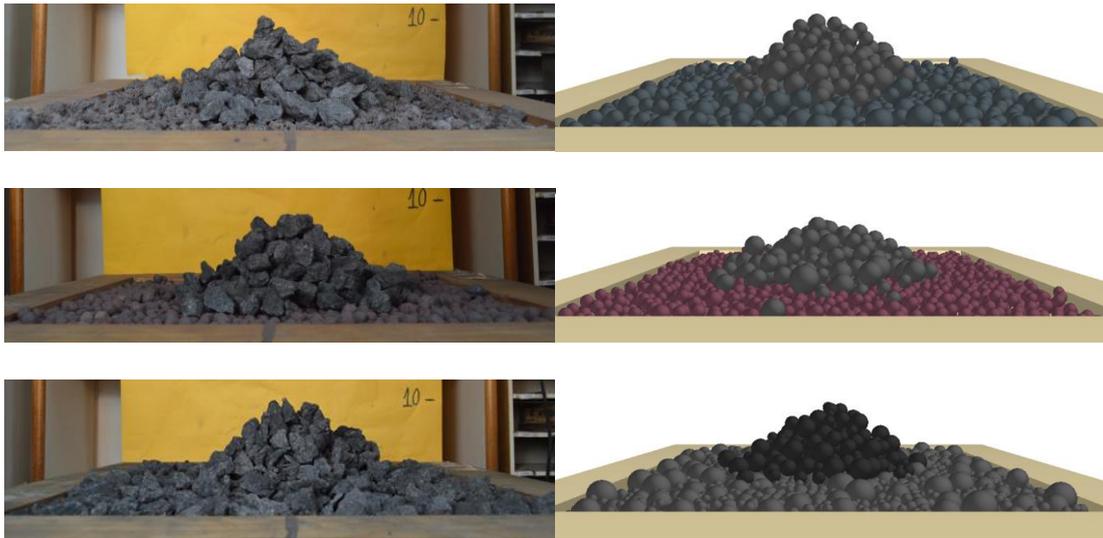


Figura 5.9 - Pilha de coque sobre leito de partículas de sinter, pelotas e coque (de cima para baixo). Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita).

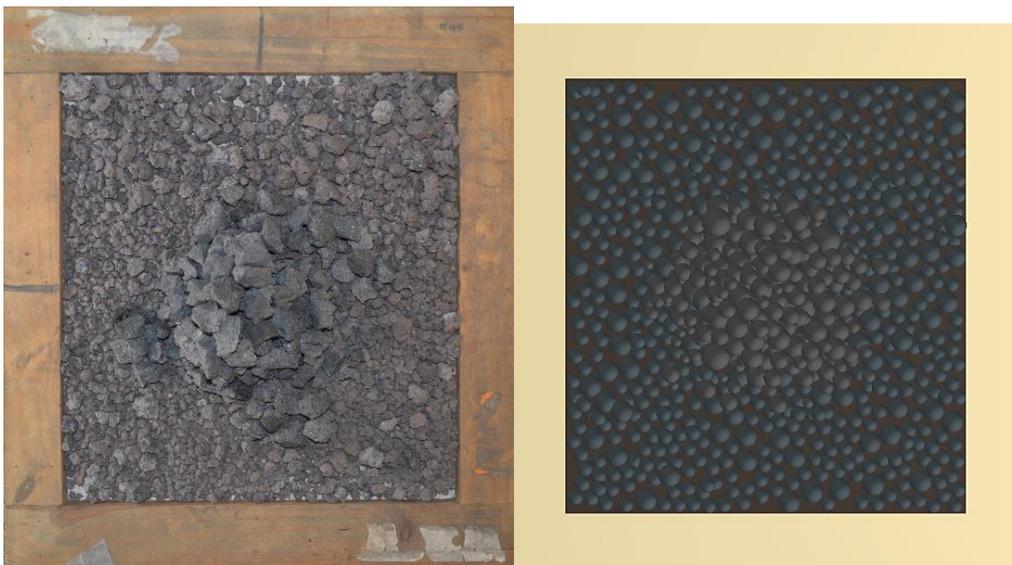


Figura 5.10 - Vista superior da pilha de coque formada sobre leito de partículas de sinter



Figura 5.11 - Vista superior da pilha de coque formada sobre leito de partículas de pelotas

Caso 3 – Pilhas de pelotas

No caso das pilhas formadas por pelotas, as simulações DEM mostraram pouco efeito do tipo de partículas nos leitos, cujos ângulos de repouso foram respectivamente 30° , 29° e 31° para os leitos de sinter, pelotas e coque (Figura 5.12). Observou-se que, as esferas que representam as pelotas foram capazes de penetrar no leito, principalmente de coque, resultando na formação de uma pilha mais compacta e sem a forma cônica tradicional, como observado nos resultados das simulações com leitos de sinter e pelotas. Esse efeito pode ser observado nas Figura 5.13 e Figura 5.14. Já os experimentos apresentaram formatos de pilhas semelhantes entre si, com ângulos de repouso em torno de 32° .

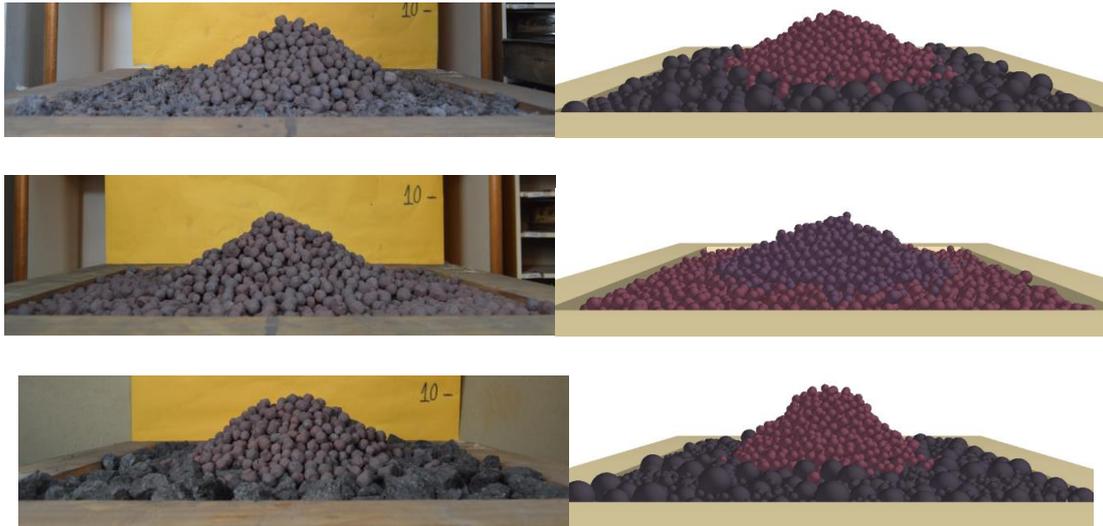


Figura 5.12 - Pilha de pelotas sobre leito de partículas de sinter, pelotas e coque de cima para baixo, respectivamente. Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita)



Figura 5.13 - Vista superior da pilha de pelotas formada sobre leito de partículas de sinter



Figura 5.14 - Vista superior da pilha de pelotas formada sobre leito de partículas de coque

Caso 4 – Pilha de minério granulado

Por fim, a título de comparação, são apresentados os resultados dos experimentos utilizando o minério de ferro do banco de amostras do LTM contra os leitos de partículas de sinter, pelotas e coque. No geral, como mostra a Figura 5.15, pode-se observar que as simulações DEM foram capazes de descrever bem os formatos das pilhas obtidas nos ensaios.



Figura 5.15 - Pilha de minério de ferro sobre leito de partículas de sinter, pelotas e coque de cima para baixo respectivamente. Experimento (à esquerda) e simulação DEM (à direita).

5.2 SIMULAÇÕES COM DEM

5.2.1 Implementação do modelo em três dimensões

A implementação do modelo do alto-forno em três dimensões para realização das simulações DEM foi dividido em partes, como pode ser visto da Figura 5.16 à Figura 5.19, que apresentam os principais elementos no topo-forno, como por exemplo a calha rotativa. Por fim, observa-se na Figura 5.20 a montagem dos equipamentos apresentados. O modelo foi importado para o software EDEM onde suas conexões e encaixes foram verificados de forma a validar a montagem sem a presença de aberturas entre as superfícies de contato.

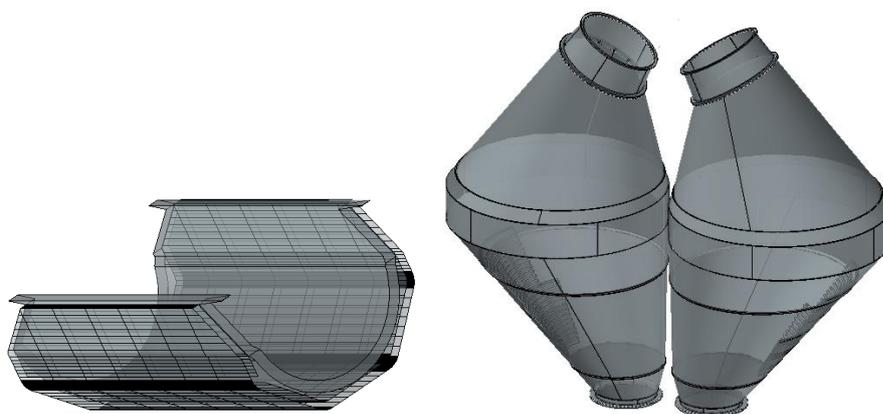


Figura 5.16 - Modelo 3D do distribuidor *rocker* (esquerda) e dos *hoppers* do topo (direita) do alto-forno.

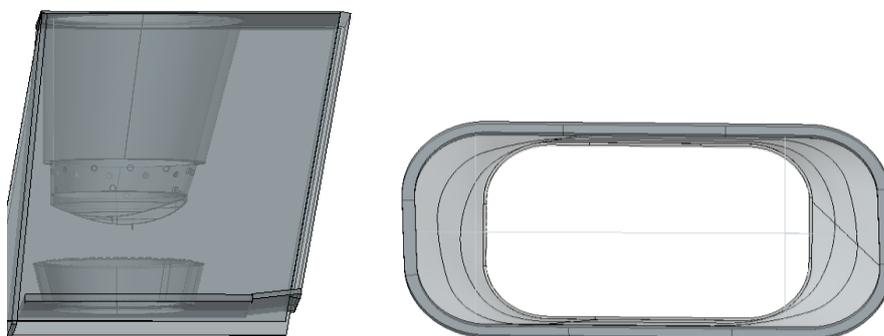


Figura 5.17 - Modelo 3D da válvula LMG (esquerda) e bacia de desgaste (direita) do alto-forno.

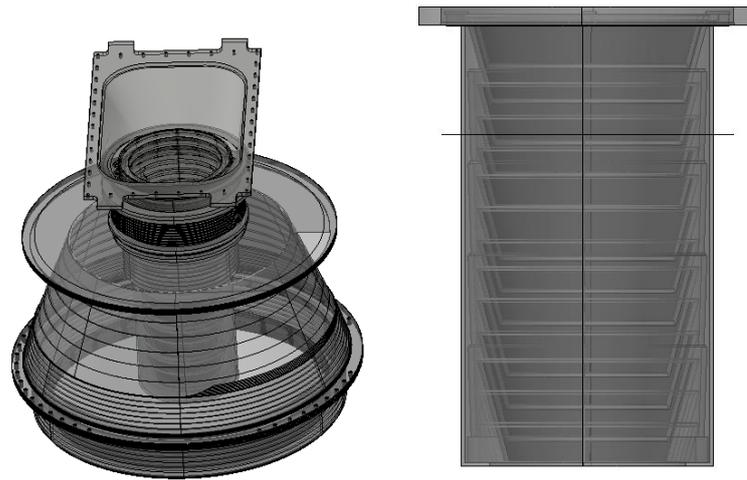


Figura 5.18 - Modelos 3D do funil de desgaste e conexão com o *feeder spout* do alto-forno (esquerda) e *feeder spout* do alto-forno (direita)

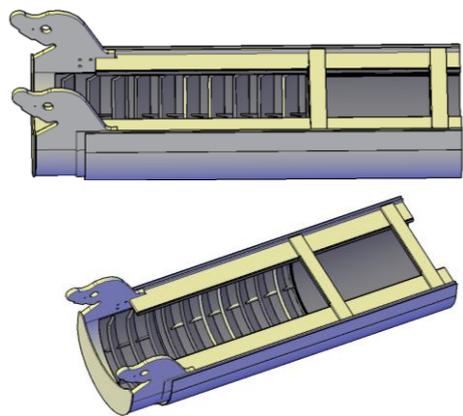


Figura 5.19 - Modelo 3D da calha rotativa do alto-forno.

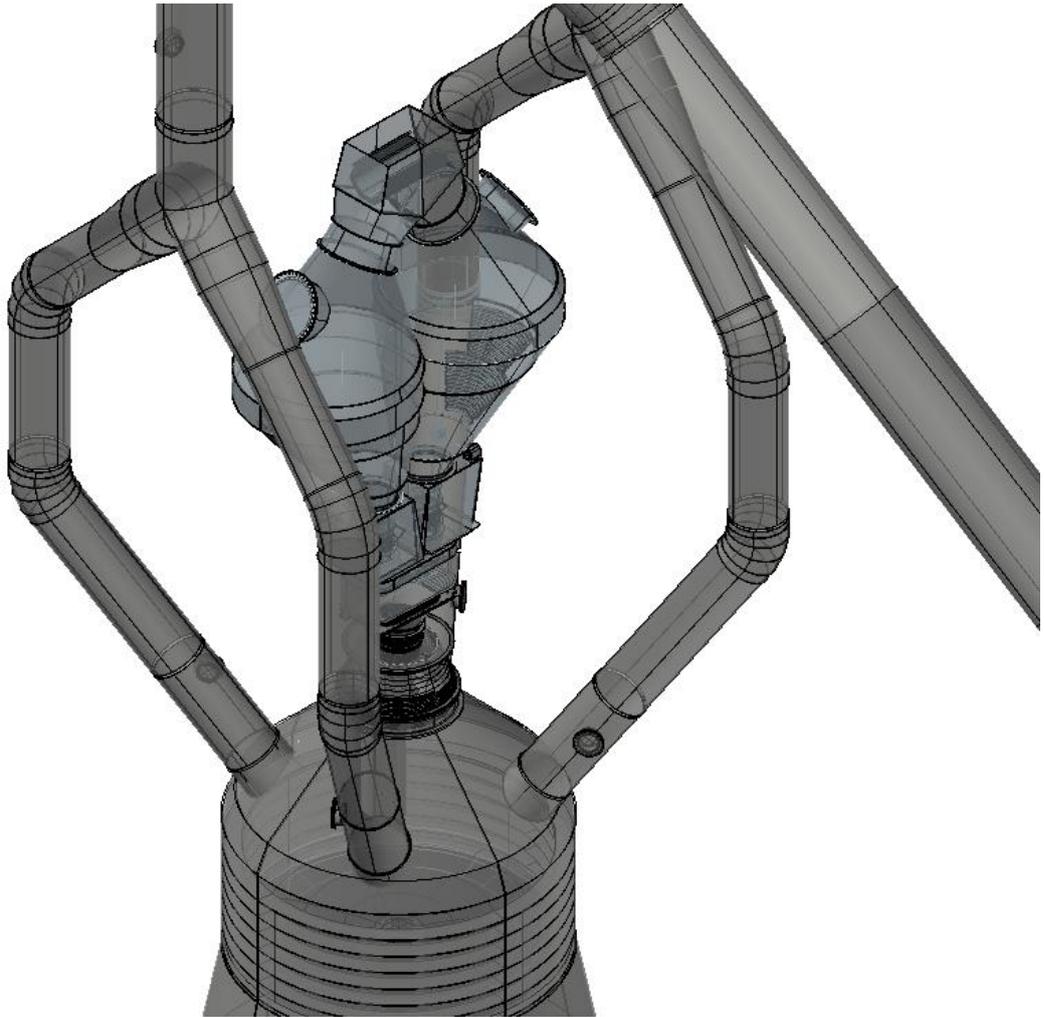


Figura 5.20 - Modelo 3D do alto-forno.

5.2.2 Carregamento dos materiais no *hopper*.

As simulações do enchimento do *hopper* (caso E1) que utilizando a estratégia de carregamento C1 mostraram, que o coque externo não ocupou a parte inferior do *hopper*. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.21, que mostra o resultado da simulação em dois quadros, um corte transversal do *hopper* e uma vista em perspectiva. Nas imagens as partículas amarelas representam o coque interno, enquanto as pretas, o coque externo.

É possível observar que na parte superior do *hopper* há uma camada com partículas de ambos os tipos de coques, e na parte inferior verifica-se que há apenas coque interno. Esse resultado ocorre devido a estratégia de carregamento C1, pois o início do carregamento do *hopper* é feito com coque interno e após 80s, é iniciado o coque externo correspondendo a 50% da vazão mássica. Nos últimos 30s de carregamento verificou-se

a existência apenas a coque interno e por esse motivo observa-se na Figura 5.21 uma pequena camada de coque interno na parte superior.

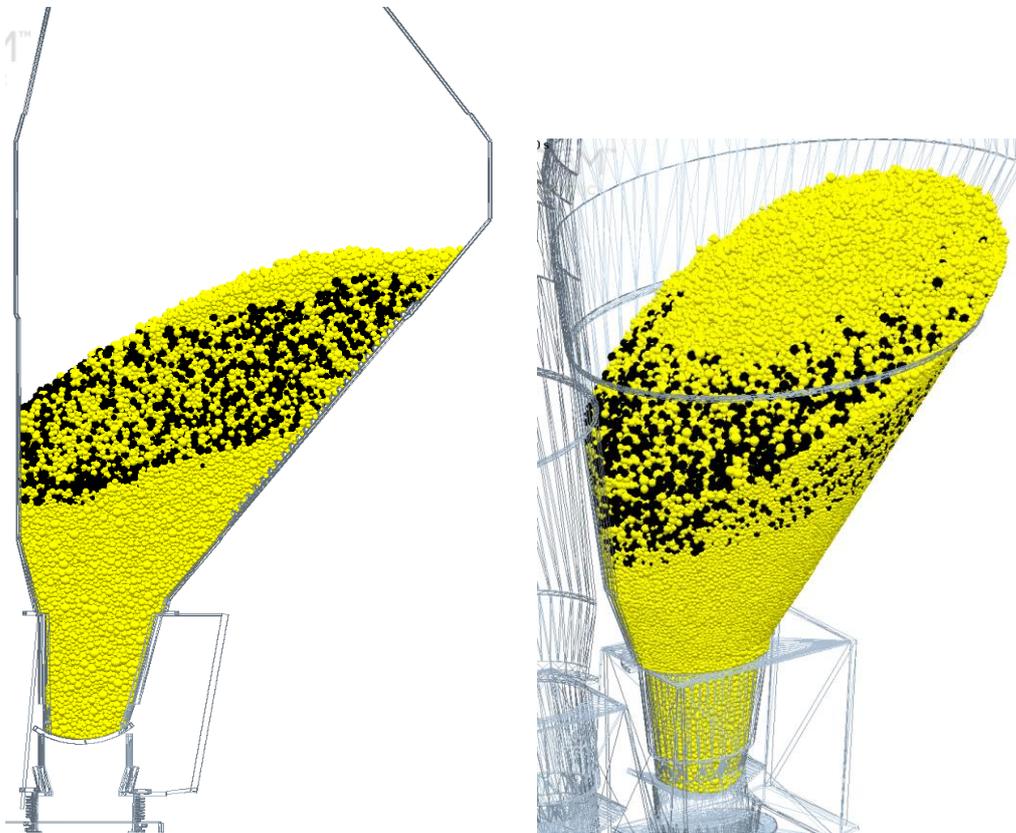


Figura 5.21 - *Hopper* completamente carregado com a carga de coque (caso E1). Nessa simulação, as partículas pretas representam o coque externo, enquanto as partículas amarelas representam o coque interno. Vista de corte transversal de 50 cm de espessura a partir do centro (esquerda) e vista em perspectiva, mostrando a carga completa (direita).

No caso das simulações de enchimento de *hopper* com carga metálica visto na Figura 5.22, duas estratégias de carregamento foram consideradas, denominadas casos E2 e E3, que são alimentadas pelas fontes de partículas M1 e M2, respectivamente. Os parâmetros correspondentes podem ser consultados na Tabela 4.13 e na Figura 5.23 pode-se observar o código de cores utilizado na análise das simulações.

A principal diferença entre casos E2 e E3 é o carregamento do *small coque* e minério granulado, provenientes das estratégias M1 e M2. Observa-se na estratégia M1 uma maior concentração de *small coque* na parte inferior do *hopper* acompanhado de pelota e sinter A, e na parte superior do *hopper* encontra-se o minério granulado. Na

estratégia M2 existe uma grande concentração de pelotas e minério granulado na parte inferior do *hopper* e na parte superior encontra-se o *small coque*. O resultado da simulação de ambas as estratégias pode ser visto na Figura 5.22.

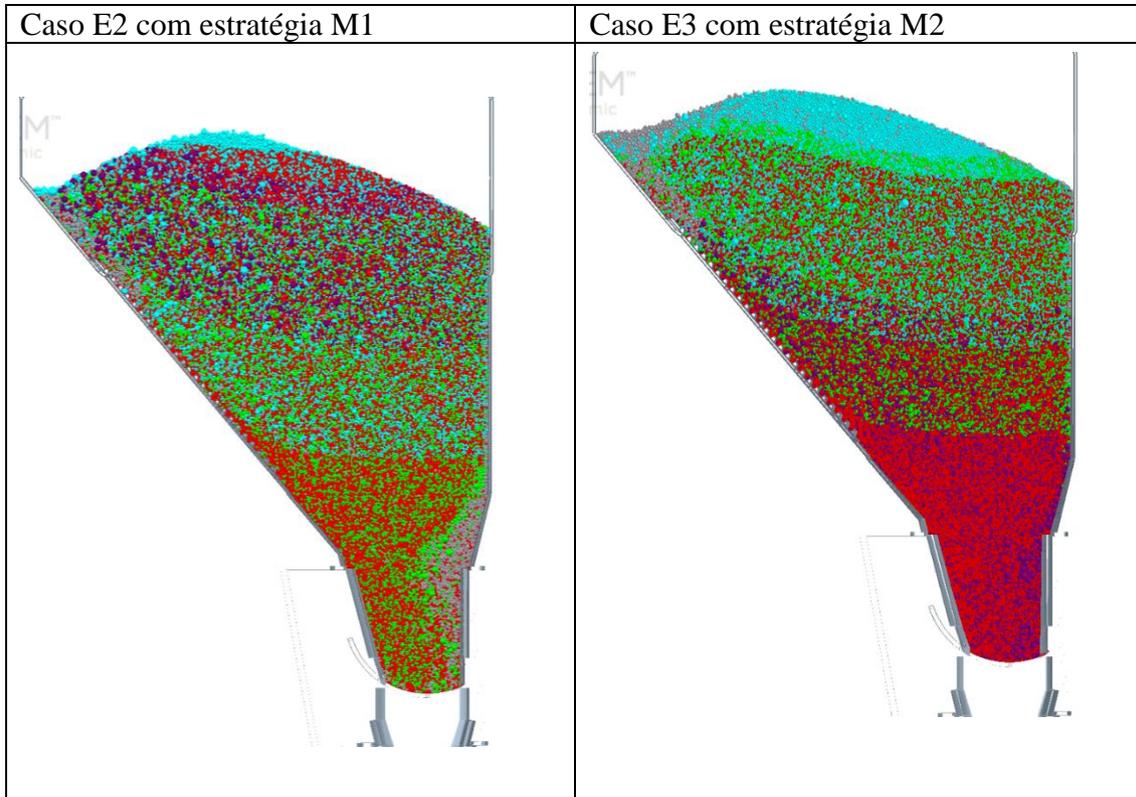


Figura 5.22 - Comparação da seção transversal do *hopper* (fatia com 0,5 m de largura) entre as estratégias M1 (direita) e M2 (esquerda).

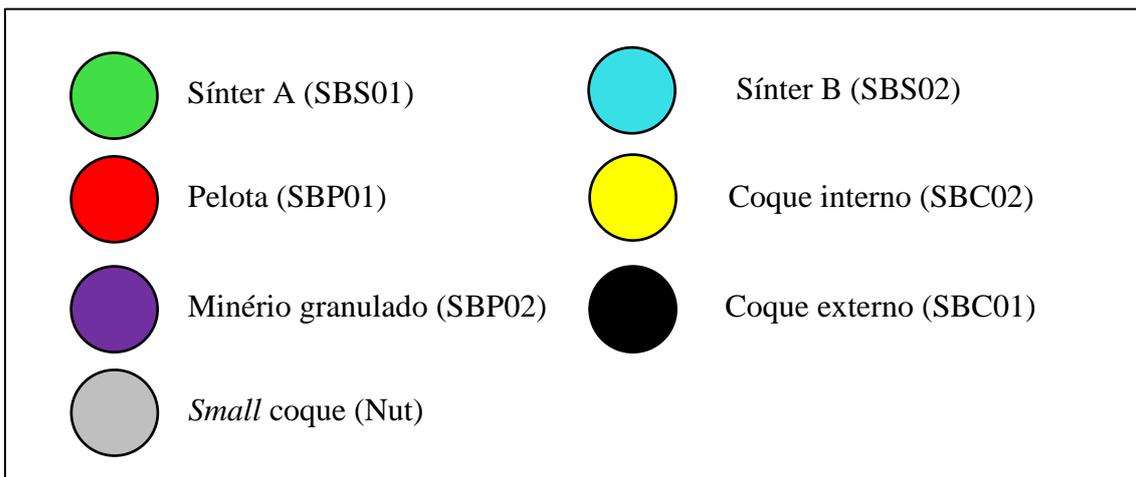


Figura 5.23 - Código de cores definido na análise das simulações em DEM, por tipo de material e balança entre parênteses.

O carregamento utilizando as estratégias C1, M1 e M2 no *hopper* seguiu precisamente o modelo industrial e seu resultado obtido esteve de acordo com a expectativa adotada nas estratégias C1, que objetivou o carregamento de coque com melhor qualidade no fundo do *hopper* (coque interno). Nas estratégias M1 e M2 objetivou-se separar o *small* coque e minério granulado e avaliar via simulação a resposta quanto a segregação durante descarga do *hopper*, onde em M1 o *small* coque está no fundo do *hopper* e em M2 na parte superior, tendo o minério sido carregado na posição oposta.

Foi avaliado durante a descarga os efeitos de parede e o afunilamento de um lado no *hopper*, causando distúrbios que alteraram a distribuição de carga desses materiais. Esses efeitos serão mostrados com mais detalhes na seção 5.2.3.

5.2.3 Descarga dos materiais no *hopper*

Os resultados da análise da descarga das matérias-primas do *hopper* são apresentados em quatro partes de forma sequencial.

5.2.3.1 Calibração da posição da válvula LMG

Conforme mostrado na seção 4.3.4.1, a válvula LMG demandou calibração da sua posição de abertura de modo a atender a taxa de descarga especificada por cada estratégia operacional. No caso, essa taxa foi de 141 kg/s para descargas de coque e de 810 kg/s para descarregamento da carga metálica.

Para a descarga de coque, a taxa mássica média passante pela válvula LMG obtida foi de 131,5 kg/s no intervalo de 2,5 segundos a 121 segundos, e está dentro dos limites de 10% de desvio da vazão mássica estabelecida pelo controle operacional. Observou-se também as vazões individuais de cada coque passante pela LMG. No caso, pode-se dizer que a queda na taxa de alimentação do coque interno (SBC02) próximo de 30 segundos de descarga ocorreu devido ao aumento da vazão de coque externo. O resultado pode ser visto na Figura 5.24, que apresenta a evolução das taxas de descarga em intervalos de 0,1 segundo.

É possível identificar que, transcorridos 2,5 segundos, a descarga se dá quase que totalmente por partículas de coque interno. As partículas de coque externo, só conseguem atingir o topo do alto-forno após transcorridos 20 segundos de descarga, no instante de 22,5 segundos a calha rotativa deixa o centro do alto-forno iniciado seu deslocamento para os ângulos mais externos, para iniciar o carregamento na parede. Como a estratégia objetiva evitar o carregamento de coque externo no centro do alto-forno, observa-se via simulação que é eficiente nos primeiros 20s de descarga.

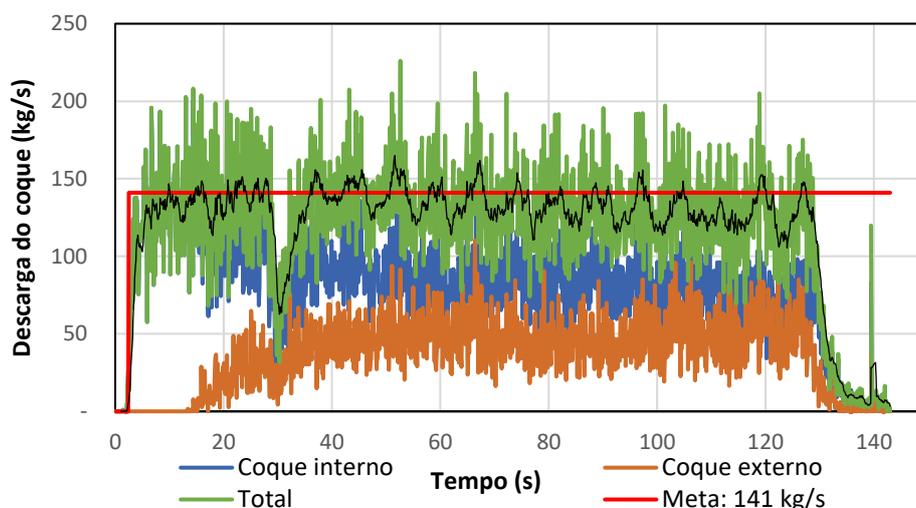


Figura 5.24 - Evolução das taxas de descarga do hopper para o carregamento C1. A taxa total é representada pela curva verde e, em preto, sua média móvel com período igual a 10 s. A linha vermelha representa a taxa desejável de 141 kg/s

No caso da descarga da carga metálica foi possível observar que a simulação com a estratégia de enchimento M1 foi a que gerou maior mistura entre os componentes. Ao observar o perfil de descarregamento mostrado na Figura 5.25, transcorridos 40 segundos percebe-se que não há tendência de descarregamento preferencial de qualquer um dos materiais. Esse resultado é evidenciado na análise das taxas instantâneas de alimentação do topo do alto-forno para este caso. Pode-se observar ainda que a taxa total de descarga se manteve próxima do patamar de 810 kg/s durante todo o descarregamento.

O mesmo comportamento foi observado para a mistura de materiais na descarga que utilizou a estratégia de carregamento M2. Nesse caso, praticamente todo o minério granulado é descarregado com menos de um terço do tempo de descarga. Após esse momento o fluxo de partículas vai se tornando gradativamente mais rico em síter no

intervalo de tempo de 50 a 80 segundos (Figura 5.26). O *small coque*, por sua vez, tem parte de sua massa descarregada logo no início e demonstra um aumento de taxa no final do carregamento.

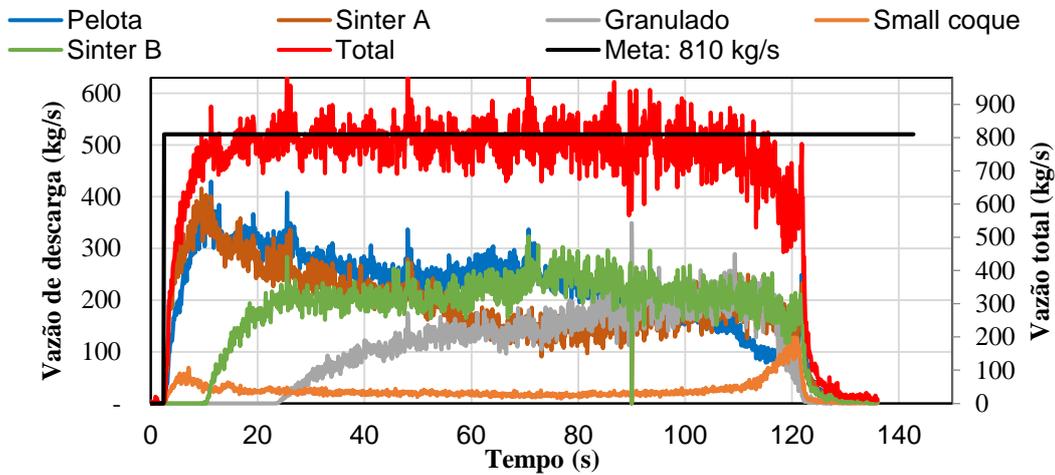


Figura 5.25 - Evolução das taxas de descarga do hopper para o caso M1. A taxa total é representada pela curva vermelha enquanto a linha preta representa a taxa desejável de 810 kg/s

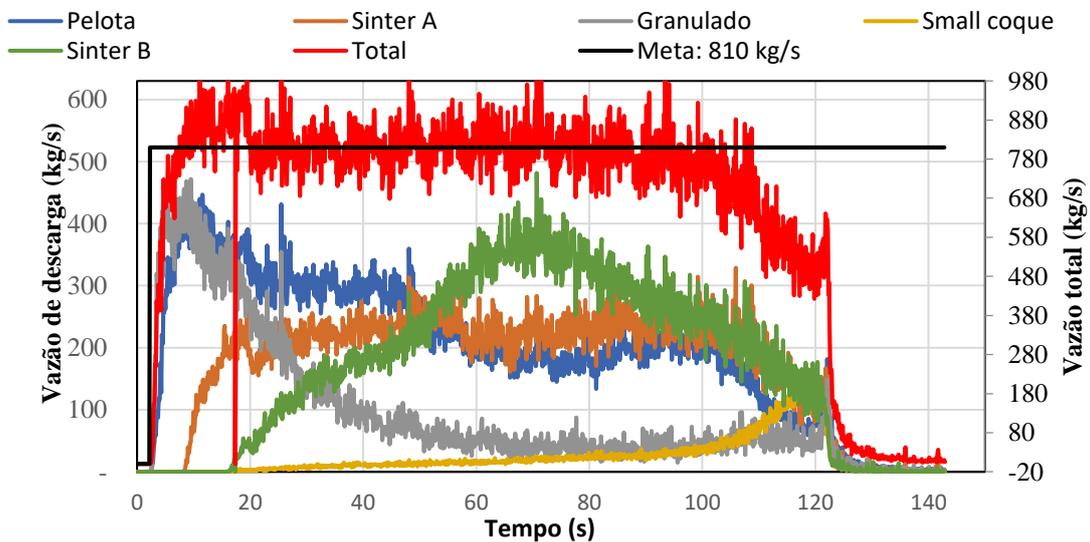


Figura 5.26 - Evolução das taxas de descarga do hopper para o caso M2. A taxa total é representada pela curva vermelha enquanto a linha preta representa a taxa desejável de 810 kg/s

Para que a vazão de descarga atingisse o valor de 141 kg/s (coque) e 810 kg/s (carga metálica) conforme estabelecido na Tabela 4.19, simulações para ajuste da LMG foram realizadas e ajustado a abertura necessária da válvula para atingir a taxa de 141 kg/s na descarga de coque, que foi de $-34,3^\circ$, enquanto para atingir 810 kg/s de carga metálica a inclinação necessária foi de $-31,0^\circ$. Esses ângulos de abertura foram similares as aberturas praticadas na operação desse equipamento, no qual a faixa operacional da abertura LMG é de -32° à -38° para coques e de -29° à -36° para carga metálica. Pode-se observar na Figura 5.27 a posição de trabalho definido para cada modelo de descarga.

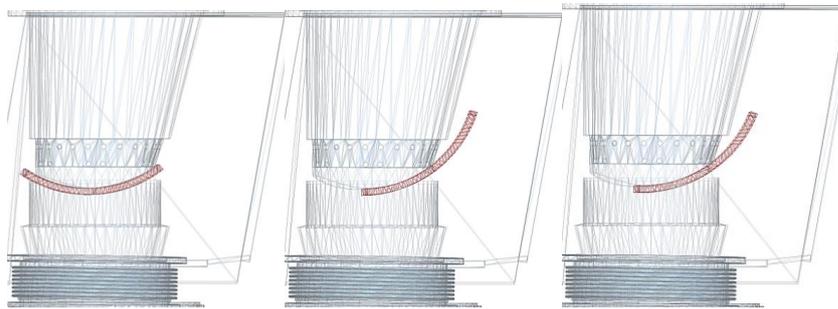


Figura 5.27 - Posição fechada da lower material gate (LMG) (à esquerda); posição em aberto para taxa requerida para a vazão de coque de 141 kg/s (no centro); e posição em aberto para taxa requerida para a vazão de carga metálica de 810 kg/s (à direita).

5.2.3.2 Perfil de descarga do *hopper*

As vazões de descargas mostradas na Figura 5.25 e Figura 5.26 são as descargas correspondentes dos carregamentos M1 e M2, respectivamente. Nesses resultados, ficou evidente que o material na parte inferior do funil do *hopper* é o primeiro a ser descarregado, já o material carregado na região intermediária e no final do *hopper* é misturado durante a descarga, transformando o *hopper* em um tipo de misturador. Os perfis de mistura encontrados podem ser verificados nas Figura 5.28 e Figura 5.29, para os carregamentos M1 e M2, respectivamente. Em ambos as simulações, pode-se verificar os materiais a partir do esquema de cores mostrado na Figura 5.23 e há a formação de um funil durante a descarga dos *hoppers* que leva a mistura dos materiais.

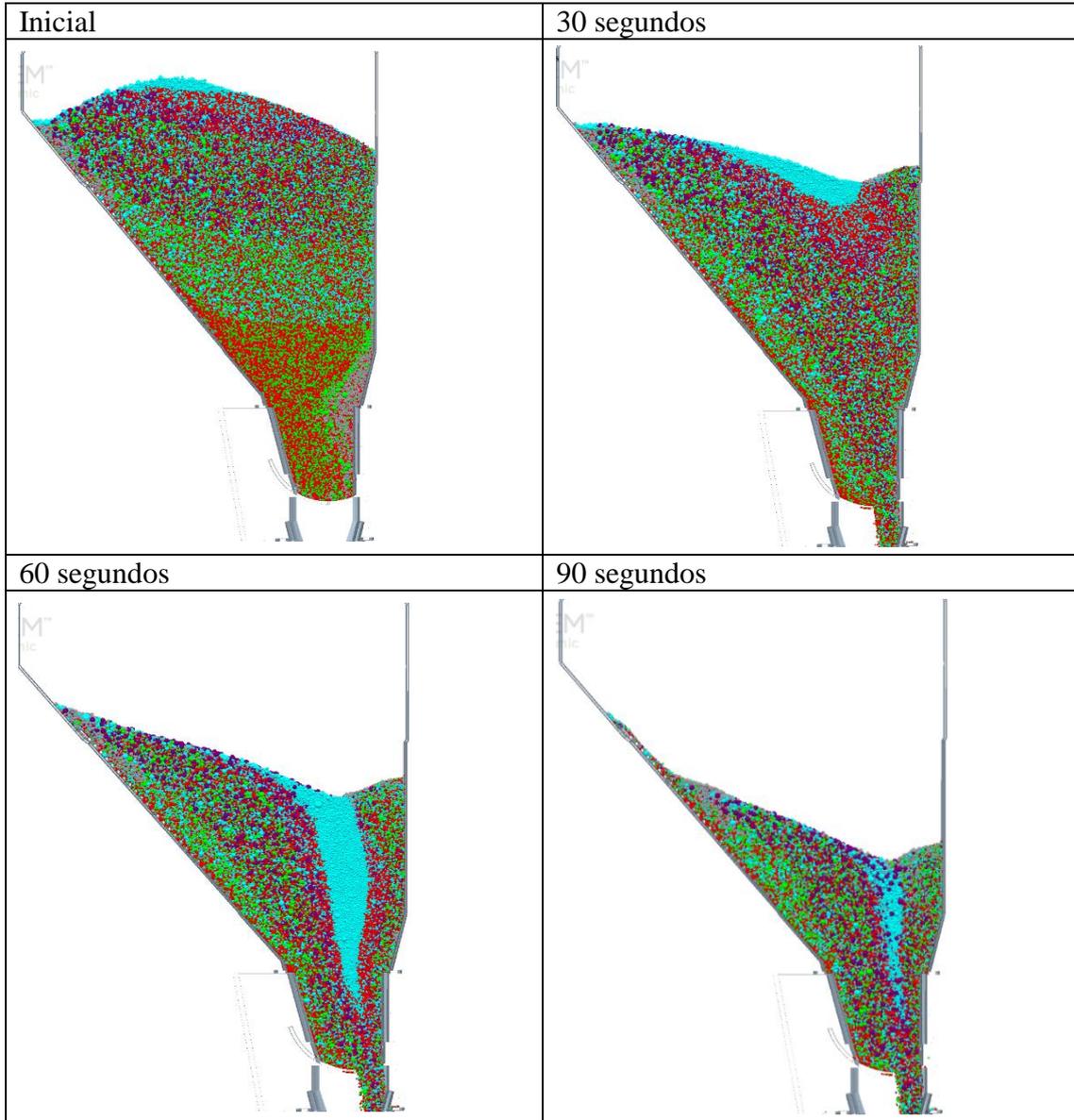


Figura 5.28 - Descarga do minério M1, o primeiro quadro corresponde a carga inicial no *hopper*, os quadros posteriores são correspondentes ao momento de descarga a cada 30 segundos.

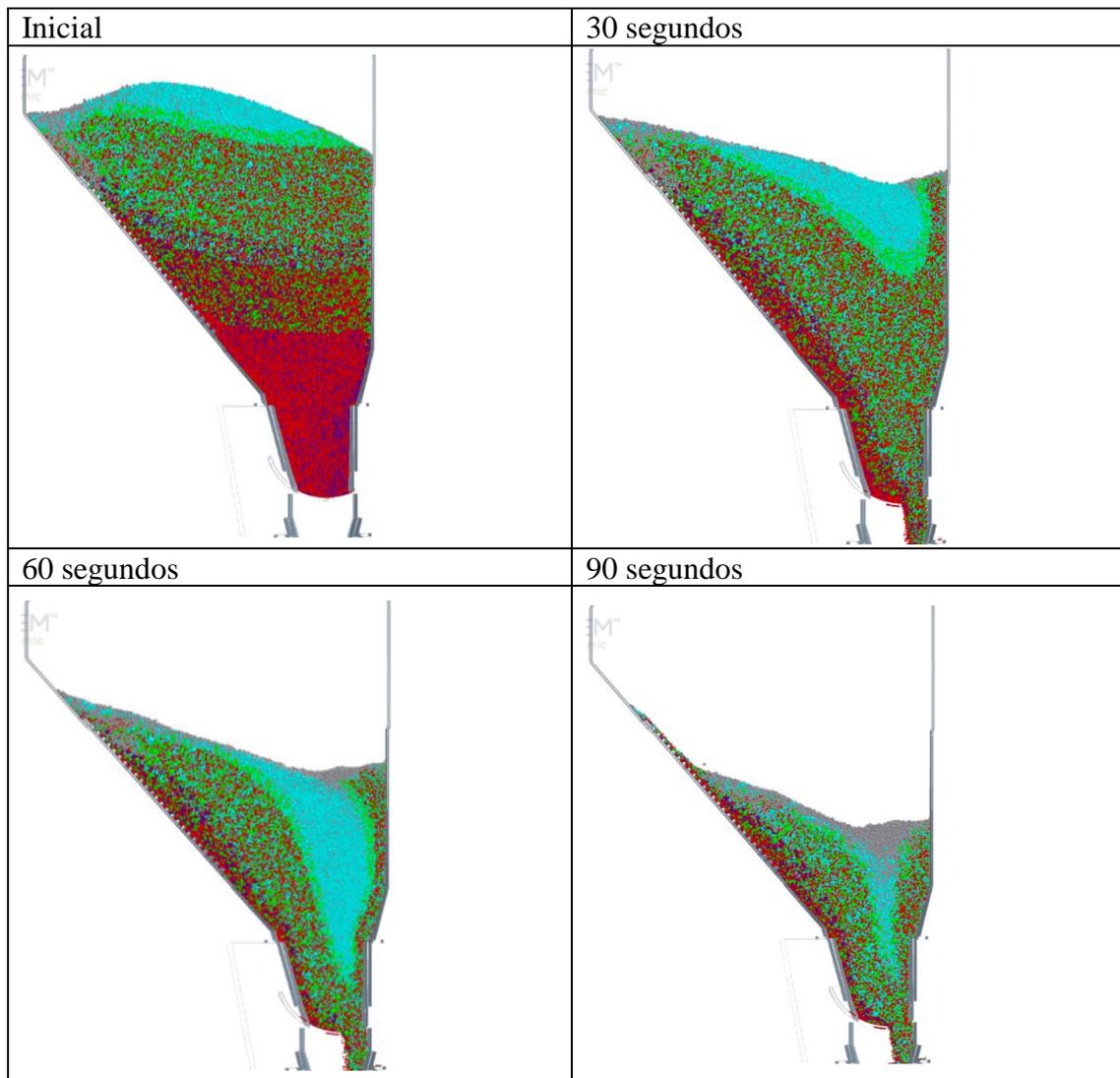


Figura 5.29 - Descarga do minério M2, o primeiro quadro corresponde a carga inicial no *hopper*, os quadros posteriores são correspondentes ao momento de descarga a cada 30 segundos.

Para a estratégia de carregamento C1 o comportamento obtido foi similar ao comportamento esperado. Pode-se observar pela vazão de descarga que nos primeiros 20 segundos não se descarrega coque externo e, passado esse tempo, inicia-se a descarga dos coques misturados dentro do *hopper*, esse fenômeno de segregação ocorrido justifica-se pela sustentação que o lado afunilado (com inclinação mais horizontal) do *hopper* cria, empregando assim, um maior efeito de parede nas partículas situadas acima dessa região. Dessa forma, entende-se que o perfil de descarga pode variar significativamente com a geometria do *hopper*, aumentando o efeito de sustentação quando a parte cônica vai ficando mais horizontal.

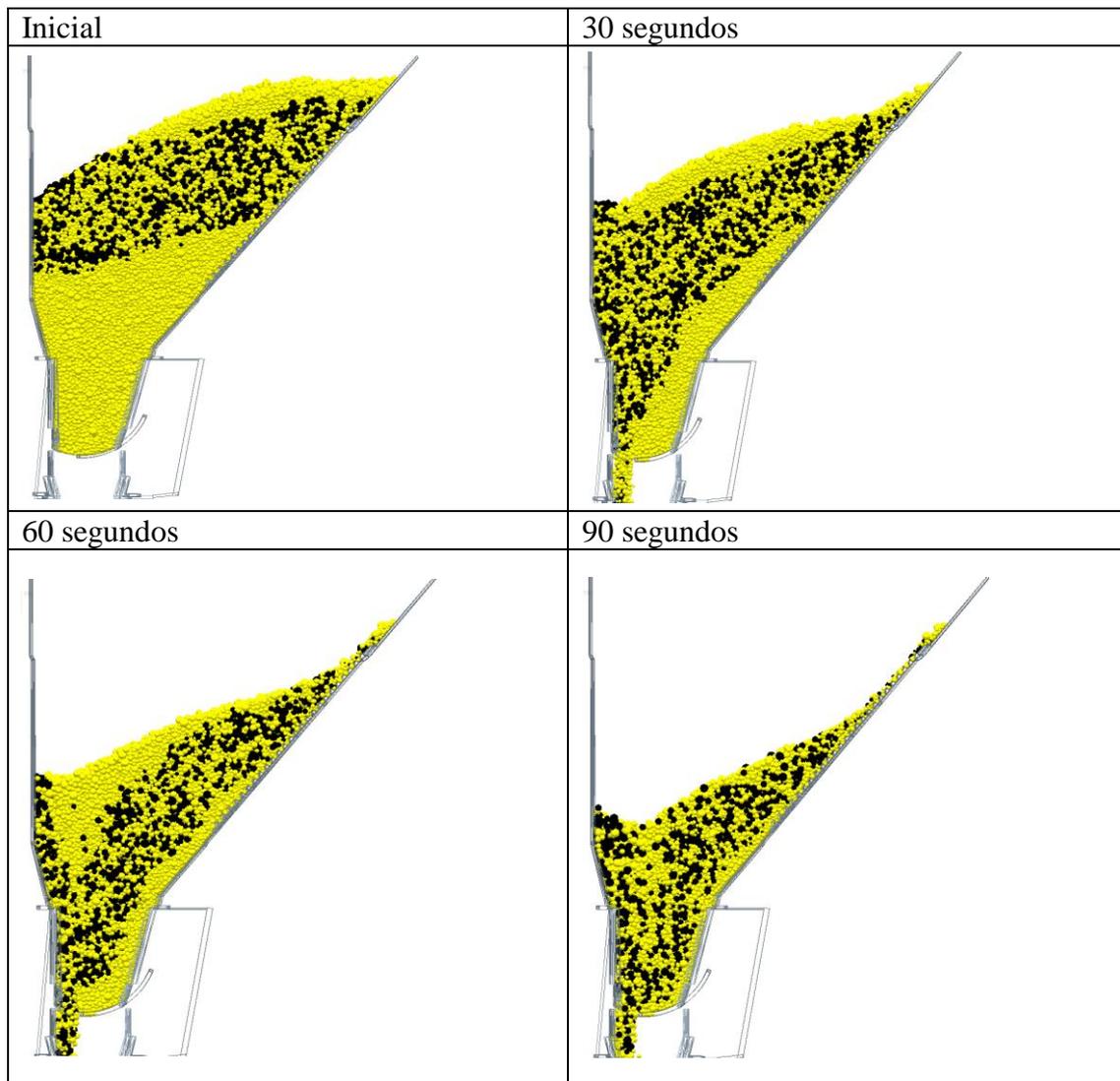


Figura 5.30 - Descarga do coque C1, o primeiro quadro corresponde a carga inicial no *hopper*, os quadros posteriores são correspondentes ao momento de descarga a cada 30 segundos.

5.2.3.3 Distribuição da carga sobre leito base

Conforme abordado na secção 3.3.1 e 4.3.4.1 o perfil base medido pode ser visto na Figura 5.31. Esse perfil foi utilizado com base para a descarga das partículas, e é uma projeção da medição do perfil da carga em uma parada planejada.

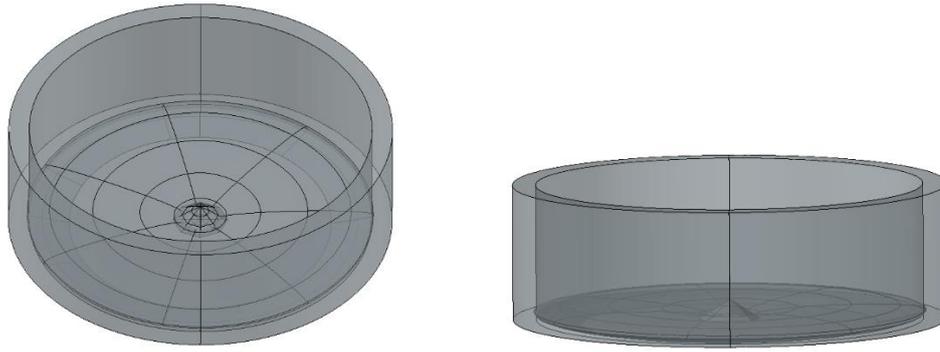


Figura 5.31 - Perfil base de distribuição: vista em perspectiva (esquerda) e vista frontal (direita)

A análise inicial da descarga sobre leito, corresponde à simulação do caso D4, cuja estratégia de movimentação da calha era a L2 CCI ou movimentação A, ou seja, com alimentação inicial central para o coque interno na posição da calha equivalente a $11,9^\circ$. Analisando a distribuição radial da massa em função do tipo de material, mostrado na Figura 5.32, pode-se observar que o coque externo só aparece em quantidades significativas a partir de 2 metros de distância em relação ao centro do alto-forno. Assim, pode-se considerar um sucesso a operação desse modelo. Entretanto, nota-se que, a partir de 3 metros há um decréscimo na quantidade total de material em direção à parede do alto-forno. A relevância dessa observação foi tal que industrialmente foi implementada uma nova sequência de movimentação de calha (L2 CCI P10), representada pelo caso D5, cujos resultados da simulação são discutidos a seguir.

Ainda sobre o caso D4, na Figura 5.36, é possível acompanhar a evolução da distribuição da carga em um corte de 50 cm de espessura a partir do centro do alto-forno, para os tempos de 30, 60, 90 e 120 segundos (final do carregamento). Percebe-se, portanto, que a maior quantidade de partículas de coque externo (pretas) posicionadas próximo às paredes, bem como o decréscimo na altura da pilha a partir de 3 metros de distância, o que corrobora a análise mostrada na Figura 5.32.

Na simulação do caso D5, a sequência de movimentação da calha rotativa inclui uma mudança em seu ângulo inicial para $12,9^\circ$, resultando no aumento da quantidade de coque descarregada na região central do forno. Adicionalmente, tem-se uma alteração no número de voltas na posição mais externa da calha, com a mudança de ângulo 8, conforme

apresentado na Tabela 4.16. A sequência é denominada de movimentação B (L2 CCI P10 ou L2 CCI modificado).

Os resultados da distribuição mássica radial mostraram que, quando comparado ao caso D4, houve uma pequena suavização do ângulo de repouso do material carregado em relação à parede do alto-forno, o que é desejável. Outro efeito positivo observado foi a presença de coque externo em quantidades significativas somente a partir de 2,5 metros de distância em relação à posição central. Verificou-se também um aumento da massa de coque na posição central, sendo esse resultado coerente com a mudança no algoritmo de movimentação da calha rotativa realizada nessa estratégia. Os resultados descritos acima podem ser vistos na Figura 5.33 e na Figura 5.35. Já a evolução da disposição dos dois tipos de coque durante o carregamento do alto-forno pode ser visto na Figura 5.37, que mostra o perfil do leito em um corte de 50 cm de espessura a partir do centro do forno, para os tempos de 30, 60, 90 e 120 segundos (final do carregamento).

A terceira simulação de descarga de coque considerou a sequência de movimentação da calha L2 CCF (movimentação D), cujos parâmetros estão definidos na Tabela 4.18. A estratégia de carregamento do *hopper* foi a mesma utilizada nos casos D4 e D5 (Enchimento C1). No entanto, a distribuição mássica radial por tipo de coque carregado evidenciou que uma grande parcela do coque externo foi carregada na região central do forno nessa estratégia, e isso pode ser observado na Figura 5.34. A presença em excesso desse tipo de coque é indesejada nessa região, podendo prejudicar o desempenho do alto-forno, principalmente afetando a renovação do homem morto, dada a maior reatividade do coque externo (Geerdes, 2015). A Figura 5.38 apresenta imagens do perfil do leito em um corte de 50 cm de espessura a partir do centro do forno, para os tempos de 30, 60, 90 e 120 segundos (final do carregamento), onde pode-se perceber a presença das partículas pretas que representam o coque externo ou da balança SBC02 na região central do alto-forno.

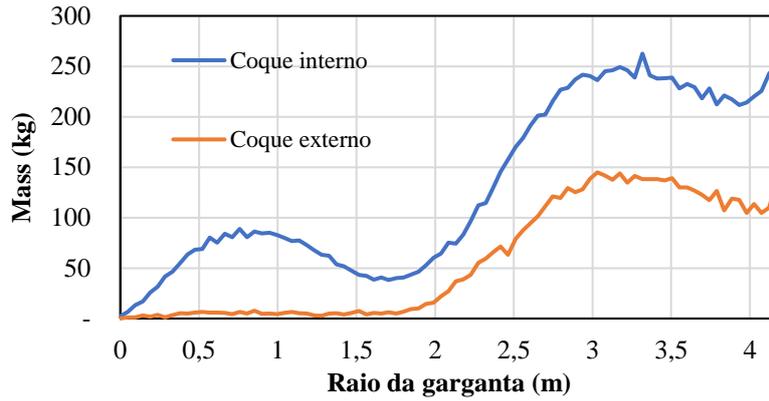


Figura 5.32 - Distribuição mássica radial em função do tipo de coque relativa ao caso D4

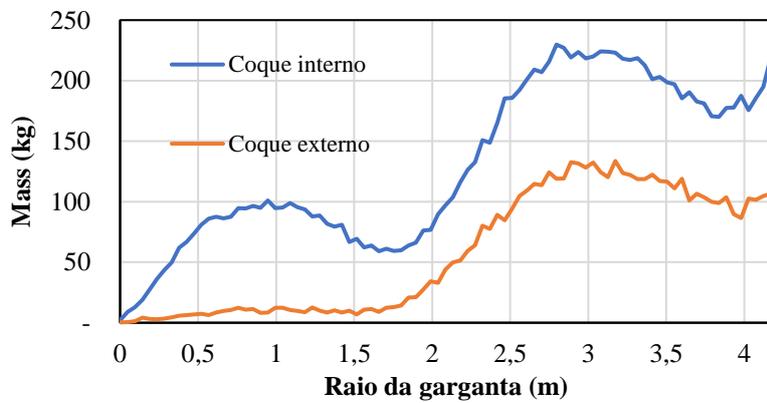


Figura 5.33 - Distribuição mássica radial em função do tipo de coque relativa ao caso D5

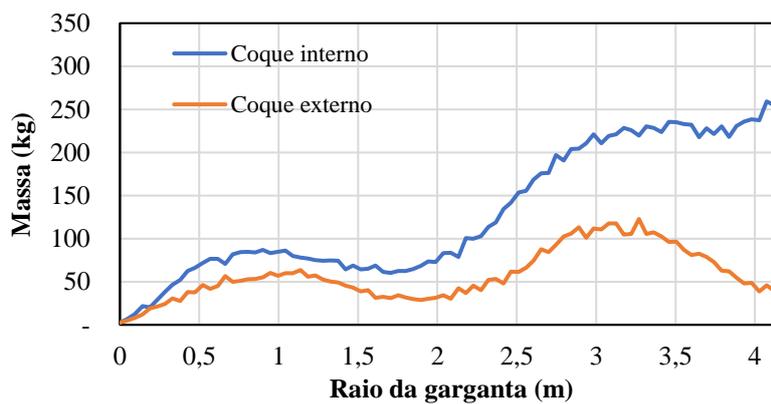


Figura 5.34 - Distribuição mássica radial em função do tipo de coque relativa ao caso D8

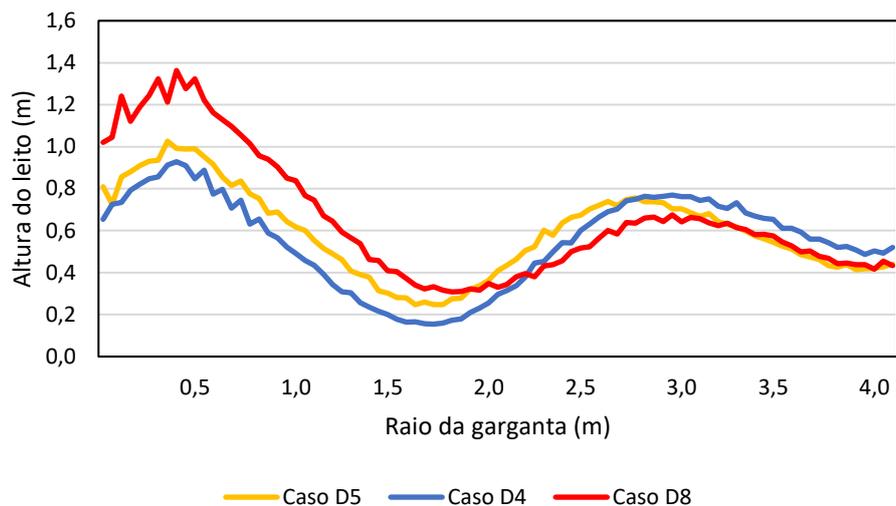


Figura 5.35 - Altura calculada do leito de partículas em função do raio do alto-forno para as três simulações de carregamento de coque

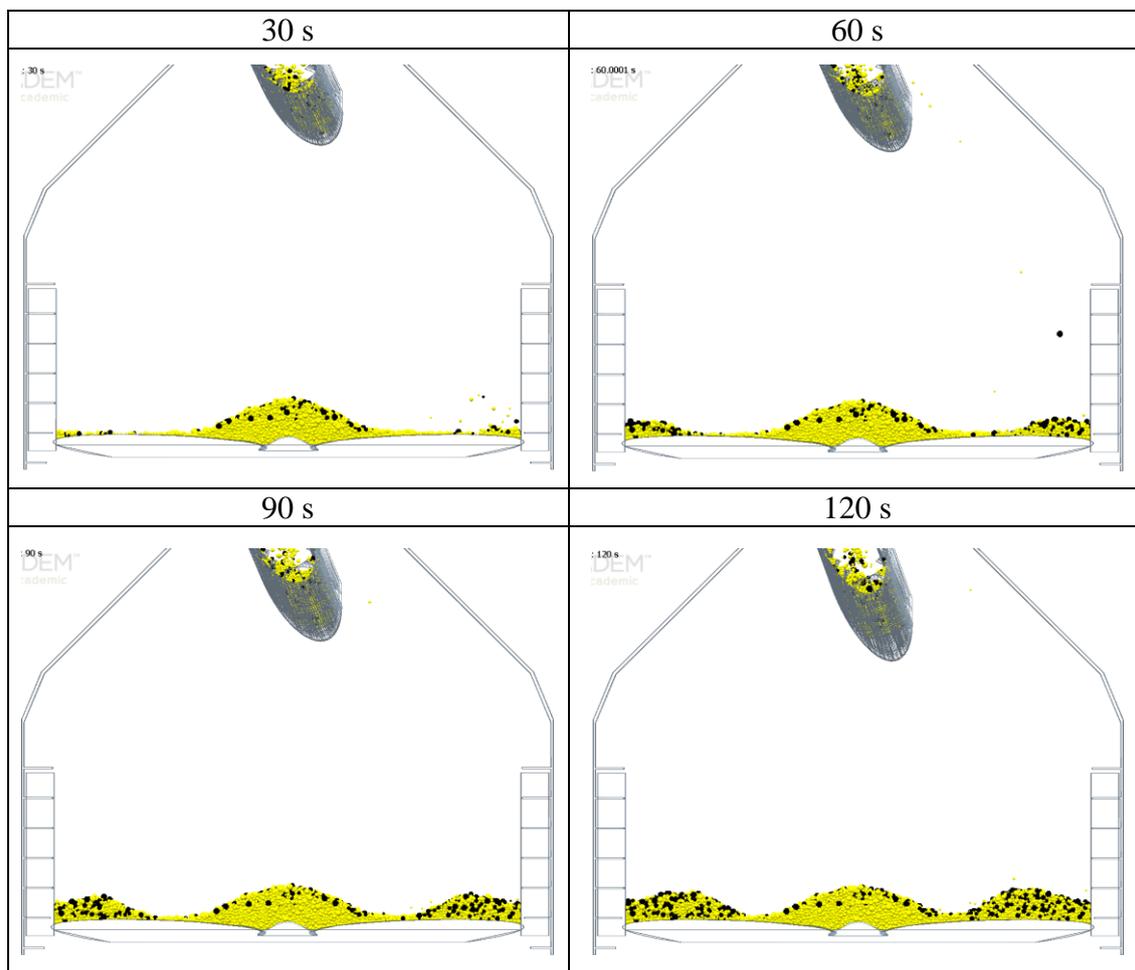


Figura 5.36 - Vista em corte da evolução do carregamento de coque no topo do alto-forno (caso D4) a cada 30 segundos. As partículas pretas representam o coque externo, enquanto as partículas amarelas o coque interno.

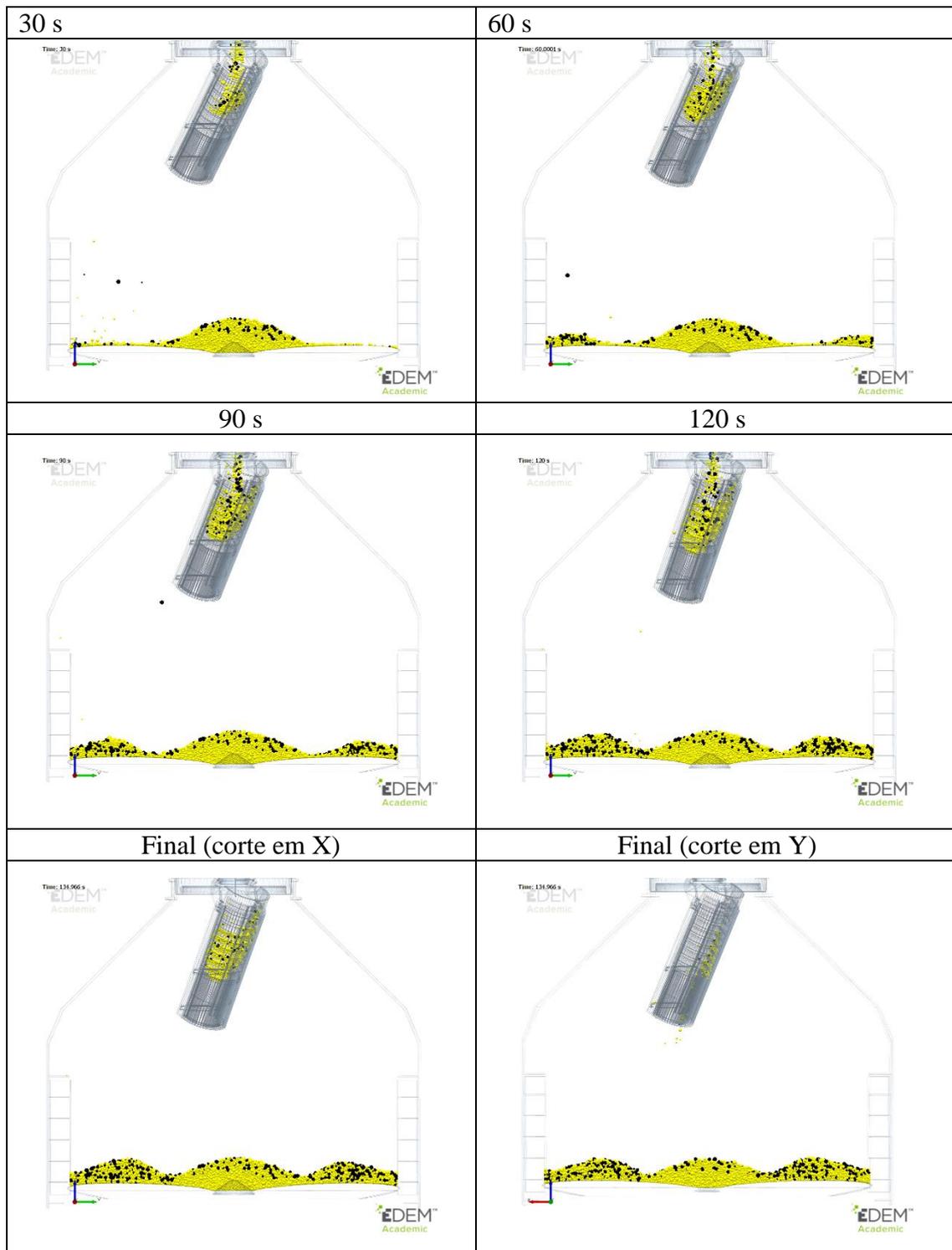


Figura 5.37 - Vista em corte da evolução do carregamento de coque no topo do alto-forno (Caso D5 - CCI utilizando p10) a cada 30 segundos. As partículas pretas representam o coque externo, enquanto as partículas amarelas o coque interno.

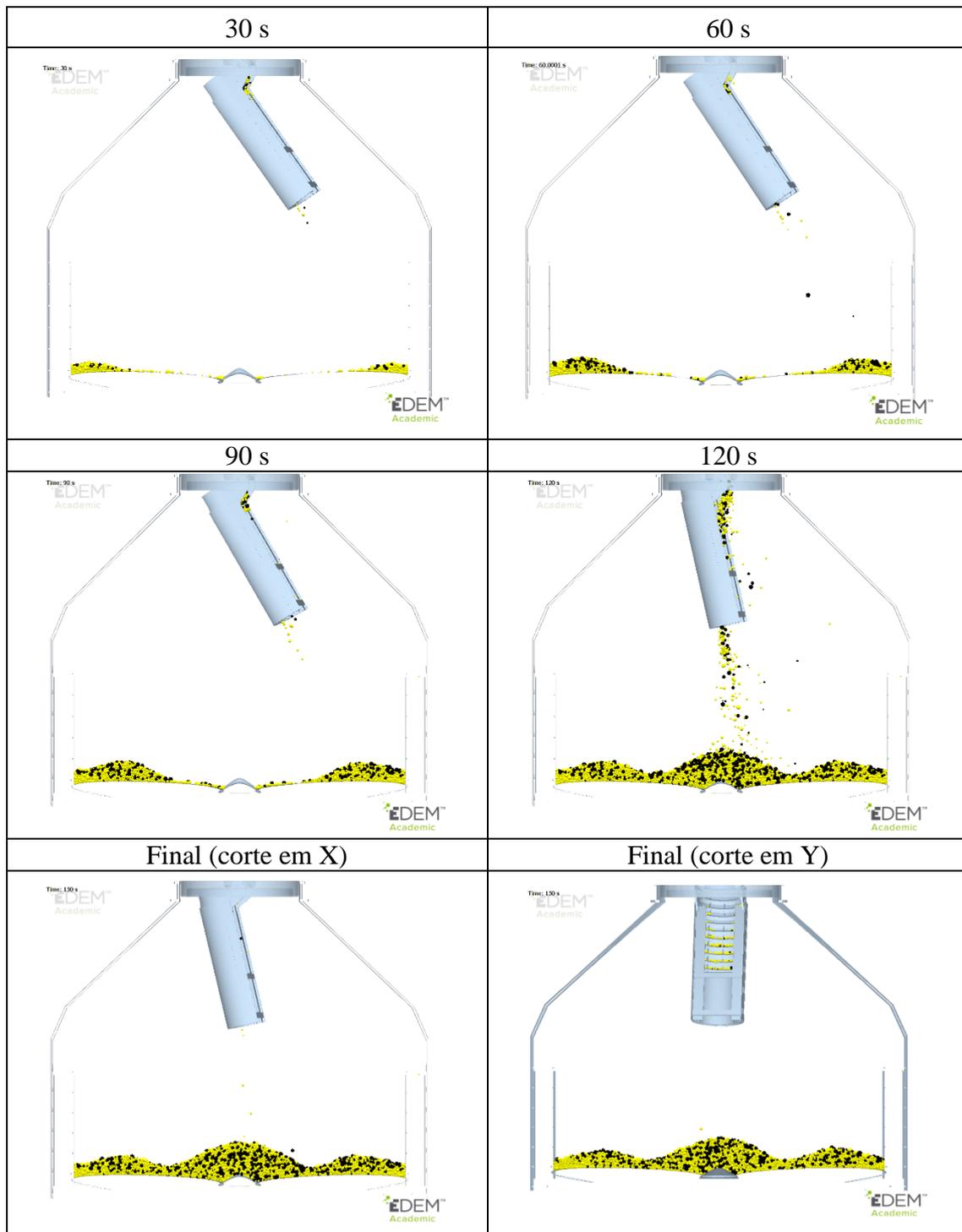


Figura 5.38 - Vista em corte da evolução do carregamento de coque no topo do alto-forno (Caso D8 - L2 CCF) a cada 30 segundos. As partículas pretas representam o coque externo, enquanto as partículas amarelas o coque interno.

No caso da distribuição de carga metálica, a partir da estratégia M1, observa-se o leito inicial formado por pelotas, sínter e *small coque* (Figura 5.41), enquanto que no caso D7 que conta com a estratégia M2, a simulação da descarga resultou na formação de uma camada inicial de pelotas e minério granulado (Figura 5.42).

Ao comparar-se os resultados da distribuição mássica de minério granulado de ambos os casos, se observa que no caso D7, houve concentração desse material próximo à parede do alto-forno, enquanto que no caso D6 o minério se apresentou mais distribuído e com maior quantidade em torno de 3 metros a partir do centro do alto-forno (Figura 5.39). Nesse caso obteve-se uma maior massa de sínter e *small coque* próximo à parede do alto-forno. Isso se deve ao fato de que as posições iniciais da calha rotativa distribuem a carga próxima a parede, e que esses materiais ocupavam a região inferior do *hopper* (parte cilíndrica), sendo imediatamente descarregados a partir do momento de abertura da válvula LMG. Esses resultados podem ser vistos na Figura 5.39 e na Figura 5.40.

A evolução da distribuição da carga para os dois casos pode ser observada na Figura 5.41 e na Figura 5.42, que apresentam uma vista em corte (com espessura de 0,5 m) do topo do alto-forno a partir de sua posição central. Nesse caso, é possível identificar, para o caso D6, que há o carregamento de pelotas, sínter e *small coque* inicialmente nas extremidades do alto-forno (representadas pelas cores vermelho, amarelo e cinza respectivamente).

Para ambos os casos, ao final do carregamento é possível notar uma certa quantidade de *small coque* próxima ao centro do alto-forno, totalizando cerca de 200 kg em um raio de 1 metro a partir do centro, o que representa cerca de 6,25% do total dessa matéria-prima alimentada.

O volume morto, partículas aderidas na superfície de impacto do *hopper*, bacia de desgaste, válvula de expansão e calha representou cerca de 1,3 t em ambos os casos. Essas partículas podem ser vistas na Figura 5.43, que mostra o resultado final da simulação para ambos os casos.

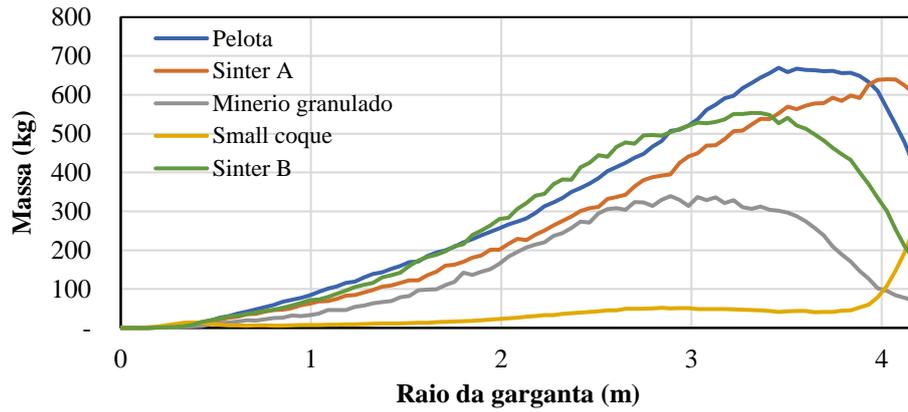


Figura 5.39 - Distribuição mássica radial em função do tipo de material para o caso D6

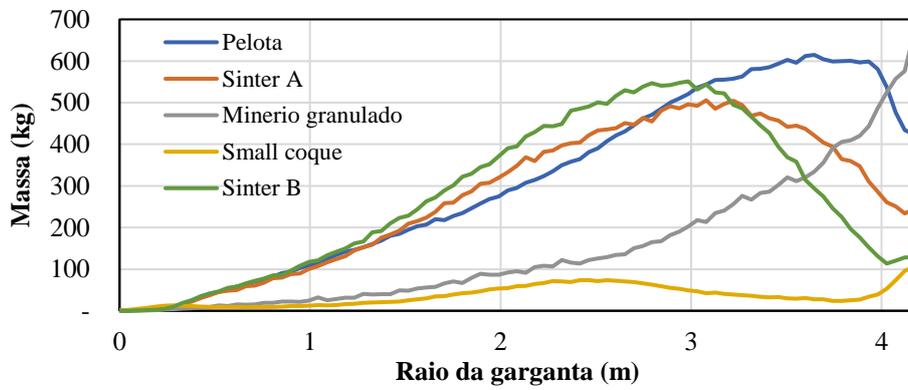


Figura 5.40 - Distribuição mássica radial em função do tipo de material para o caso D7

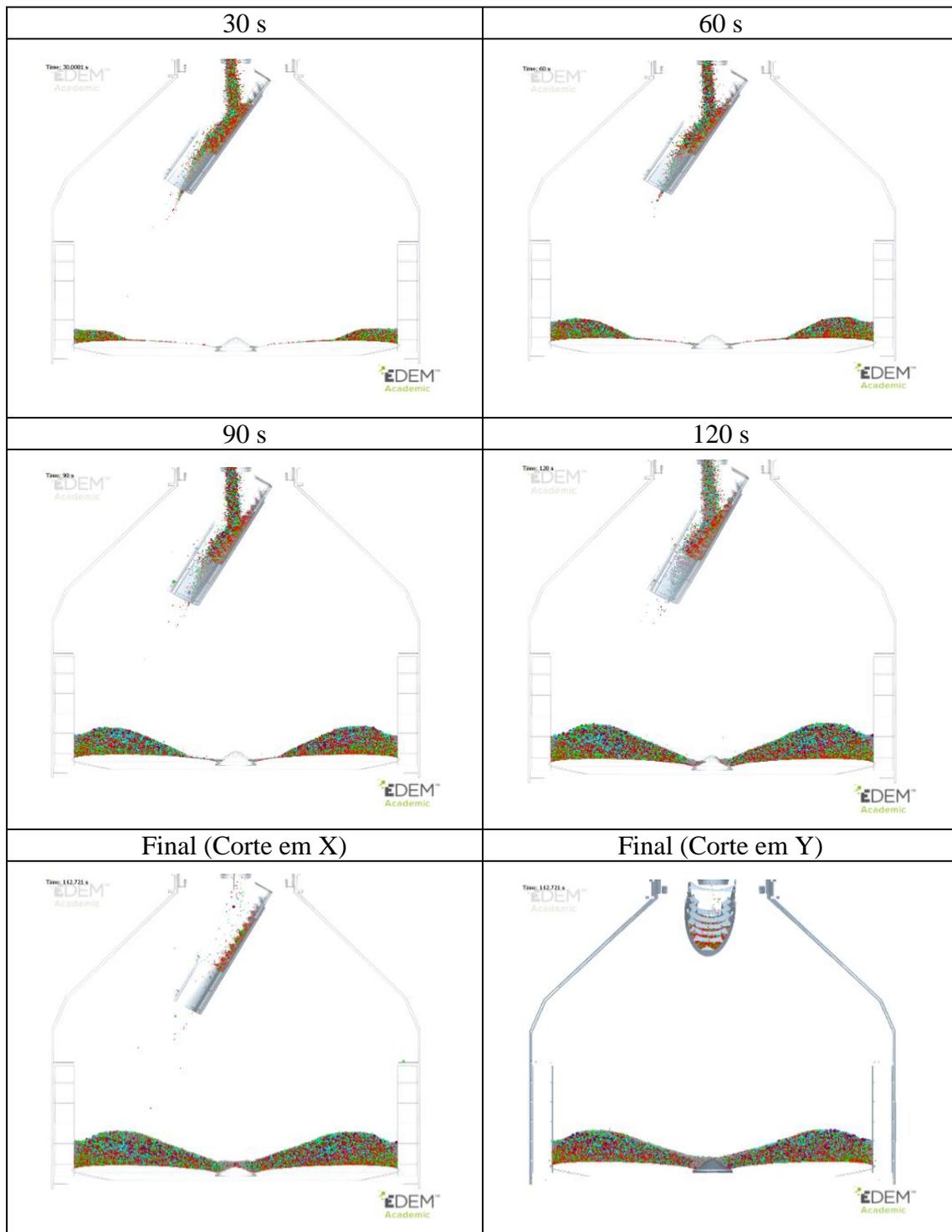


Figura 5.41 - Vista em corte da evolução temporal do carregamento de carga metálica no topo do alto-forno (caso D6). As partículas são coloridas em função do tipo, sendo as de *small* coque cinza, sinter A verdes, pelotas vermelhas, minério granulado roxas e sinter B azuis.

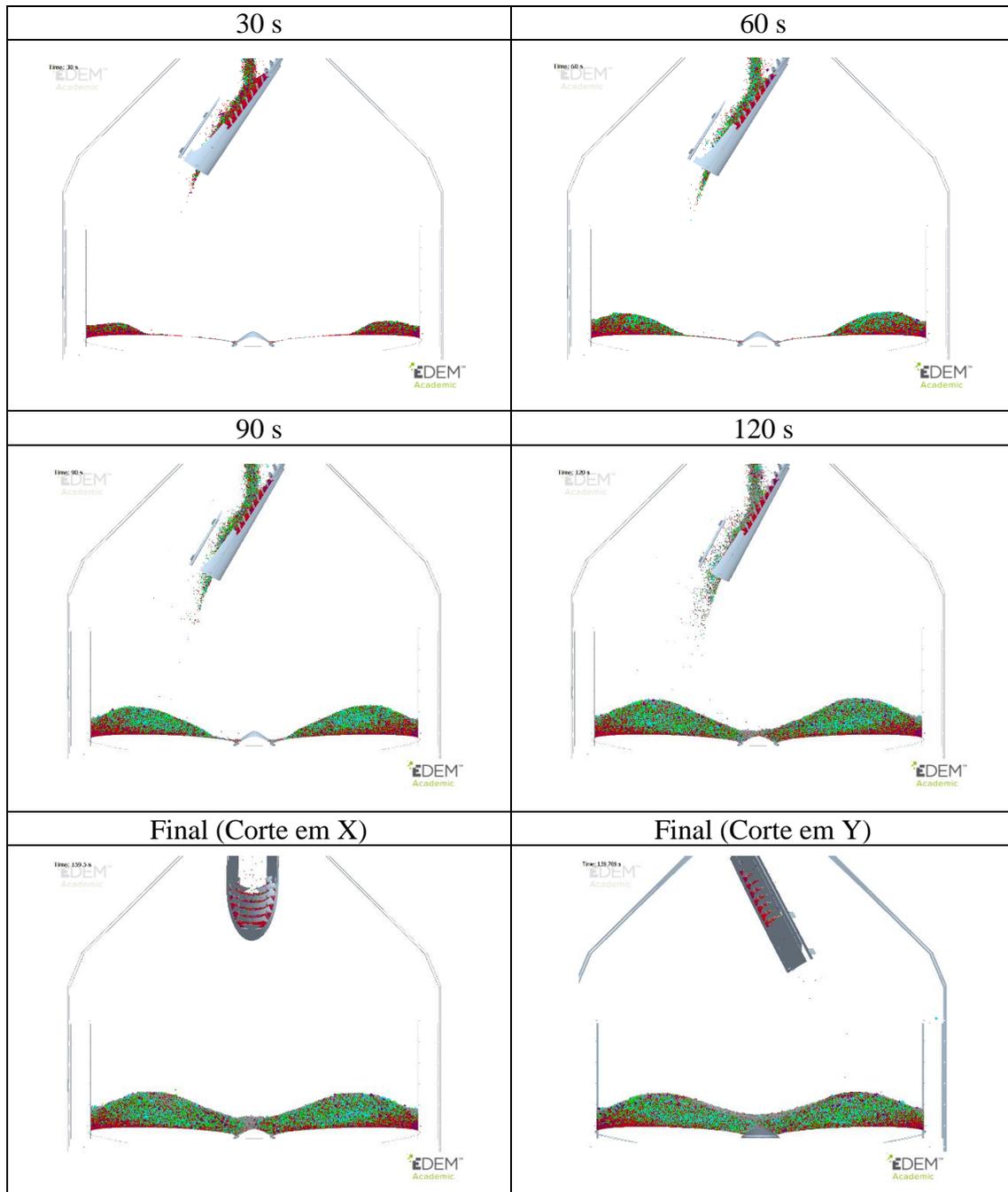


Figura 5.42 - Vista em corte da evolução temporal do carregamento metálica no topo do alto-forno (caso 22). As partículas são coloridas em função do tipo, sendo as de *small* coque cinza, sínter A verdes, pelotas vermelhas, minério granulado roxas e sínter B azuis.

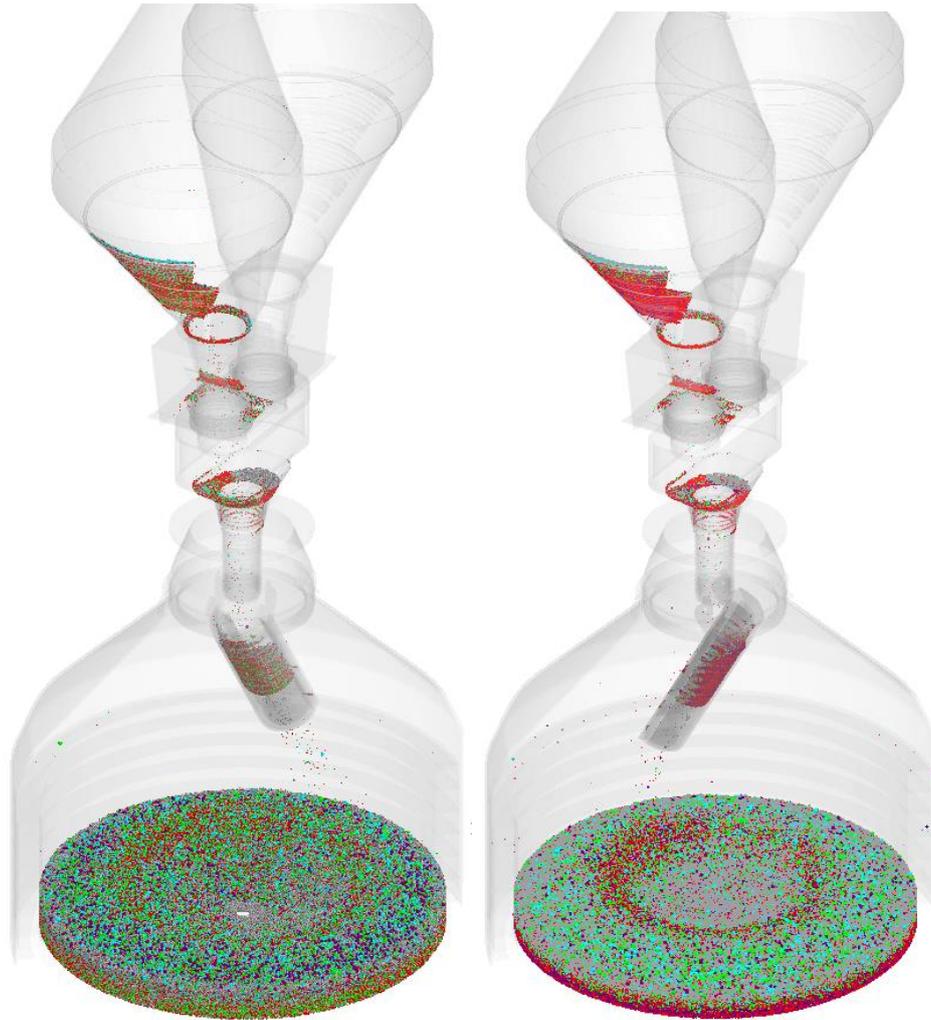


Figura 5.43 - Disposição final do leito de partículas metálicas carregado no alto-forno para o caso D6 (à esquerda) e caso D7 (à direita).

5.2.3.4 Perfil de distribuição sobre leito de partículas.

Com o intuito de representar de modo mais realista a operação de carregamento do alto-forno, foram realizadas duas simulações adicionais, sendo elas os casos D9 e D11 descritas na Tabela 4.21. Esses novos casos correspondem à estratégia de carregamento M1 da carga metálica, com a movimentação C que atende melhor à necessidade operacional, descarregadas sobre o leito de coque formado nos casos D4 (caso base) e caso D8 (distribuição do centro modificada).

Nestas simulações, além do reposicionamento do leito, atribuiu-se à base sobre a qual foi disposto o leito de coque, uma velocidade de descida de 0,0022 m/s, que corresponde à condição normal de operação dos altos-fornos localizados no Rio de Janeiro.

Em virtude do grande número de partículas foi importado utilizando a função *Bed Block*, o leito final formado pelas simulações de descarga D4 e D8 para a simulação de descarga D6 que é a descarga de carga metálica que melhor se adequa às necessidades operacionais. Isto possibilitou a realização dessas simulações contendo cerca de 2,8 milhões de partículas individuais em cerca de 150 horas. Nas imagens das análises combinadas, as partículas de cada um dos materiais são coloridas conforme definido na Figura 5.23.

Conforme pode ser observado na Figura 5.44 e Figura 5.45, transcorridos 30 segundos de carregamento, é possível identificar as partículas provenientes da carga metálica repousando próximas à parede do forno. No início do carregamento, conforme discutido na seção 5.2.3.3, a carga metálica é composta predominantemente de sinter e pelotas, representadas na simulação nas cores verde e vermelha, respectivamente. No decorrer do tempo, percebe-se pelas imagens que há um abaixamento da altura do leito de coque próximo à parede dada pela presença da carga metálica. Ao final do carregamento, percebe-se uma maior presença de partículas de coque na região central, indicando que as partículas da carga metálica deslocam o coque em direção ao centro do alto-forno, representando o efeito conhecido como *push coke*.

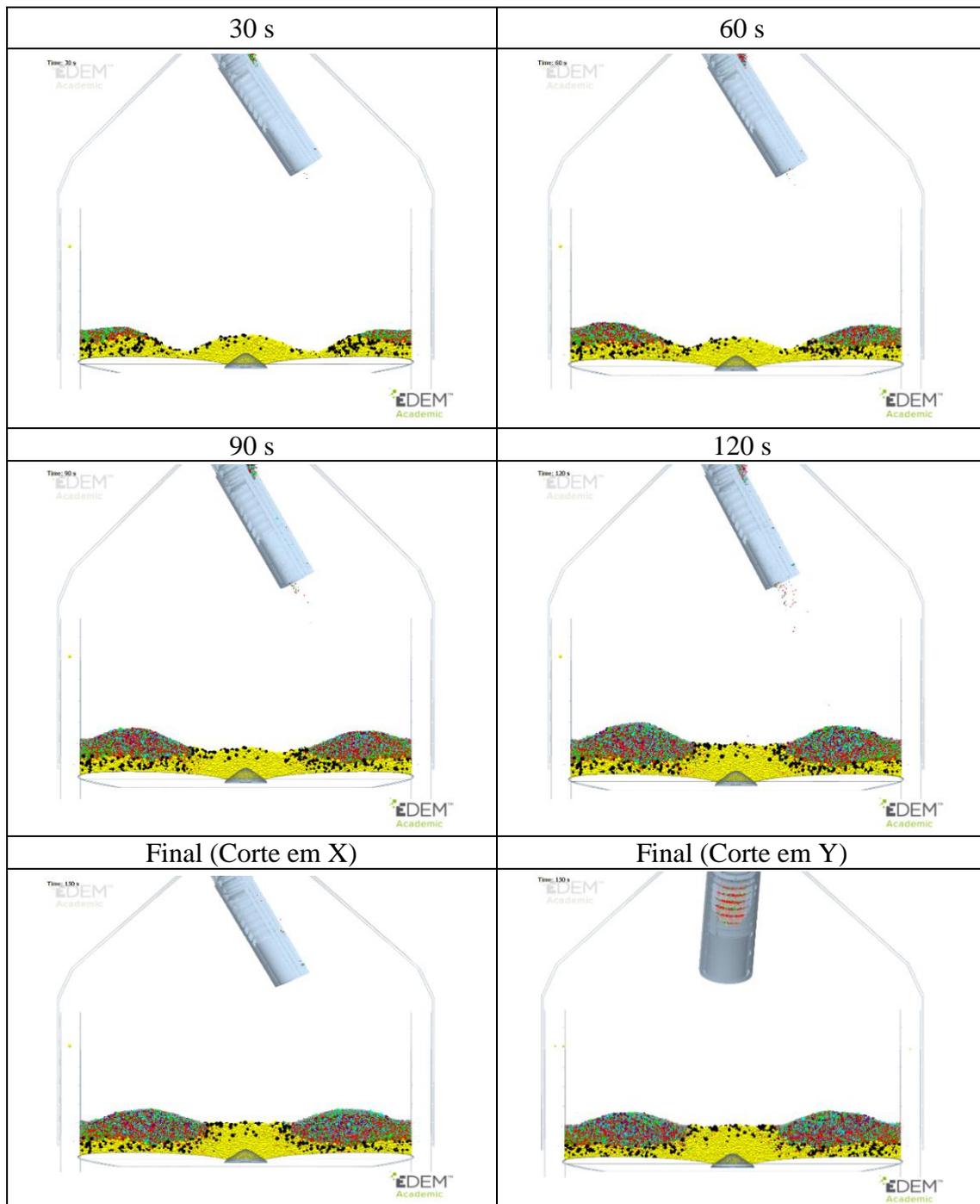


Figura 5.44 - Vista em corte da evolução alimentação de carga metálica no topo do alto-forno inicialmente contendo coque carregado pela estratégia L2 CCI (caso D9). As partículas pretas representam o coque externo

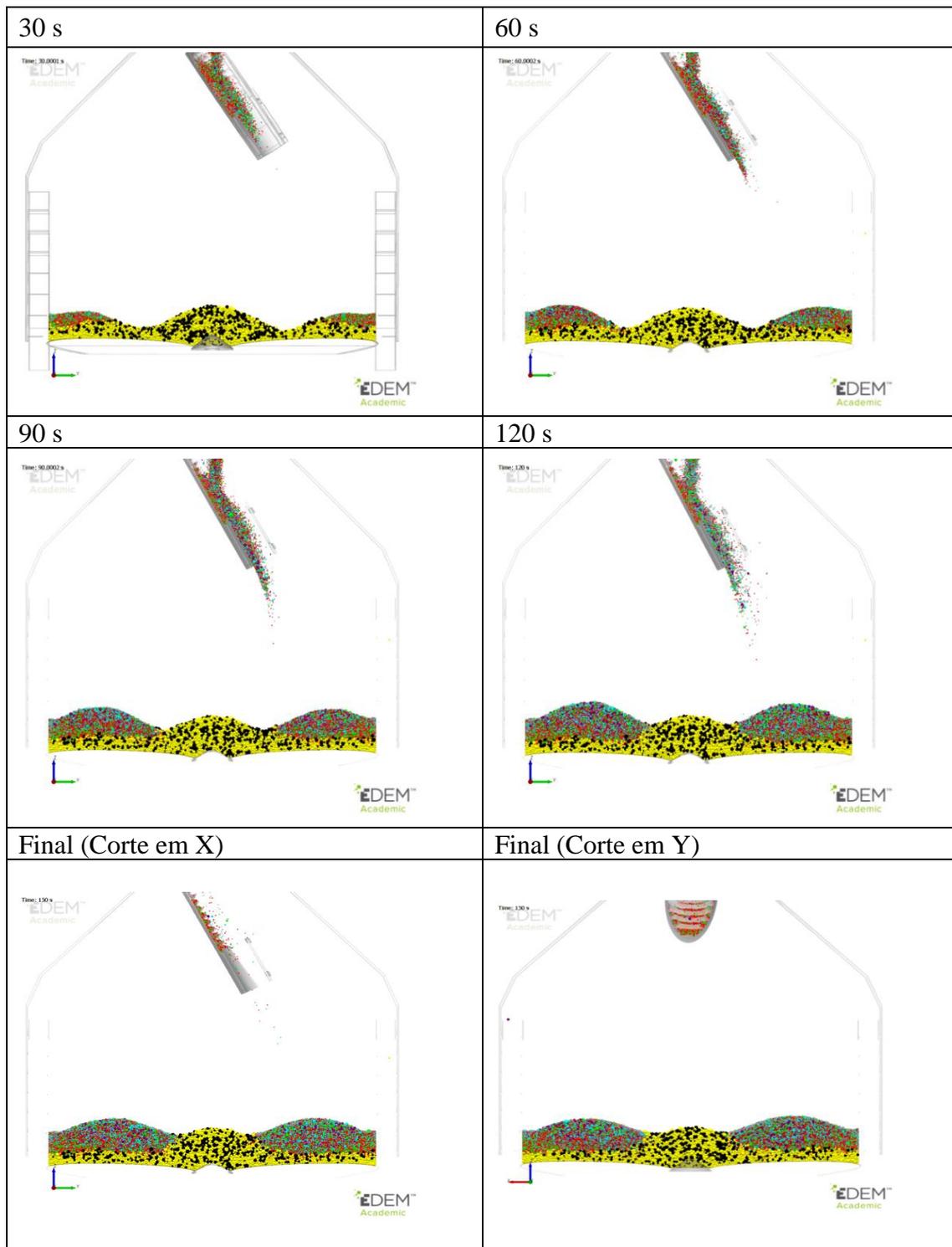


Figura 5.45 - Vista em corte da evolução da alimentação de carga metálica no topo do alto-forno inicialmente contendo coque carregado pela estratégia L2 CCF (caso D11). As partículas pretas representam o coque externo

A grande diferença entre os dois tipos de carregamento é que com o carregamento de coque central no início (CCI ou Caso D4) é possível separar os diferentes tipos de

coque (Interno e externo), permitindo o carregamento de coque de melhor qualidade no centro do alto-forno. Um benefício adicional do carregamento do coque central inicial é que este tende a garantir a massa necessária de coque na região central do alto-forno, e em casos em que há perturbações no sistema de controle de carregamento, este se torna mais confiável, deslocando a variação da descarga de coque para o final do carregamento na região intermediária impactando menos a estabilidade.

Uma forma conveniente de se visualizar a mistura de coque e carga metálica é dividir o domínio raio (r) e altura (z) em regiões (Volumes de controle). No caso, foram utilizados 44 intervalos ao longo do raio (de 0 a 4,25 m) e 21 ao longo do eixo vertical z (de -22,5 m a -20,5 m). Ao observar as Figura 5.46 e a Figura 5.47, que mostram, à esquerda, o percentual de carga metálica mais o *small* coque na garganta do alto-forno, e à direita o percentual de coque. Pode-se identificar em ambos os gráficos a região em coloração verde é a que delimita a zona onde há 50% de carga mista, onde verifica-se que a carga metálica penetra significativamente na camada de coque. Observa-se que o efeito de carga mista é maior para o carregamento de coque central inicial para o raio menor que 1 m, já observando no sentido axial para raios superiores a 1 m, nota-se um cenário muito similar nos dois casos (D9 e D11), sendo coerente, já que a mistura de pelota (material de maior penetração) é a mesma em ambos os casos.

Verificou-se que o efeito de carga mista em alguns pontos ultrapassa a metade da camada de coque, o que por sua vez não é benéfico para o processo. Esse fenômeno pode ser minimizado com ajustes na granulometria do coque e carregamento da carga metálica, e pode ser estudado com simulações adicionais utilizando o DEM para determinar a granulometria do coque e mistura de carga metálica ideal para minimizar esse efeito.

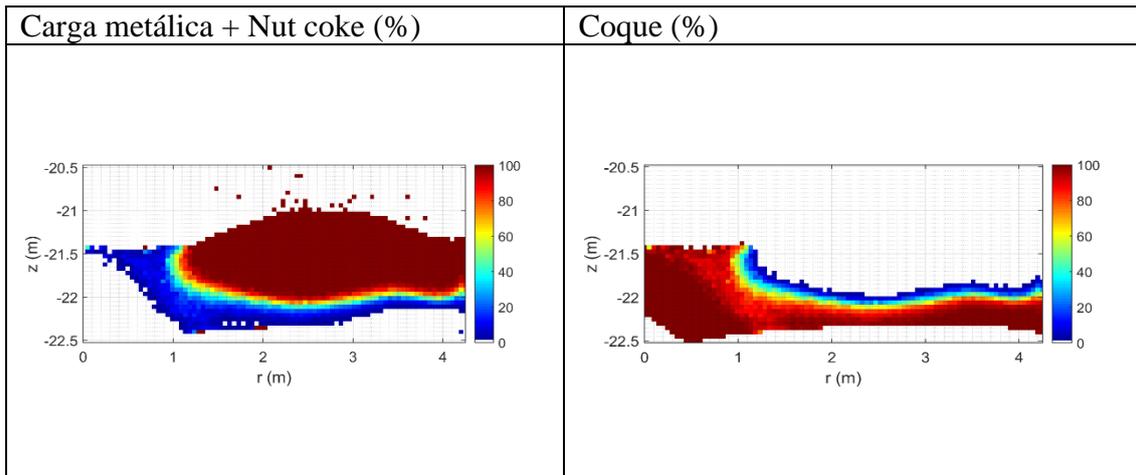


Figura 5.46 - Distribuições mássicas e percentuais radiais dos materiais descarregados no alto-forno para o caso D8. À esquerda o percentual de carga metálica, onde a coloração vermelha representa ausência de coque. À direita o percentual de coque onde a coloração vermelha representa a ausência de carga metálica.

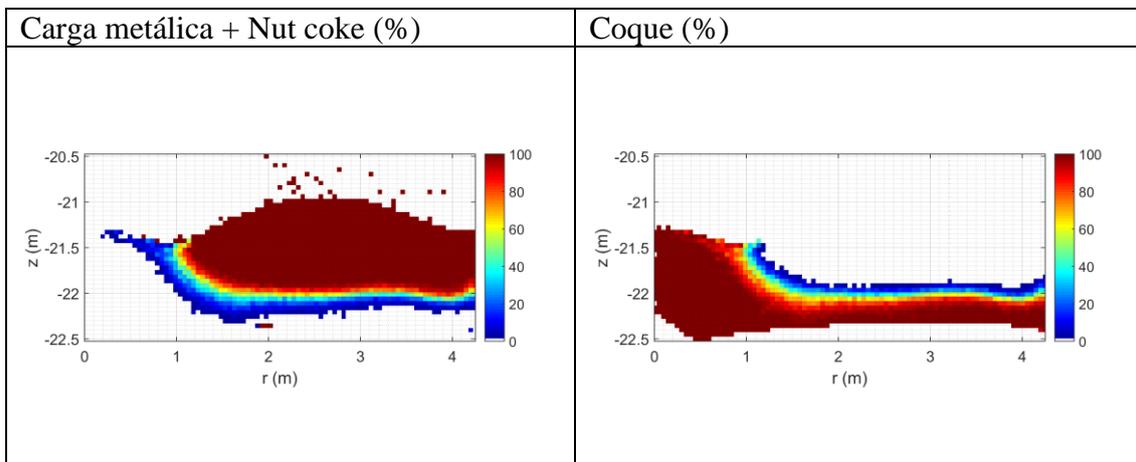


Figura 5.47 - Distribuições mássicas e percentuais radiais dos materiais carregados no alto-forno para o caso D11. À esquerda o percentual de carga metálica, onde a coloração vermelha representa ausência de coque. À direita o percentual de coque onde a coloração vermelha representa a ausência de carga metálica.

Outro ponto a se avaliar é a relação minério-coque (M/C) ao longo do raio, como pode ser observado na Figura 5.48. Em ambos os casos (D9 e D11) ocorre uma concentração de carga metálica na região intermediária, sendo que esse fenômeno pode estar relacionado ao perfil de descarga do material metálico que, de acordo com a sequência de carregamento, possui uma diferença de apenas 7° entre a posição de maior e de menor angulações. Na Figura 5.48 observa-se que em 2,5 m de raio a relação M/C chega ultrapassar 8 pontos para o caso D9 e 6,65 pontos para o caso D11.

Devido ao pouco espalhamento da carga metálica e os efeitos de colapso da camada de coque na região intermediária do alto-forno, o coque *rate* se aproxima de 200 kg/tHM para o caso D9 e de 240 kg/tHM para o caso D11 nessa região. Essa concentração de metálicos pode trazer diversas complicações operacionais com dificuldades para redução do *Fuel rate* e piora nas condições operacionais do cadinho e escoamento.

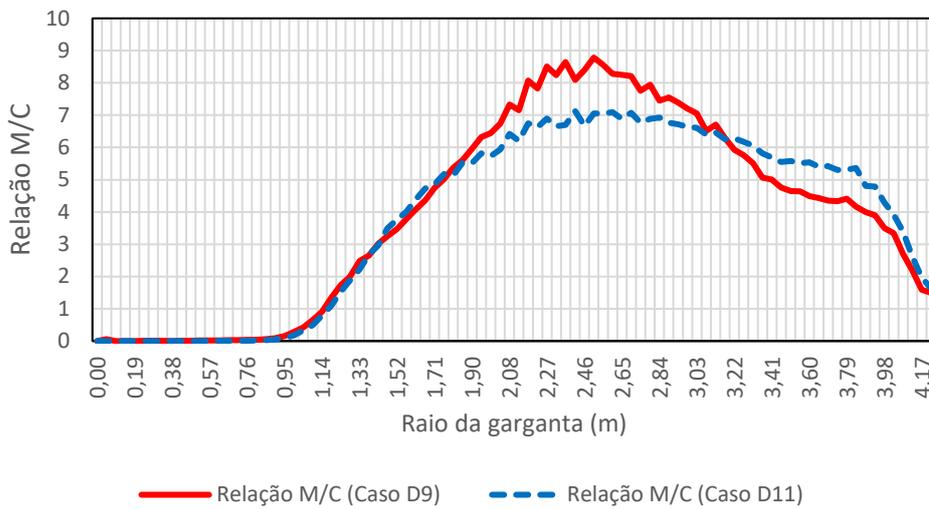


Figura 5.48 - Relação M/C em função do raio do forno para os Casos D9 e D11.

Em relação à segregação por tamanho, observa-se na Figura 5.49 e na Figura 5.50 que na descarga do caso D11 (CCF) no centro do alto-forno concentrou coque de maior granulometria, sendo esse efeito benéfico ao cadinho, conforme descrito em (Geerdes, 2015).

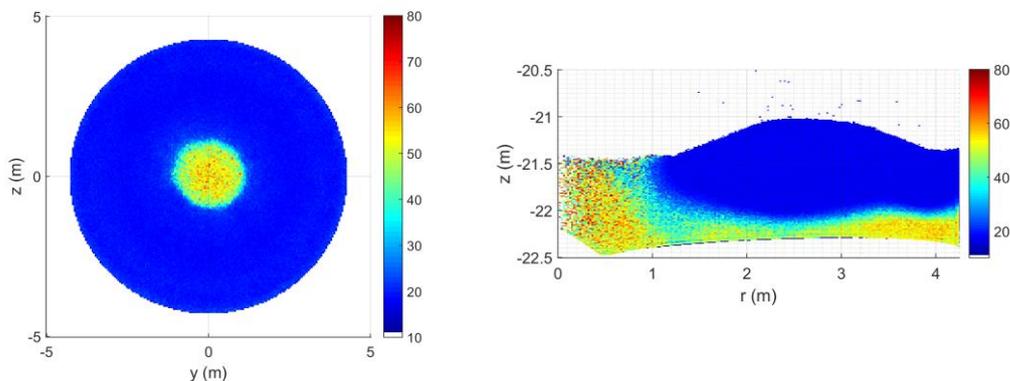


Figura 5.49 - Diâmetro médio final para o caso D9

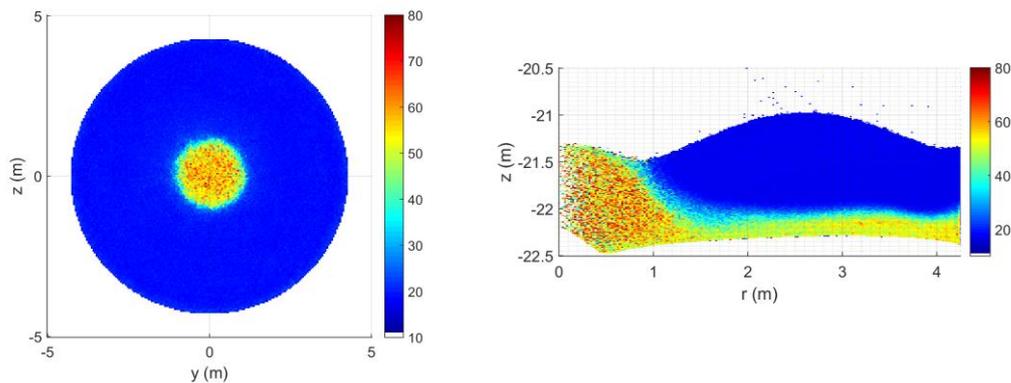


Figura 5.50 - Diâmetro médio final para o caso D11

Por fim, ao avaliar a descarga completa nos dois casos, nota-se um perfil similar de carregamento, sendo que o caso D9 (CCI) é mais robusto em caso de falha nos sistemas de controle de carregamento, evitando a falta de coque central e consegue evitar o carregamento de coque externo no centro do alto-forno nas condições simuladas. Em contrapartida ele demanda mais tempo de descarga e se mostrou mais frágil à formação de carga mista na região central com o diâmetro do coque no centro do alto-forno ligeiramente menor.

Um ponto de atenção observado nos perfis formados é que elevada camada de minério na intermediária, pode pronunciar o colapso nessa região, onde o centro do alto-forno estaria desprotegido, acarretando desvios no fluxo gasoso. Dessa forma, é ideal aumentar o espalhamento da carga metálica no topo do forno para evitar seu acúmulo na região intermediária, onde preferencialmente, a ação deve ser feita com maior carregamento de coque na parede para evitar uma redução significativa da camada devido ao arrasto do coque pela carga metálica. Na Figura 5.51 pode-se observar o perfil final do caso D9 (CCI) e do caso D11 (CCF) após a descarga de minério sobre o leito de coque.

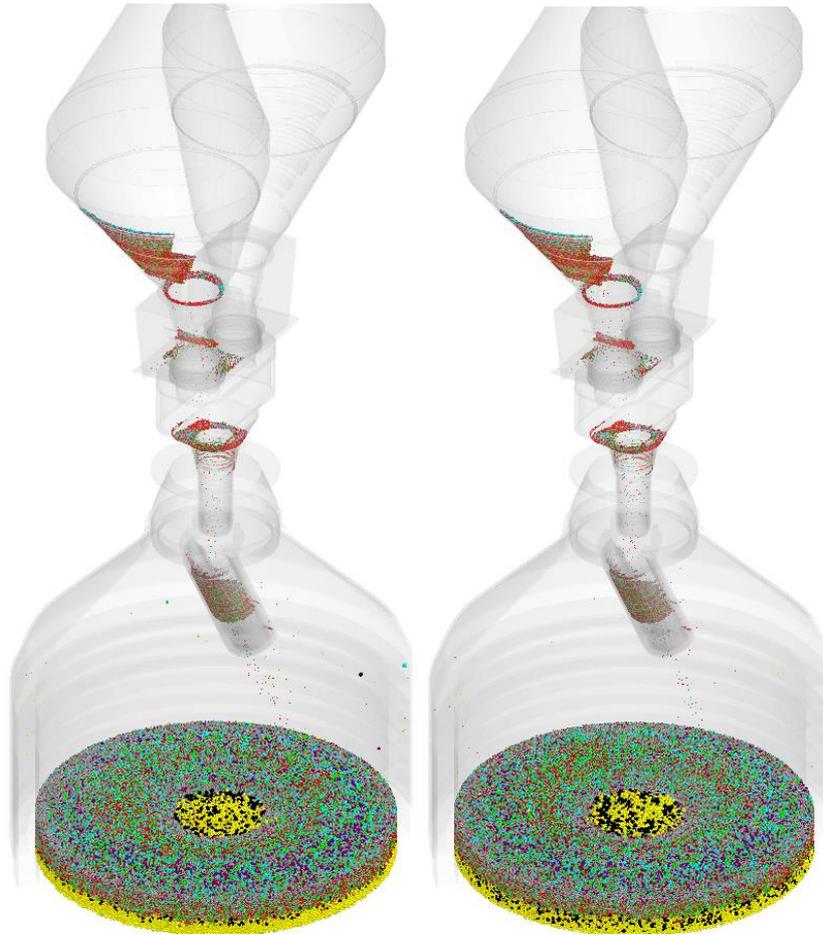


Figura 5.51 - Disposição final do leito de partículas metálicas carregado no alto-forno para o caso D9 (à esquerda) e caso D11 (à direita).

5.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA

O desenvolvimento do modelo de distribuição de carga baseou-se na análise das velocidades das partículas obtidas nas simulações DEM para determinar o ajuste necessário no modelo fenomenológico proposto por Park *et al.* (2011), mostrado na seção 4.5.

5.3.1 Estimação da velocidade de chegada na calha rotativa

Os resultados das simulações em DEM mostraram que o aumento da vazão volumétrica descarregada pelo *hopper* resultou na redução da desaceleração causada pelo

efeito de parede na velocidade média das partículas que atravessam o *feeder spout*. Como este efeito não é descrito pelo modelo de Park *et al.* (2011), foi proposto uma modificação na forma original da equação 3.16, incluindo o efeito da vazão de descarga. O resultado é apresentado na forma da equação 5.1

$$V_{2vmod} = V_{1v} + \left[\frac{3\dot{Q}(V_{1v}^2 + 2gH_d)}{\pi V_{1v}(R_{feed}^2 + R_{feed}r_{feed} + r_{feed}^2) \cdot (30\dot{Q})^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 5.1}$$

No modelo modificado foram incluídos os parâmetros \dot{Q} que é a vazão volumétrica de descarga (m^3/s), R_{feed} é o raio superior do *feeder spout* e r_{feed} é o raio inferior do *feeder spout*. O modelo original pode ser visto na equação 3.16, e corresponde à equação de queda livre de uma partícula em uma dada altura $[V_{1v}^2 + 2gH_d]^{0,5}$, multiplicado por um fator de correção K_f . No modelo modificado foi incluído o cálculo do volume do *feeder spout* pela equação de um tronco cônico dado pela equação 5.2 e a vazão volumétrica de controle da descarga da LMG (\dot{Q}), permitindo assim chegar em uma equação que é sensível a variação da vazão volumétrica na entrada do *feeder spout*.

$$V_{tc} = \frac{\pi H_d}{3} (R^2 + Rr + r^2) \quad \text{Equação 5.2}$$

Os resultados das equações 3.16 e 5.1 são apresentados na Figura 5.52, que mostram os valores das velocidades de entrada e saída do *feeder spout*, bem como a vazão volumétrica de alimentação em (m^3/s).

A vazão volumétrica respondeu progressivamente à abertura da LMG, apresentando valores que foram de 0,2 a 1,0 m^3/s (limites de controle de projeto). Na Figura 5.52 é ilustrada também a aplicação direta do modelo de Park *et al.* (2011), cujas velocidades das partículas ao longo do tempo são representadas pela linha preta, a velocidade inicial (linha verde) é a velocidade de entrada no *feeder spout* avaliada nas simulações em DEM e equivalem ao parâmetro V_{1v} em ambas as equações, a velocidade em queda livre (linha amarela) é a aplicação da equação 3.16 com K_f unitário, a linha

vermelha é a vazão volumétrica de material passando por dentro do *feeder spout* avaliada pela simulação em DEM, a linha abóbora é a aplicação da equação 5.1, e os pontos azuis são as velocidades médias no final do *feeder spout* analisados pela simulação em DEM.

Observa-se que o modelo original de Park (Park *et al.*, 2011) não foi capaz de prever o aumento gradual na velocidade das partículas observado nas simulações DEM. Em contrapartida, o modelo modificado foi capaz de descrever em grande parte os resultados obtidos do DEM, sendo, portanto, capaz de corrigir a alteração da velocidade das partículas em queda no *feeder spout* ao efeito da vazão volumétrica. Os desvios entre as equações 3.16 e 5.1 chegam à ordem de 10% em relação a velocidade final na saída do *feeder spout*.

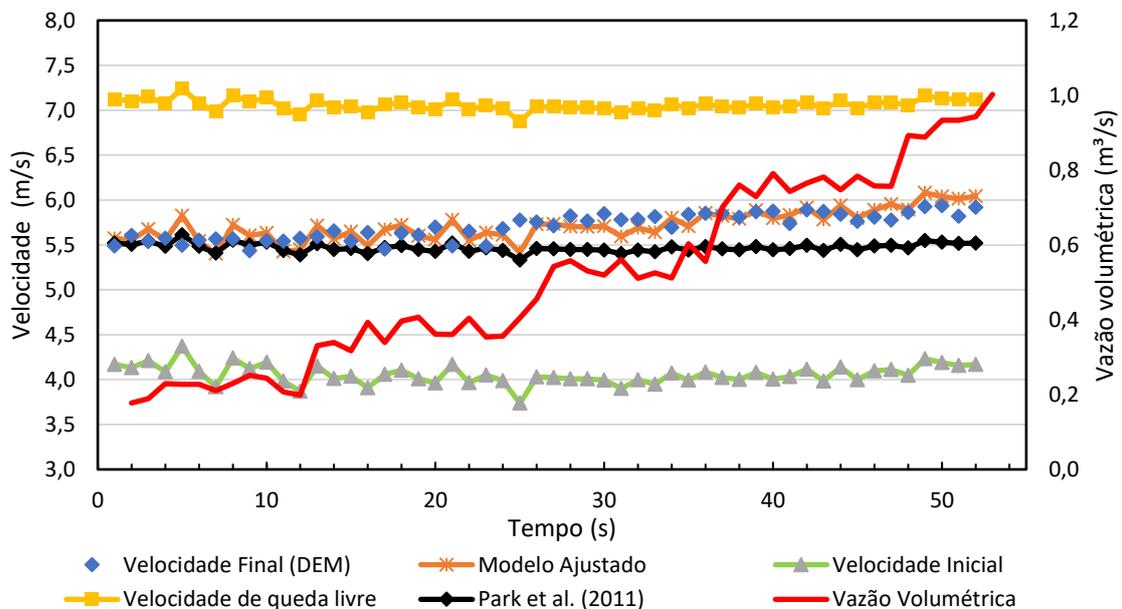


Figura 5.52 - Correção do modelo de escoamento no *feeder spout* V_{2v} (linha preta) em relação ao modelo ajustado V_{2vmod} (linha laranja) demonstrado na equação 5.1.

Na Figura 5.53 verifica-se a diferença de velocidade na saída da calha, calculada a partir da equação 5.1 para $Q=0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ subtraído da mesma equação considerando a vazão $Q=0,4 \text{ m}^3/\text{s}$. observa-se que a mudança na vazão se torna mais importante à medida que o ângulo da calha diminui.

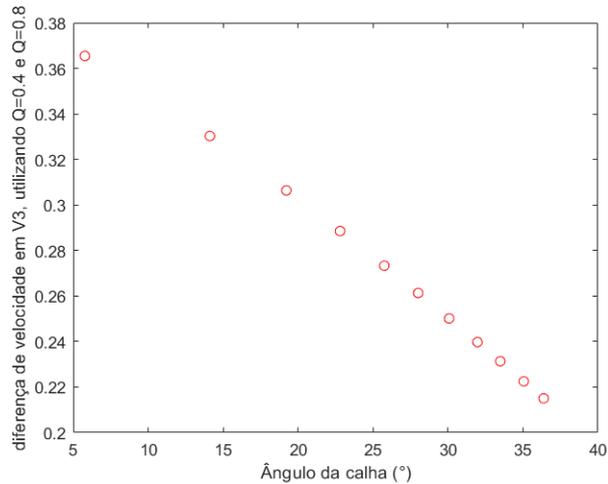


Figura 5.53 - Variação da velocidade na saída para $Q=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q=0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ em função do ângulo da ponta da calha em relação ao centro do alto-forno.

A partir do valor da velocidade de saída do *feeder spout* e da equação 3.16 é possível calcular a trajetória corrigida das partículas, considerando a velocidade de chegada na calha rotativa igual à velocidade de saída do *feeder spout* e a velocidade de saída da calha definida pela equação 3.17, que será detalhada mais adequadamente na próxima secção.

5.3.2 Cálculo das trajetórias e modelo de empilhamento

Para o ajuste do cálculo da trajetória do modelo fenomenológico, foram analisadas as trajetórias calculadas pelo modelo em DEM e pós-processadas no Matlab[®] 2015 com o intuito de gerar uma descrição da trajetória das partículas em duas dimensões, ou seja, em função do raio do alto-forno e da coordenada vertical z . Para determinar a posição média de alcance das partículas, foi extraída da simulação DEM a distribuição de posições radiais a uma altura equivalente à 1,19 m abaixo do ponto zero do *stockline*. Os perfis que identificam as trajetórias das partículas para cada posição da calha em três carregamentos do alto-forno diferentes são apresentados na Figura 5.54, Figura 5.55 e Figura 5.56, que representam a trajetória das descargas das simulações dos casos D6, D5 e D8, respectivamente.

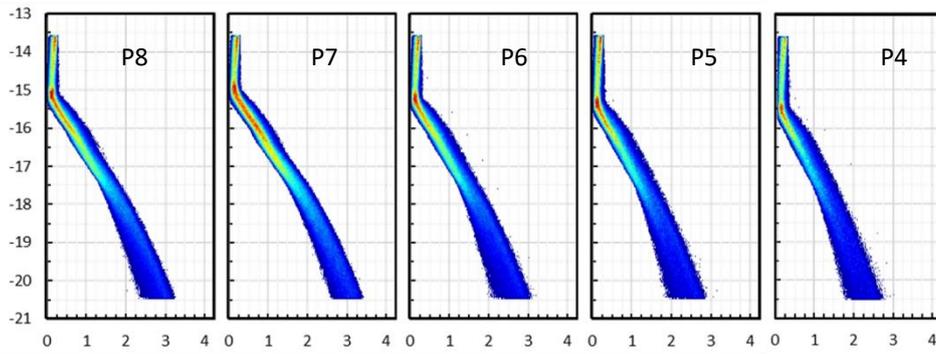


Figura 5.54 - Trajetórias para as posições da calha para o D6.

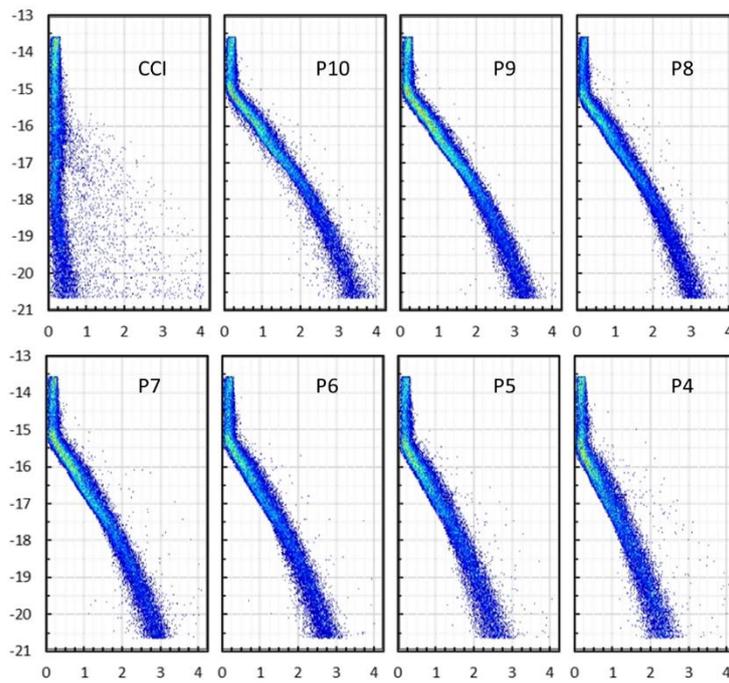


Figura 5.55 - Trajetórias para as posições da calha para o D5.

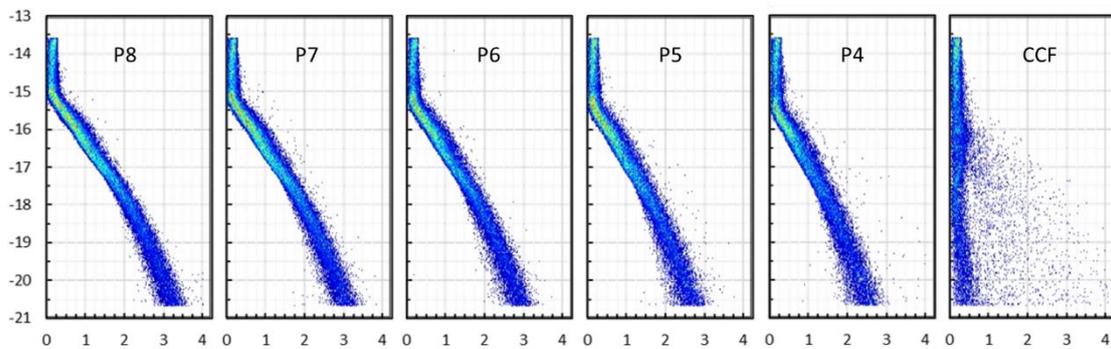


Figura 5.56 - Trajetórias para as posições da calha para D8

Na Figura 5.54, Figura 5.55 e Figura 5.56, o eixo horizontal representa a posição radial em metros da garganta do alto-forno, enquanto o eixo vertical representa em metros a posição expressa em coordenadas do sistema implementado no DEM. No caso, o ponto zero da *stockline* que está 0,8 m abaixo da extremidade da calha quando posicionada no centro equivale ao ponto -19,91 m, no eixo horizontal o 0,00 m representa o centro do alto-forno e em 4,25 m se encontra o final do raio da garganta.

No conjunto da Figura 5.54, Figura 5.55 e Figura 5.56, as cores quentes representam uma maior densidade de partículas, nas quais é de se esperar que haja uma maior concentração delas na própria calha. Com relação ao carregamento na posição central, presente no carregamento de coque, nota-se que há uma maior dispersão de partículas. Isso ocorreu devido às colisões das partículas com a barra estrutural da calha rotativa e pode ser observado nos casos D5 e D8.

As medianas das distribuições de massa na coordenada vertical $z = -20,40$ m, ou seja, 1,29 m abaixo da *stockline* para cada uma das posições da calha e carregamentos podem ser observadas na Figura 5.57. Os resultados mostraram que a trajetória das partículas independe do tipo de sequência de movimentação da calha, haja visto os pontos coincidentes para os resultados do caso D5 e D8 (CCF). No caso da carga metálica (caso D6), para as cinco posições da calha utilizadas, observou-se um ligeiro aumento no alcance das partículas para ângulos da calha maiores que 27 graus.

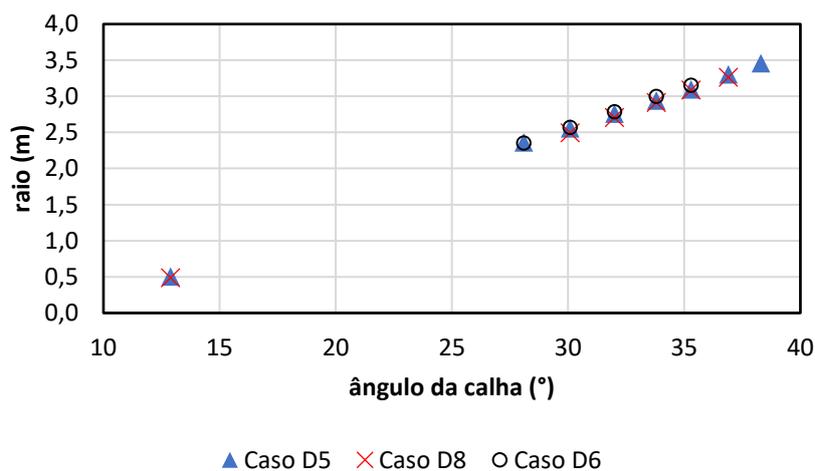


Figura 5.57 - Mediana das distribuições mássicas radiais no carregamento em função do tipo de material e ângulo da calha

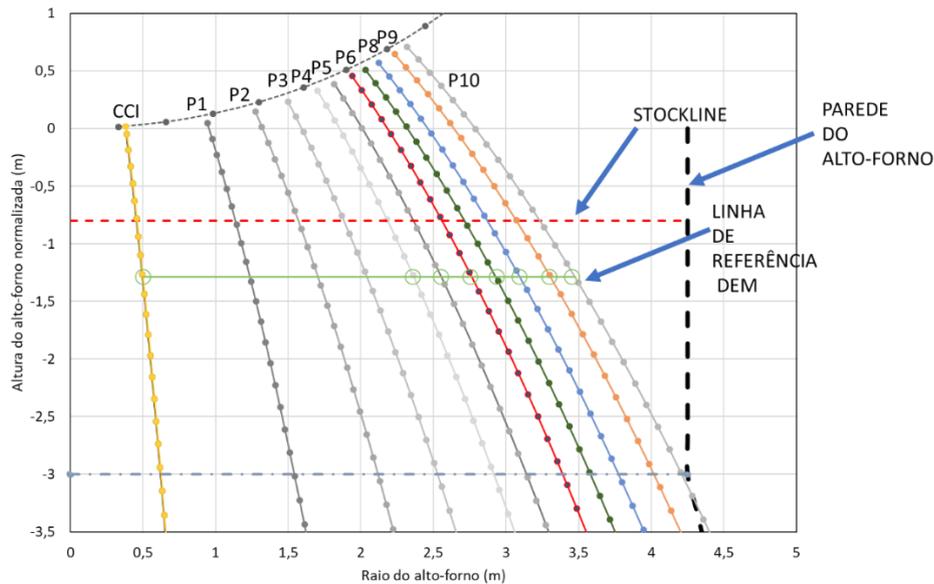


Figura 5.58 - Trajetórias das partículas calculadas a partir do modelo fenomenológico modificado de Park *et al.* (2011) e comparação com ponto de referência nas trajetórias obtidas das simulações em DEM.

A partir do modelo ajustado com os ângulos definidos pela trajetória do DEM calculou-se os parâmetros do modelo utilizando o algoritmo apresentado na Figura 3.14 gerando o perfil de distribuição mássica dos materiais, o carregamento de coque pode ser observado na Figura 5.62, enquanto o perfil formado na distribuição da carga metálica pode ser observado na Figura 5.59.

No perfil formado pela descarga do coque o centro de massa das partículas empilhadas está localizado a uma distância de aproximadamente 0,5 m do centro do alto-forno. Pode-se verificar que isso ocorre devido à limitação em inclinar a calha rotativa a ângulos inferiores a 12,9, sem que as partículas colidam contra o travessão da calha. Desta forma, como o cálculo leva em consideração o centro de massa e não o leque para calcular o pico da pilha, o resultado é um pequeno deslocamento na posição de carregamento do coque central.

A etapa final do modelo de empilhamento de Park *et al.* (2011) modificado, é encontrar os valores da constante C da equação 3.23 e equação 3.24, para o carregamento metálico e o de coque. Esta etapa foi realizada comparando-se os resultados do modelo de empilhamento com a projeção das distribuições mássicas no plano R-Z, obtidos pelas

simulações DEM dos casos D5 e D6 respectivamente. Os valores de C encontrados foram respectivamente 2,35 para o carregamento metálico e 3,0 para o carregamento de coque.

Os resultados finais do modelo de empilhamento são reportados na Figura 5.59 e na Figura 5.62, que apresentam as trajetórias das partículas em cada posição, as linhas que representam as pilhas formadas em cada volta da calha e ainda, no plano de fundo, a distribuição mássica das partículas em cada carregamento.

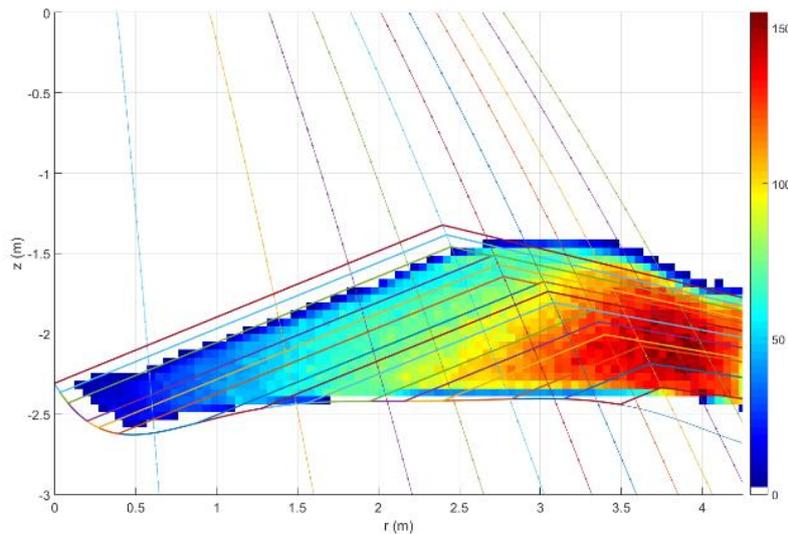


Figura 5.59 - Perfil formado pelo modelo fenomenológico na distribuição da carga metálica comparado a sua respectiva simulação DEM (Caso D6)

Para a determinação do perfil do modelo fenomenológico, o algoritmo desenvolvido reproduz pequenos passos de integração até se determinar o perfil de cada volta, podendo ser visto na Figura 5.60 as etapas de construção desse perfil. Na Figura 5.61 observa-se o perfil finalizado após completar todos os passos de integração. O modelo segue os seguintes passos:

1. Determina o ponto de encontro entre o perfil base e a curva de trajetória.
2. Faz um incremento de volume Δh (pacote), e encontra os ângulos ϑ_p e β_p .
3. Atualiza o leito base e verifica se o volume distribuído é maior que o volume da volta no respectivo ângulo; caso o volume seja menor, volta ao passo 1 e caso atinja a condição de controle passa para o passo 4.
4. Verifica se existe mais alguma volta a ser distribuída; caso positivo volta ao passo 1, se negativo atualiza o leito e finaliza o perfil.

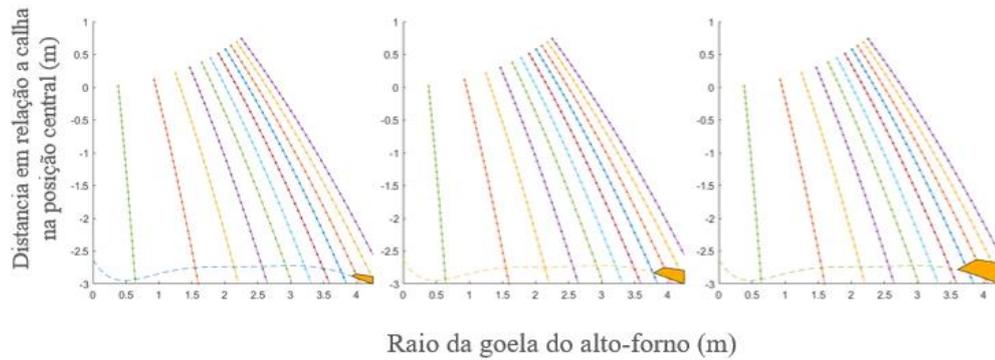


Figura 5.60 - Passos de atualização do perfil: à esquerda representa a integração de 10 passos com incremento Δh , no centro 18 passos de integração e a direita com 30 passos de integração representando todo volume carregado na volta.

O ponto positivo dessa estratégia é que o ponto de empilhamento acompanha o ponto de impacto, já que este é atualizado a cada passo de integração.

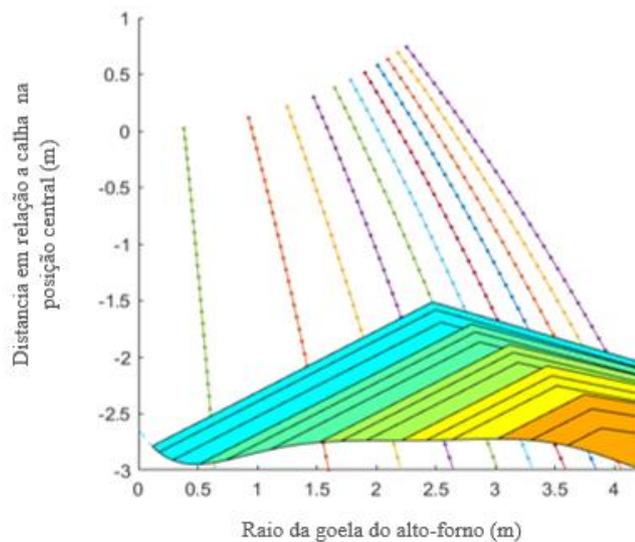


Figura 5.61 - Perfil carregado. Cada volta é representada por um contorno preto e cada posição da calha rotativa é representada por uma cor (laranja, amarelo, verde claro, verde escuro e azul)

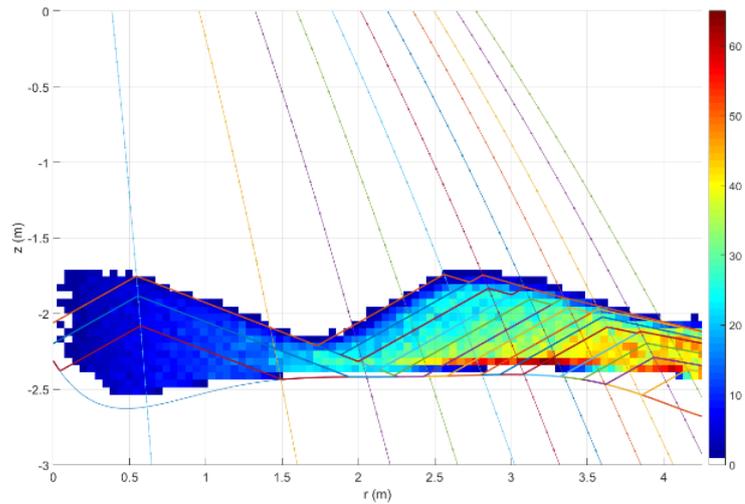


Figura 5.62 - Perfil de carregamento obtido com o modelo fenomenológico na distribuição da carga de coque comparado a sua respectiva simulação DEM (Caso D5)

No caso do coque, o modelo de integração segue o mesmo procedimento apresentado para a carga metálica; porem para ângulos de calha menores que 5° , considera-se o ângulo interno ϑ_p igual a β_p .

O pico gerado pela aplicação do modelo no carregamento metálico apresentou um leve desvio em direção ao centro do forno. Isso pode ser explicado pela diferença na densidade aparente considerada no modelo fenomenológico, no qual foi mantido o valor de referência da usina, que é 2300 kg/m^3 .

6 CONCLUSÃO

Foi possível verificar a validade dos parâmetros do modelo de contato usados nas simulações com o método dos elementos discretos, onde verificou-se que os parâmetros utilizados são adequados para a simulação do processo de carregamento do alto-forno. Entretanto, há margem para refinamento desses parâmetros, sendo interessante a realização de experimentos de calibração em larga escala, por exemplo, diretamente no pátio da usina.

A geometria do topo do alto-forno implementada em ambiente tridimensional, em escala real, mostrou-se apropriada para a realização das simulações computacionais com o método dos elementos discretos, obtendo bons resultados em relação ao custo computacional.

Os estudos de caso mostraram que é possível simular o carregamento de coque com partículas em escala real. A simulação do caso de carregamento comprovou que o coque externo, que deve ser preferencialmente alimentado na periferia do topo do alto-forno, foi de fato carregado nesta região para o modelo de carregamento C1 com algoritmo de movimentação A e B. Caso seja utilizado o algoritmo de movimentação C o centro do alto-forno será alimentado com coque de pior qualidade podendo trazer complicações operacionais.

As simulações de carregamento da carga metálica demandaram um tempo de simulação elevado, cerca de 200 horas para o enchimento e posterior descarregamento do *hopper*. Mesmo assim, a estratégia de se utilizar partículas escalonadas em 1,5 vezes seu tamanho real se mostrou adequada, possibilitando analisar comportamentos como distribuição mássica radial e efeitos de mistura.

O modelo de empilhamento modificado de Park *et al.* (2011), foi ajustado de modo a reproduzir o empilhamento observado nas simulações DEM em escala real. É possível, através do modelo modificado, descrever o empilhamento de cada volta da calha e fornecer de maneira imediata, portanto, informações sobre o carregamento das matérias-primas no alto-forno.

A descarga dos *hoppers* mostraram o efeito de mistura e perfil de escoamento no equipamento, fornecendo informações detalhadas do momento de descarga de cada material no seu interior em função do algoritmo de enchimento.

As simulações combinadas evidenciaram o efeito de *push coke*, ou seja, a carga metálica carregada sobre coque foi capaz de deslocar as partículas de coque em direção ao centro do alto-forno. A quantificação da carga mista também foi possível, e pode-se definir com simulações complementares os ajustes necessários para sua redução, como por exemplo, o ajuste no tamanho do coque e redução de pelota em contato com o leito de coque.

Recomendações finais:

1. Como foi observado nas simulações realizadas, o perfil de distribuição utilizado resultou na concentração de minério na região intermediária. Dessa forma recomenda-se o espalhamento da carga metálica, especialmente durante a redução de coque *rate* devido ao aumento da espessura da camada de minério. Essa ação pode ser acompanhada com a movimentação do coque para evitar sua redução excessiva na parede devido ao efeito *push coke*.
2. Uma avaliação adicional pode ser feita com a redução do diâmetro máximo do coque para minimizar o efeito de carga mista, pois nas simulações com DEM, observou-se uma penetração elevada de metálicos na camada de coque.
3. O carregamento via CCF se mostrou mais eficaz em caso de elevada confiabilidade no sistema de carregamento e elevada qualidade do coque externo, pois com o adequado controle desses fatores o CCF tem vantagem em reduzir a carga mista e carregar um coque de maior diâmetro no centro do alto-forno.

7 BIBLIOGRAFIA

- ADEMA, A. T., Y. YANG, e R. BOOM. “Discrete Element Method-Computational Fluid Dynamic Simulation of the Materials Flow in an Iron-making Blast Furnace.” *ISIJ International*, 2010: 954-961.
- Ananthanarayanan P.S., Balachandran G., Balasubramanian N., Thomas B., Birat J., Blanpain B., Chakraborty S., Chychko A., Daigo I., Davenport W. G., Rauf H. E., Michael L. F., Govind S. G., Lauri H., Hun R. “Treatise on Process Metallurgy.” *Elsevier*, 2014: 23-30.
- ARIYAMA, T., et al. “Influence of Blast Furnace Inner Volume on Solid Flow and Stress Distribution by Three Dimensional Discrete Element Method.” 2010: 946–953.
- . “Recent Progress on Advanced Blast Furnace Mathematical Models Based on Discrete Method.” 2014: 1457-1471.
- AUSTIN, P. R., H. NOGAMI, e J. Yagi. *ISIJ International*, 1997: 458.
- Brasil, Instituto Aço. *10ª edição do Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço*. Rio de Janeiro: Instituto aço Brasil, 2017.
- BURTEAUX, M. “Métaux ferreux : élaboration du métal primaire.” 1992.
- CARVALHO, R. M. *Métodos dos elementos discretos, Notas de aula*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- CARVALHO, R. M., B. SILVA, A. HIRANO, e B. Lima. “Avaliação da influência do desgaste da calha torativa na distribuição de carga do alto-forno.” *Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração*, 2017.
- CARVALHO, R. M., B. Silva, L. M. Tavares, e E. R. Cunha. “SIMULATION OF BURDEN CHARGING IN A BLAST-FURNACE EQUIPPED WITH A BELL-LESS TOP SYSTEM USING DISCRETE ELEMENT METHOD.” *8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking*, 2018.
- CUNDALL, P. A. “A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock.” *Znt. Sot. Rock Mech.*, 1971: 8.
- CUNDALL, P. A., e O. D. L. STRACK. “A discrete numerical model for granular assemblies.” *Gdotecanique*, 1979: 47-65.
- DEFENDI, G. “Caracterização da cinética de reação e comportamento das cinzas dos carvões minerais injetados no alto-forno.” *Escola de Engenharia da UFMG*, 2006: 9.

- DEM Solutions. “EDEM 2.6 Theory Reference Guide.” 2014.
- FUJIHARA, F., F. CUNHA, G. GUSHIKEN, e J. SILVA. “Revisitando o diagrama de rist.” 2015.
- Geerdes, M. *Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction*. Amsterdam: 3rd Edition, IOS Press, 2015.
- . *Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction*. Amsterdam: 2nd Edition, IOS Press, 2009.
- GOES, M. A., M. V. POSSA, e A. B. LUZ. *AMOSTRAGEM DE MINÉRIOS*. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 1991.
- HATTORI, M., B. IINO, A. SHIMOMURA, H. TSUKIJI, e T. ARIYAMA. “Development of Burden Distribution Simulation Model for Bell-Less Top in a Large Blast Furnace and Its Application.” *ISIJ International*, 1993: Vol. 33, pp. 1070-1077.
- Instituto Aço Brasil. *11ª edição do Relatório de Sustentabilidade da indústria brasileira do aço*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018.
- JOHN A.,W.; Rob S., D. “Contact Between Solid Surfaces.” Em *Modern Tribology Handbook*. 2000.
- KANBARA, K.; Hagiwara, T.; Shigemi, A.; Kondo, S.; Kanayama, Y.; Wakabayashi, K.; Hiramoto, N. “Dissection of Blast Furnaces and Their Inside State.” 1976: 535-546.
- LIMA, B. R. *SIMULAÇÃO DO CARREGAMENTO DO ALTO FORNO DOTADO DE UM SISTEMA BELL LESS TOP® USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)*. Rio de Janeiro: Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Materiais., 2016.
- Manual de operação, Paul Wurth. *Manual de operação dos equipamentos do topo*. Rio de Janeiro: Paul Wurth, 2010.
- MINDLIN, R.; DERESIEWICZ, H. “Elastic spheres in contact under varying oblique forces.” *Journal of Applied Mechanics*, 1953: v. 20, pp. 327–344.
- MITRA, T. *Modeling of burden distribuion in the blast furnace*. Finland: Faculty os science and engineering, 2016.

- MITRA, T., e H. SAXÉN. “Investigation of coke collapse in the blast furnace using mathematical modeling and small scale experiments.” 2016: 1570-1579.
- MONTELLANO, C., A. RAMIREZ, E. GALLEGOS, e F. AYUGA. “Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos.” *Chemical Engineering Science*, 2011: 116-126.
- NAITO, M., K. TAKEDA, Y. MATSUI, e Naito. “Ironmaking Technology for the Last 100 Years: Deployment to Advanced Technologies from Introduction of Technological Know-how, and Evolution to Next-generation Process.” 2015: 7-35.
- Narita, Y, H Mio, T Orimoto, e S Nomura. “Modelling of coke layer collapse during ore charging in ironmaking blast furnace by DEM.” 2018: 10-13.
- PARK, S., H. JUNG, M. JO, H. Oh, e J. Han. “Mathematical Modeling of the Burden Distribution in the Blast Furnace Shaft.” 2011: Vol. 17, pp. 485-496.
- Paul Wurth. 11 de 09 de 2018. <http://www.paulwurth.com/Our-Activities/Ironmaking/Blast-Furnace-Top-Charging-Technology>.
- PEACEY, J. G., e W. G. DEVENPORT. “The iron blast furnace : theory and practice.” *Pergamon Press*, 1979.
- POTAPOV, A., e C. CAMBELL. “Parametric dependence of particle breakage mechanisms.” *Powder Technology*, 2011: 164-174.
- RADHAKRISHNAN, V. R., e K. M. RAM. “Mathematical model for predictive control of the bell-less top charging system of a blast furnace.” *Elsevier*, 2001: 565-586.
- RIST, A. “Analogue Diagrams for Process Metallurgists.” *ISIJ Internacional*, 1992: 1034-1043.
- RIST, A., e N. MEYSSON. “Recherche graphique de la mise on mille minimale du haut fourneau a faible temperature du vent.” 1964.
- RIZZO, E. M. *Processo de fabricação de ferro gusa em alto-forno*. São Paulo: ABM, 2009.
- SANTOS, E. T. *Avaliação da drenagem de líquidos do cadinho*. Ouro Preto: REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - UFOP, 2009.
- SHI, P., P. ZHOU, D. FU, e C. Q. ZHOU. “Mathematical model for burden distribution in blast furnace.” *Maney on behalf of the institute*, 2015.
- SUGIYAMA, T., e M. SUGATA. “Seitetsu kenkyu.” *ISIJ*, 1987: 325.
- TAKATANI, T., e Y. UJISAWA. *ISIJ*, 1999: 19.

- TAVARES, L. M., e R. M. CARVALHO. “Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics.” *International*, 2012: 112-113.
- XU, W., S. CHENG, Q. NIU, e G. ZHAO. “Effect of the Main Feeding Belt Position on Burden Distribution during the Charging Process of Bell-less Top Blast Furnace.” *Powder Technology*, 2018, 328 ed.
- XU, Y., et al. “Quantitative comparison of binary particle mass and size segregation between serial and parallel type hoppers of blast furnace bell-less top charging system.” *Elsevier*, 2018: 245-255.
- YAGI, J., e I. MUCHI. “Theoretical Estimations on the Longitudinal Distribution of Process Variables in Blast Furnace and on its Productivity.” *Trans. Iron & Steel Inst. Japão*, 1970: 392-405.
- YAN, Z., S. K. SILKINSON, E. H. STITT, e M. MARIGO. “Discrete element modelling (DEM) input parameters: Understanding their impact on model predictions using statical analysis.” *Springer*, 2015: 283-299.