



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG



Dissertação de Mestrado

“Modelamento Físico e Numérico do Coal Bunker”



Autor: Iara Patrícia Vieira de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Coorientadores: Prof. Dr. Américo Tristão Bernardes

Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Abril de 2022



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Iara Patrícia Vieira de Oliveira

“Modelamento Físico e Numérico do Coal Bunker”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Coorientadores: Prof. Dr. Américo Tristão Bernardes

Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Ouro Preto, Abril de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48m Oliveira, Iara Patricia Vieira de.
Modelamento físico e numérico do Coal Bunker. [manuscrito] / Iara Patricia Vieira de Oliveira. - 2022.
122 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Coorientadores: Prof. Dr. Américo Tristão Bernardes, Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio Silva.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. carvão. 2. modelo físico. 3. modelo computacional. 4. método dos elementos discretos. 5. Coal Bunker. I. Assis, Paulo Santos. II. Bernardes, Américo Tristão. III. Silva, Guilherme Liziero Ruggio. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 620

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Iara Patrícia Vieira de Oliveira

Modelamento físico e numérico do Coal-Bunker

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Materiais

Aprovada em 08 de abril de 2022.

Membros da banca

Prof. Dr. Ing. Paulo Santos Assis - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Carlos Roberto Ferreira - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco
Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco
Prof. Dr. Jorge Luiz Brescia Murta - Universidade Federal de Ouro Preto

O Prof. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 11/04/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUACÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**, em 22/03/2022, às 14:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0297823** e o código CRC **762291D3**.

AGRADECIMENTOS

A Deus minha imensa fonte de força e inspiração.

A minha mãe, Izildinha e ao meu pai Geraldo, sinônimo de amor, dedicação e cuidado.

Aos meus irmãos, Daniela e Ronan, pelo carinho, apoio e por se fazerem sempre presentes em minha vida.

A toda a minha família em especial a tia Gracinha, o tio Valtair e aos meus primos Rafael, Renata e Cássio, pelos momentos juntos em família.

Ao orientador Dr. Paulo Santos Assis, por todo o apoio, orientação acadêmica e sugestões de melhorias deste projeto.

Ao coorientador, Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva, pela confiança depositada para o desenvolvimento deste projeto, pelas muitas oportunidades de crescimento profissional e pessoal, e por todo o conhecimento compartilhado ao longo da minha graduação, estágio e mestrado.

Ao coorientador, Dr. Américo Tristão Bernardes, exemplo de profissional e pessoa. Meu muito obrigada pelo apoio, incentivo, paciência, dedicação, entusiasmo, pelas discussões técnicas e conselhos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, minha sincera gratidão.

A Banca Examinadora formada pelos Doutores: Carlos Roberto Ferreira, Jorge Luiz Brescia Murta, Paulo Santos Assis e Guilherme Liziero Ruggio da Silva.

Ao professor Dr. Manuel Binelo pelas discussões e contribuições no desenvolvimento do modelo computacional.

À GERDAU Ouro Branco, em especial a equipe da Coqueria, do Laboratório de Matérias Primas e a Unidade Piloto da Coqueria, pelo apoio durante a execução dos experimentos.

Aos amigos da REDEMAT, Victor Eric, Camila, Bruna, Fabricia, em especial a Lorena, grande amiga de faculdade, estágio e mestrado. E finalmente a todos os outros que não foram citados aqui, mas certamente presentes em toda a trajetória.

À REDEMAT e a CAPES pelo fomento para a realização deste projeto.

Enfim, o meu muito obrigada aos bons e velhos amigos e a todos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada e torceram por mim.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1.	Objetivo Geral	4
2.2.	Objetivos Específicos	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Origem e Formação do Carvão	5
3.2	Cenário de Produção e o Mercado de Carvão Mineral	8
3.3	Rota do Carvão dentro da Siderurgia	11
3.4	Coal Bunker.....	14
3.5	Caracterização do Carvão Mineral	17
3.5.1	Umidade	17
3.5.2	Distribuição Granulométrica	20
3.5.3	Densidade	22
3.5.4	Densidade de carga.....	22
3.5.5	Porosidade	25
3.6	Características Gerais dos Silos	27
3.7	Tipos de Fluxo.....	29
3.7.1	Fluxo de Massa.....	29
3.7.2	Fluxo em Funil	30
3.7.3	Fluxo Misto	32
3.8	Modelo Físico do Elipsoide de Fluxo	33
3.9	Fenômenos de Instabilidade em Silos	34
3.9.1	Segregação	35
3.9.2	Formação de Arco	36
3.9.3	Formação de Túnel.....	38
3.9.4	Descarga Incompleta	39

3.9.5	Degradação Granulométrica.....	39
3.9.6	Fluxo Errático (ou transientes de fluxo).....	40
3.10	Aplicação da Modelagem para o Estudo do Fluxo Granular em Silos.	40
3.11	Modelo Físico.....	41
3.12	Modelo Numérico	42
3.13	Método dos Elementos Discretos	42
3.14	YADE.....	50
4	PARTE EXPERIMENTAL.....	53
4.1	Amostragem	54
4.2	Preparação e Composição das Amostras.....	55
4.3	Caracterização Física e Química da Mistura de Carvões	55
4.3.1	Teste de Umidade.....	56
4.3.2	Teste de Granulometria	56
4.3.3	Densidade de Carga.....	57
4.4	Modelo Físico.....	58
4.5	Sistema de Carregamento.....	61
4.6	Sistema de Descarregamento	61
4.7	Teste de Vazão Mássica no Modelo Físico	62
4.7.1	Teste de Vazão Mássica Variando a Distribuição Granulométrica.....	63
4.7.2	Teste de Vazão Mássica Variação a Altura da Coluna da Carga	64
4.7.3	Avaliação da Segregação por Tremonha.....	64
4.8	Modelo Numérico Computacional	64
4.8.1	Teste de Vazão Mássica no Modelo Numérico Computacional	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1	Caracterização do Carvão.....	68
5.1.1	Análise Granulométrica.....	68

5.1.2	Determinação da Densidade de Carga e sua Correlação com a Granulometria e a Umidade	68
5.2	Resultados do Teste de Vazão Mássica no Modelo Físico	70
5.2.1	Influência da Granulometria sob o Escoamento	71
5.2.2	Efeito da Altura da Coluna da Carga sob o Escoamento	73
5.2.3	Efeito da Segregação por Tremonha Individual.....	74
5.3	Resultados do Modelamento Numérico Computacional.....	76
5.3.1	Definição dos Parâmetros.....	76
5.3.2	Resultados do Teste de Fluxo no Modelo Computacional.....	77
5.4	Efeito do Atrito da Parede do Coal Bunker.....	78
6	CONCLUSÕES.....	81
7	SUGESTÕES OPERACIONAIS	83
8	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	85
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
10	ANEXO.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Transformação da matéria vegetal em carvão mineral	5
Figura 3.2: Distribuição das reservas de carvão provadas nos anos de 2000, 2010 e 2020.....	8
Figura 3.3: Aplicação dos diferentes tipos de carvões	9
Figura 3.4: Exportações totais de carvão pelos principais exportadores, 1978- 2020	10
Figura 3.5: Produção e consumo de carvão por região durante os ano de 1995 até 2020.	10
Figura 3.6: Rota do carvão desde recebimento até a produção de coque.....	12
Figura 3.7: Britador de martelos	13
Figura 3.8: Vista da Blending House e o sistema de dosagem das misturas de carvão.	14
Figura 3.9: Vista do Coal Bunker.....	15
Figura 3.10: Distribuidor rotativo	16
Figura 3.11 Comportas de abertura e fechamento das tremonhas.....	16
Figura 3.12: Diferentes formas da água associada ao carvão.	18
Figura 3.13: Migração de umidade no silo na estação: fria (esquerda), quente (direita).	19
Figura 3.14: Diagrama ilustrando as partículas de carvão, com diferentes tamanhos.	23
Figura 3.15: Efeito da granulometria e a formação de vazios.....	23
Figura 3.16: Influência do superfino na densidade da mistura	24
Figura 3.17: Efeito da umidade sobre a densidade de carga para diferentes tamanhos de carvão (1) 0-35 mm; (2) 0-20 mm; (3) 0-10 mm e (4) 0-3 mm.	25
Figura 3.18: Porosidade intergranular.	25
Figura 3.19: Influência da altura da queda na porosidade intergranular.....	26
Figura 3.20: Influência do arranjo das partículas.....	27
Figura 3.21: Diferentes formas geométricas para tremonhas e célula.	28
Figura 3.22: Silo unicelular (esquerda) e multicelular (direita).	28
Figura 3.23: Imagens da descarga do silo com fluxo de massa.	30
Figura 3.24: (a) Fluxo em funil: mixed flow (esquerda) e pipe flow (direita).....	31
Figura 3.25: Padrões de fluxo em silos do tipo misto.	33
Figura 3.26: Zonas de fluxo de sólidos	33
Figura 3.27: Elipsoide de movimento	34
Figura 3.28: Processo de segregação em pilhas de carvão e no bunker de carvão	36
Figura 3.29: Obstruções :(esquerda) arco mecânico e (direita) arco coesivo	37
Figura 3.30: Formação de arco do tipo “ponte” (esquerda) e abóboda ou domo (direita).....	38

Figura 3.31: Formação de túnel.....	39
Figura 3.32: Descarga incompleta.....	39
Figura 3.33: Fluxo errático.....	40
Figura 3.34: Modelo numérico experimental desenvolvido no software PFC2D.....	44
Figura 3.35: Movimentação das camadas de matérias-primas durante a descarga de um silo	45
Figura 3.36: Imagens da simulação do carregamento do alto-forno utilizando o MED no software EDEM subdivididas em três etapas: 1) alimentação do silo; 2) carregamento do silo; 3) descarregamento do silo e carregamento do alto-forno.	46
Figura 3.37: Exemplo de simulação computacional de material granular, pelo MED, onde é mostrado um exemplo da cadeia de transmissão de esforço entre as partículas	47
Figura 3.38: Exemplo do efeito arco, e sua obstrução ao fluxo de material granular, simulado pelo MED	48
Figura 3.39: Ciclo de cálculos do MED.....	49
Figura 4.1: Fluxograma simplificado das etapas experimentais	53
Figura 4.2: Ilustra a etapa de preparação da amostra após o seu recebimento.....	55
Figura 4.3: Granulometria das amostras de 65% e 85% < 2,83 mm.....	57
Figura 4.4: Ensaio de densidade da mistura de carvão	58
Figura 4.5: Modelo 3D criado no software Fusion	59
Figura 4.6: Impressão do modelo físico em impressora 3D.....	59
Figura 4.7: Modelo físico impresso.....	60
Figura 4.8: Sistema de carregamento, mini correia transportadora.....	61
Figura 4.9: Sistema descarregamento.....	62
Figura 4.10: Teste de fluxo no modelo físico.....	63
Figura 4.11: Parâmetros modelo computacional.....	65
Figura 4.12: Modelo computacional no Yade.....	67
Figura 5.1: Curva de Distribuição Normal da Mistura de Carvão	68
Figura 5.2: Resultado dos testes de densidade variando a umidade e a granulometria.....	69
Figura 5.3: Influência da granulometria sob o escoamento	71
Figura 5.4: Influência da altura da coluna da carga	74
Figura 5.5: Segregação por tremonha: centrais (2 e 3); próxima a parede (1 e 4).....	75
Figura 5.6: Comparativo entre modelo físico e computacional	77
Figura 5.7: Perfil de escoamento da carga	79
Figura 5.8: Efeito do atrito na parede do silo: modelo físico, modelo computacional.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Variação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas do carvão de acordo com o grau de carbonização	7
Tabela 3-2: Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas.....	21
Tabela 3-3: Classificação dos silos	28
Tabela 4.1: Composição das amostras	55
Tabela 5.1: Revisão dos parâmetros operacionais do Coal Bunker	83

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT 6922 - Determinação da Massa Específica – Densidade a Granel

ASTM - American Society for Testing and Materials

ASTM D2234 - Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal

ASTM D3302 - Test Method for Total Moisture in Coal

ASTM D4749 - Test Method for Performing the Sieve Analysis of Coal and Designating Coal Size

BP- British Petroleum - Statistical Review Of World Energy

CFD - Computational Fluids Dynamics

GPL- General Public License

HGI - Hardgrove Index

IEA- International Energy Agency

LGM - Lattice Geometric Model

MDF - Medium Density Fiberboard

MED- Método dos Elementos Discretos

MEF- Métodos dos Elementos Finitos

PCI- Pulverized Coal Injection

PLA - Ácido Polilático

Pvg - Pressão de Vapor Interna

Pva - Pressão de Vapor do Ar

SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

YADE - Yet Another Dynamic Engine

RESUMO

Conhecer o comportamento do fluxo granular da mistura de carvões no interior dos silos é fundamental, pois irregularidades durante o carregamento e o descarregamento podem impactar diretamente na produtividade e, em alguns casos mais extremos, na interrupção completa ou parcial do fluxo, impactando diretamente na operação dos fornos de coqueificação. O *Coal Bunker* tem um papel fundamental para uma operação estável e contribui diretamente com a competitividade e estabilidade operacional das coquearias. Portanto, este trabalho propõe o modelamento do fluxo granular da mistura de carvões no *Coal Bunker*, por meio de duas abordagens distintas: um modelo experimental em escala reduzida; e um modelo numérico computacional utilizando o método dos elementos discretos (MED), implementado no código comercial YADE. O modelo virtual reproduziu todas as características e condições do aparato experimental. Os dados gerados a partir dos testes no modelo físico foram utilizados para a validação do modelo computacional. Nos dois modelamentos foram avaliados a vazão mássica durante a descarga, o perfil de escoamento da carga, o efeito do atrito nas paredes do silo, a presença da segregação e a influência de algumas propriedades do carvão no fluxo granular, como: granulometria, umidade e densidade de carga. Apesar da modelagem do fluxo granular sob condições de carregamento e descarregamento ser um problema difícil de ser modelado, dada a natureza discreta do meio, o MED se mostrou uma excelente ferramenta e modelou corretamente o fluxo da mistura de carvões no *Coal Bunker*. Os resultados mostraram que a capacidade dos modelos físico e computacional, de prever o comportamento do fluxo da mistura de carvões no silo, foi satisfatório. Os resultados obtidos das simulações concordam com os experimentos não apenas sobre a vazão mássica, mas também sobre os padrões de escoamento da carga ao longo do processo de descarga. Foi identificado um mecanismo de segregação granulométrica no interior do silo, no qual foi observado uma ligeira maior presença de finos nas tremonhas centrais. Em se tratando da influência da altura da coluna da carga sob o escoamento, o mais indicado é trabalhar com o silo a uma capacidade superior a 80 % do volume total, atingindo uma maior vazão mássica. Os resultados, tanto no modelo físico quanto no computacional, apontam que as partículas têm distintas velocidades verticais, devido a ação do atrito, resultando em diferentes tempos de permanência no silo e não uniformidade no descarregamento da carga.

Palavras-chave: carvão, modelo físico, modelo computacional, método dos elementos discretos, *Coal Bunker*

ABSTRACT

Knowing the behavior of a granular flow of the coal mixture in the silo is essential, as irregularities during loading and partial unloading can directly impact productivity, and, in some cases, the complete interruption of the flow, directly impacting operation of coking ovens. The Coal Bunker plays a key role in a stable operation and directly contributes to the competitiveness and operational stability of the coke plants. In this work, we modeled the granular flow of the fuel mixture in the Coal-Bunker from two different approaches: an experimental model in reduced scale; and a computational numerical model using the discrete element method, implemented in YADE commercial code. The data generated from the tests in the physical model were used in the validation of the computational model. The simulation model reproduced all the characteristics and conditions of the experimental apparatus. In the two approaches, one has evaluated the mass flow rate during unloading, the effect of friction on the silo walls, the flowing profile, and the influence of some properties of the coal on the granular flow: granulometry, humidity, load density. Although modeling a granular flow under loading and unloading conditions is a difficult task, given the discrete nature of the medium, it was shown that these complementary approaches correctly modeled the flow of the coal mixture in the Coal Bunker. The models allowed to preview the behavior of the mixture. The possible functioning of the physical properties of coal has been evaluated, as well as their effects under loading. A mechanism of granulometric segregation was identified inside the silo, in which a slight presence of fines was observed in the central hoppers. In terms of the influence of the height of the load column on the flow, the most suitable is to work with the silo with a minimum capacity of 80% of its total volume, achieving a higher mass flow. The results, both in the physical and in the computational model, indicate that the particles have different vertical speeds, due to the action of friction, resulting in different duration times in the silo and non-uniformity in the burden loading.

Keywords: coal, physical model, computational model, discrete element method, Coal Bunker

1 INTRODUÇÃO

Os materiais granulares não se enquadram perfeitamente em nenhum modelo mecânico de comportamento, seja sólidos ou fluidos, devido ao comportamento mecânico bastante complexo. Para alguns autores, trata-se de outro estado da matéria com modelos mecânicos e constitutivos específicos (LOPES, 2015). Devido a isso, existe uma grande dificuldade em prever o comportamento dos materiais granulares, pois podem apresentar comportamento semelhante ao de um sólido ou de um líquido, dependendo do tipo e da intensidade das tensões aplicadas, da distribuição granulométrica e da presença ou não de água. (CROSTA et al., 2001).

Os materiais granulares podem se comportar como um sólido, quando são impostas deformações lentas ao material. Na situação em que o material é submetido a forte agitação, o meio é diluído e as partículas interagem através de colisões binárias, em analogia cinética com um gás, (SILVA, 2005). Entretanto o escoamento é usualmente denso, devido ao confinamento e à dissipação na forma de atrito e colisões. O material nesse regime é similar a um líquido, mas com reologia mais complexa. As massas de partículas sólidas não aglomerantes têm várias das propriedades de um fluido, com pressão nas laterais e nas paredes da geometria confinante e escoamento através de aberturas ou chutes, (MCCABE e SMITH, 1956).

As operações que envolvem o manuseio de materiais granulares aplicadas à siderurgia são bastante extensas. Vão desde o transporte em correias transportadoras, britagem, homogeneização em tambores rotativos, o carregamento e descarregamento em silos, até o carregamento de matérias primas na coqueria e no alto-forno.

Todo o processo que envolve o manuseio de materiais granulares é um fator condicionante das operações. O transporte, o armazenamento e o fluxo destes materiais são muitas vezes operações críticas de processos, como é o caso do *Coal Bunker*, silo no qual, comumente se faz o armazenamento temporário da mistura de carvões.

Diante do atual cenário das usinas integradas a coque, a garantia da competitividade das coquerias, depende de uma operação estável dos fornos de coqueificação. O carregamento destes fornos impacta diretamente na estabilidade operacional e na produção de um coque

com propriedades requeridas pelo alto-forno. Sendo que um carregamento inadequado e ineficiente pode acarretar em paradas não programadas na linha de produção. Um exemplo disso é quando ocorrem problemas de obstrução parcial ou total da carga, durante o descarregamento no *Coal Bunker*, impossibilitando o carregamento da mistura de carvões nos fornos de coqueificação.

Esta instabilidade operacional na coqueria pode impactar diretamente na vida útil dos fornos de coqueificação, haja visto que, uma vez iniciada a operação, não é indicado a interrupção da operação, pois cerca de 95% da estrutura é constituída de material refratário que opera em elevadas temperaturas.

Com isto, o *Coal Bunker* tem um papel fundamental para uma operação estável e impacta diretamente na competitividade da coqueria. De acordo com Silva (2015), o carvão contribui com cerca de 30 a 40% do custo da produção do aço, e uma operação estável do *Coal Bunker* pode contribuir com a produção de um coque com qualidade, estabilidade operacional e ganho de competitividade das siderúrgicas.

Para atingir uma maior eficiência no processo de carregamento e descarregamento, é necessário um controle mais preciso das variáveis que influenciam as condições de operação. Contudo o conhecimento a respeito ainda é muito limitado.

Portanto existe a necessidade do emprego de métodos de análise para o estudo do comportamento do fluxo granular durante o carregamento e descarregamento do *Coal Bunker*, como a aplicação da modelagem. O emprego de modelos de previsão que descrevam os fenômenos reais com precisão, são essenciais para o aumento da produtividade, redução de custos, aumento na segurança operacional, otimização e melhorias de processos.

A modelagem é utilizada para representar sistemas, objetos ou fenômenos, com a finalidade de auxiliar na compreensão do problema, seja nos aspectos quantitativos ou qualitativos. Esta aplicação vem se tornando cada vez mais comum no estudo do comportamento do fluxo granular em silos.

As características discretas do meio granular permitem a modelagem do comportamento complexo desse material, quando submetido ao carregamento e o descarregamento. Entre as técnicas de modelagem destacam-se a física e a numérica computacional.

A modelagem física depende da concepção de um protótipo em escala real ou reduzida, o qual será submetido a ensaios que refletem as condições mais próximas do real, a um custo relativamente baixo.

Na modelagem numérica computacional é desenvolvido um protótipo virtual a partir da aplicação de algoritmos, representado por um sistema de equações fundamentadas em uma teoria matemática. Este método se destaca pela capacidade de fornecer maior detalhamento sobre a movimentação das partículas. Existem diversos modelos numéricos, dentre eles destaca-se o Método dos Elementos Discretos (MED), muito utilizado por diversos pesquisadores em diferentes áreas, como a aplicação na agroindústria para o estudo do armazenamento de grãos em silos, como exemplo, o trabalho de Lima (2014), para o estudo da mecânica dos solos, pode ser citado o trabalho de Lopes (2015). Porém a aplicação do MED na indústria siderúrgica para o estudo de problemas relacionados ao manuseio, transporte e descarregamento de partículas em silos, ainda é muito recente, como o trabalho de Lima (2016), que simulou o processo de carregamento das diversas matérias primas no alto-forno.

O MED, desenvolvido por Cundall e Strack (1979), é um método de simulação numérica do movimento de um grande número de partículas dentro de um sistema fixo ou móvel variante no tempo. É baseado em um esquema numérico explícito no qual a interação das partículas é monitorada individualmente, e em cada contato o sistema é modelado através da segunda lei de Newton.

Dessa forma, a presente pesquisa visa avaliar o comportamento do fluxo granular da mistura de carvões no *Coal Bunker* por meio de duas abordagens distintas: a modelagem física e numérica computacional utilizando o método dos elementos discretos. Sabe-se que as propriedades físico-químicas das partículas dos materiais granulares influenciam no seu comportamento macroscópico. Sendo assim, foi avaliada a influência de algumas propriedades do carvão como: umidade, granulometria, densidade de carga, sob o descarregamento no silo.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

A presente dissertação tem como objetivo caracterizar o fluxo da mistura de carvões dentro do *Coal Bunker*, visando a estabilidade operacional dos fornos de coqueificação e ganho de competitividade da Coqueria.

2.2. Objetivos Específicos

- Efetuar a caracterização física e química da mistura de carvões disponível na Usina Gerdau Ouro Branco;
- Desenvolver um modelo físico em escala reduzida do *Coal Bunker*;
- Desenvolver a modelagem numérica computacional para o *Coal Bunker*;
- Validar o modelo computacional a partir dos dados gerados no modelo físico;
- Avaliar no fluxo da mistura de carvões, a influência de algumas propriedades do carvão como: umidade, granulometria, densidade de carga, sob o descarregamento no silo.
- Avaliar a existência da segregação da mistura de carvões nas tremonhas.
- Avaliação do efeito do atrito das partículas de carvões nas paredes do silo.
- Avaliar no fluxo da mistura de carvões a influência da altura da coluna da carga sob o escoamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão do estado da arte dos diversos aspectos abordados neste trabalho. Inicialmente, revisou-se a rota do carvão na siderurgia, desde a sua origem e formação até o seu consumo no *Coal Bunker*, foco de estudo deste trabalho, bem como algumas características e propriedades do carvão. Em seguida foi feito um estudo das características gerais dos silos e os principais problemas de interrupção de fluxo. Por fim, foi revisada a teoria dos Métodos dos Elementos Discretos e sua aplicação para o estudo do fluxo granular da mistura de carvão no descarregamento do *Coal Bunker*.

3.1 Origem e Formação do Carvão

O carvão mineral, rocha sedimentar passível de uso como combustível, é o resultado da decomposição de florestas, depois de milhões de anos, acompanhado da influência da temperatura e da pressão litostática.

Esta rocha tem origem dos detritos vegetais provenientes de troncos, folhas, raízes e outras partes das plantas, que foram soterrados ou recobertos por uma lâmina d'água na bacia de sedimentação, desta forma, ficam protegidos da ação do ar e do oxigênio. Com o passar do tempo, este material sofre ataque biológico das bactérias e outros microrganismos, que consomem a celulose e a lignina da madeira, se apropriando do oxigênio, da matéria nitrogenada e do fósforo. A Figura 3.1 ilustra o processo de transformação da matéria vegetal em carvão mineral.



Figura 3.1: Transformação da matéria vegetal em carvão mineral (ULHÔA, 2003)

O carvão mineral apresenta uma natureza bastante complexa e heterogênea. Segundo Speight (2013), a sua estrutura física e química depende da sua origem, maturidade e do ambiente geológico de sua formação.

A evolução da matéria orgânica pode ser dividida nas seguintes etapas: floresta, turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, semi-antracito, antracito e meta-antracito. Tanto a turfa quanto o linhito são considerados sedimentos, enquanto os outros estados são considerados rocha.

O soterramento e a compactação destes depósitos, promovem um aumento na pressão e na temperatura da matéria orgânica. A decomposição desta matéria sob diferentes condições de pressão, temperatura e tempo, progride para o processo denominado carbonização. Nesta etapa de conversão da matéria orgânica em carbono elementar, o material vegetal sofre mudanças físicas e químicas, como a redução dos teores de oxigênio, hidrogênio e do material volátil, aumento do teor de carbono e da reflectância da vitrinite, (COSTA et al., 2015). De acordo com a literatura, pode ser dividido em dois estágios.

O primeiro estágio é denominado carbonificação bioquímica, que trata das transformações que ocorrem desde a formação da turfeira até a obtenção do carvão betuminoso. Esta etapa consiste na degradação da matéria orgânica por bactérias aeróbicas, fungos e *actinomyces*, que digerem a celulose e transformam a lignina em ácido húmico e, posteriormente, gera compostos húmicos (FLORES, 2018). Conforme se tem um aumento da profundidade da turfeira, a ação do oxigênio vai se extinguindo, e as bactérias que antes eram aeróbicas, são substituídas pelas anaeróbicas, e a vida microbiana vai diminuindo progressivamente, até o passo que se torna nula. Com o aumento da compactação e o progresso das transformações bioquímicas, o material orgânico se torna gelificado (FLORES, 2014).

O estágio seguinte é denominado carbonificação geoquímica, que ocorre com a sedimentação e o soterramento do material. Ao passo que a matéria vai sendo soterrada, ocorrem mudanças progressivas e alterações na sua constituição físico-química, como: diminuição de hidrogênio e oxigênio, e conseqüentemente uma diminuição do teor de matéria volátil, principalmente na forma dos gases, CO₂, H₂O, NH₃ e CH₄, e um aumento da concentração de carbono. Estas modificações físico-química acontecem coordenadas pelos processos geológicos, tais como

temperatura (gradiente geotérmico), tempo de soterramento e pressão regional (OLIVEIRA, 2008).

Todo este processo de degradação e transformação, proporciona a formação de carvões com diferentes constituições e propriedades, que segundo Speight (2013) é composto basicamente por material orgânico e inorgânico, que se apresenta sob a forma de macerais, minerais discretos, elementos inorgânicos, água e gases contidos em poros submicroscópicos.

Em se tratando do ponto de vista molecular, conforme o processo de carbonização progride, é possível observar uma maior organização das cadeias de carbono, aumento do grau de aromaticidade da rede, o que implica na elevação do *rank* do carvão (BORREGO, 2013).

O grau de carbonização ou “*rank*” é determinado pelo grau de diagênese e/ou catagênese que o carvão foi submetido durante os processos geológicos. Os principais parâmetros para a determinação deste rank são: carbono fixo, teor de hidrogênio, poder calorífico, teor de umidade, e reflectância da vitrinita, (FLORES, 2014).

A Tabela 3.1 apresenta as diferentes concentrações de carbono, oxigênio e hidrogênio, bem como a variação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas do carvão, de acordo com os diferentes graus de carbonização.

Tabela 3-1: Variação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas do carvão de acordo com o grau de carbonização (ULHÔA, 2003).

Característica	Turfa	Linhito	Carvão Betuminoso	Antracito
Densidade (g/cm ³)	1	1 a 1,3	1,2 a 1,5	1,3 a 1,7
Carbono (%)	55	65 a 75	75 a 90	90 a 95
Hidrogênio (%)	6	5	4,5 a 5,5	2 a 5
Oxigênio (%)	33	25	3 a 11	4 a 11
Matéria Volátil (%)	60	40	14 a 38	2 a 14
Carbono Fixo (%)	25	35	25 a 80	90
Poder calorífico (cal/g)	4000 a 5700	Até 5700	5700 a 9600	8200 a 9200
Poder refletor (vitrinita)	-	0,5	0,5 a 1,8	2,2

Uma elevação do grau de carbonização origina um enriquecimento relativo do teor de carbono, uma elevação do poder calorífico e uma diminuição dos teores de oxigênio, hidrogênio, matéria volátil e umidade higroscópica (OLIVEIRA, 2008).

3.2 Cenário de Produção e o Mercado de Carvão Mineral

As principais aplicações para o carvão mineral são nos setores termoelétrico e metalúrgico, sendo que para o uso na geração de energia, o estágio mínimo do carvão é o linhito. Já as siderúrgicas utilizam os carvões coqueificáveis de alto *rank*, sendo os betuminosos os mais adequados para a fabricação do coque.

Esse mineral é o combustível fóssil mais abundante na natureza e está presente em todos os continentes, porém a sua distribuição não é geograficamente equilibrada, conforme pode ser observado na Figura 3.2.

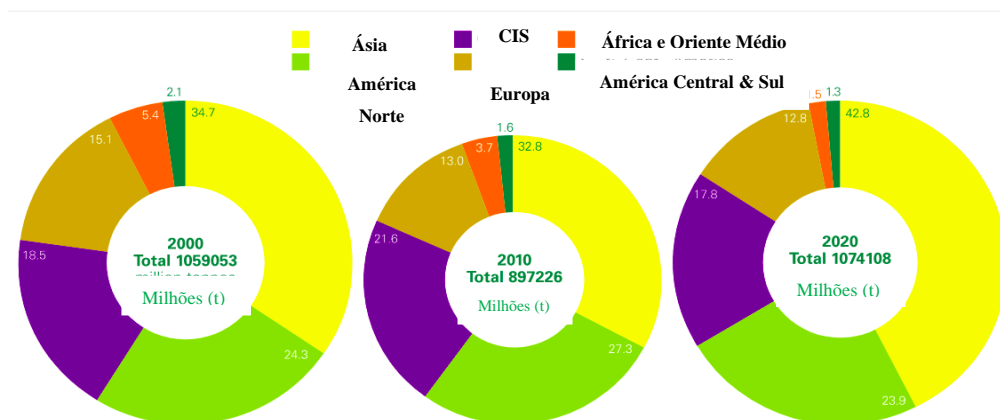


Figura 3.2: Distribuição das reservas de carvão provadas nos anos de 2000, 2010 e 2020 (BP - BRITISH PETROLEUM STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2021)

As reservas estão fortemente concentradas em alguns países como: EUA, Rússia, Austrália, China e Índia. Estes 5 países detêm mais de 75% da reserva mundial de carvão e a maioria destas reservas são antracíticas e betuminosas, (BP, 2020).

Estima-se que da reserva global (Silva, 2011), apenas 18% podem ser utilizadas nas indústrias siderúrgicas, sendo 10% com propriedades coqueificantes destinadas a produção de coque metalúrgico. Os demais são considerados carvões não coqueificáveis. A Figura 3.3, ilustra a aplicação dos diferentes tipos de carvões.

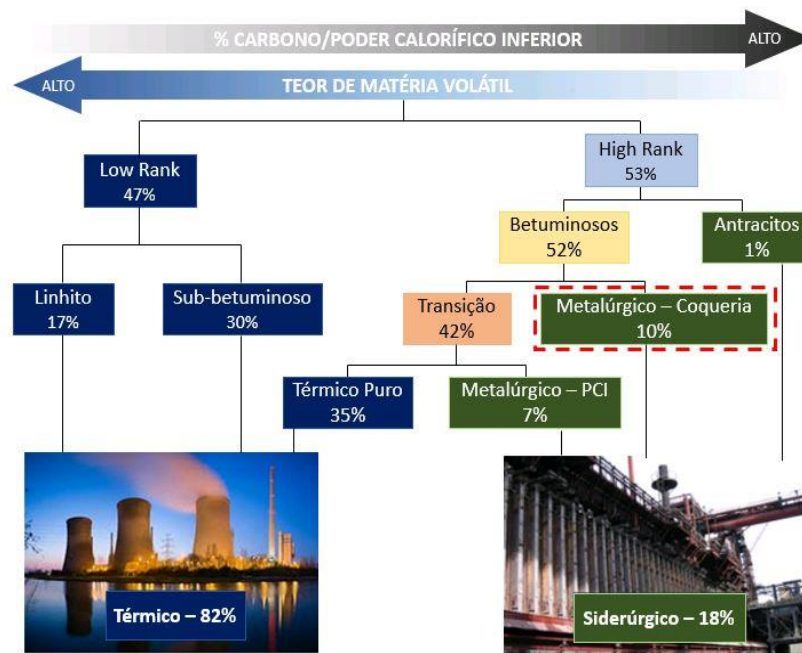


Figura 3.3: Aplicação dos diferentes tipos de carvões (VALLADÃO et al, 2016)

De acordo com a BP (2021) os principais países produtores de carvões coqueificáveis em 2020 foram: China, Índia, Austrália e Estados Unidos. A Ásia representa cerca de 75% da produção mundial, conforme pode ser observado na Figura 3.5, sendo que a China, maior produtora de carvão térmico e metalúrgico, destina toda a sua produção para o consumo interno.

Referente às exportações de carvões coqueificáveis, segundo a IEA (2020) no ano de 2020, os principais países exportadores foram: Austrália, Rússia, Estados Unidos e África do Sul. A Figura 3.4 apresenta esta estatística.

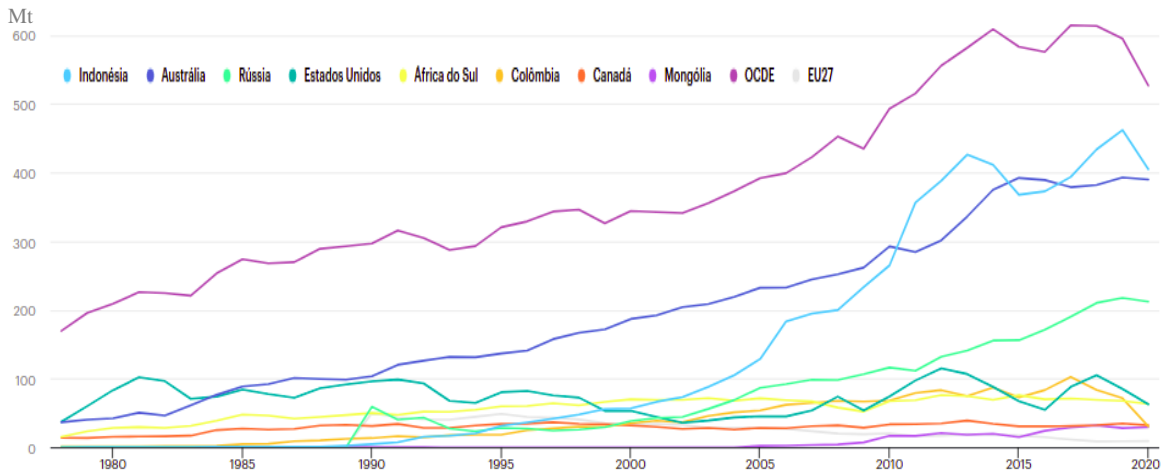


Figura 3.4: Exportações totais de carvões pelos principais exportadores, 1978- 2020 (IEA, 2020)

Em relação a importação, segundo a BP (2021), os principais países consumidores de carvões coqueificáveis foram: China, Índia, Estados Unidos, Japão e África do Sul, Figura 3.5. Um destaque para a China, que além de consumir toda a sua produção interna, ainda importa carvões, principalmente da Austrália e do Canadá, o que a torna mundialmente a maior consumidora desta matéria-prima.

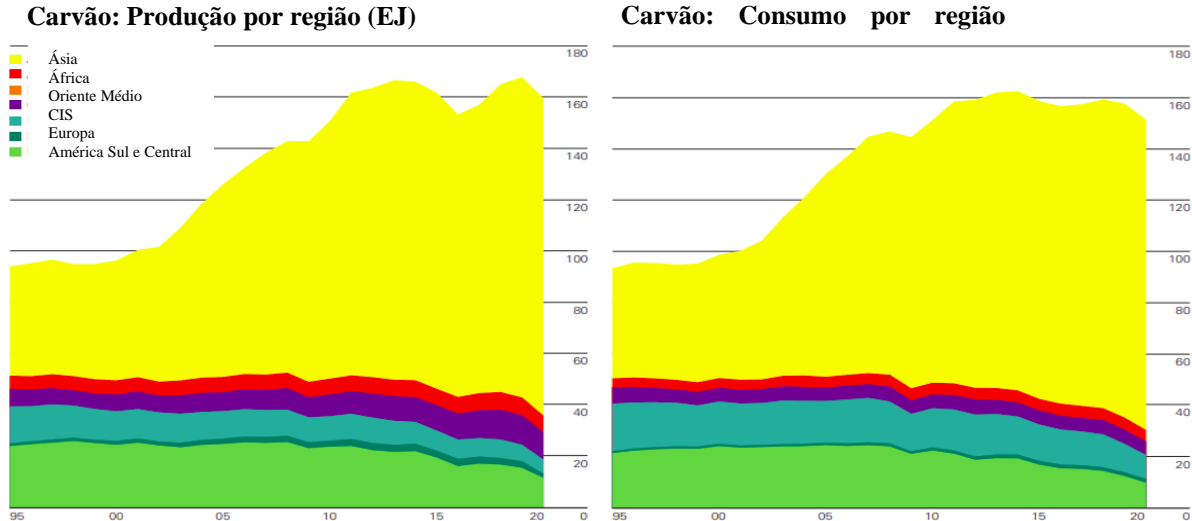


Figura 3.5: Produção e consumo de carvão por região durante os ano de 1995 até 2020. (BPSTATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2021).

Em se tratando do cenário brasileiro, em 2020, o Brasil apresentou uma reserva medida de carvão mineral igual a 6,596 Mt, o que representa cerca de 0,6% da reserva mundial, BP (2021). Estas reservas estão localizadas majoritariamente na região sul do país, com aproximadamente 90% no estado do Rio Grande do Sul, 9% em Santa Catarina e menos de 1% no estado do Paraná (GOMES E SCHERER, 2013).

Cerca de 90 mil toneladas de carvão foram produzidas no ano de 2020, segundo a BP (2021), e os principais estados produtores são: Rio Grande do Sul (63%), Santa Catarina (32%) e o Paraná (2%), (ABCM, 2020).

A maior parte da produção nacional de carvão vendável é destinada para o setor termoeletrico. No entanto o setor siderúrgico é o principal consumidor desta matéria-prima, que majoritariamente é proveniente da importação. De acordo com a BP (2021), houve um consumo de 0,58 Mt no ano de 2020, provenientes principalmente dos Estados Unidos, Austrália, Colômbia, Canadá e a África do Sul.

Um dos principais fatores para as siderúrgicas brasileira serem totalmente dependentes da importação de carvões, tanto para a produção de coque como para a injeção nas ventaneiras dos altos-fornos (PCI- *pulverized coal injection*), deve-se ao fato dos carvões brasileiros apresentarem elevados teores de cinza e enxofre, quando comparado aos carvões importados. A importação deste combustível impacta diretamente na competitividade do aço nacional, pois representa cerca de 30 a 40 % do custo da produção do aço (SILVA, 2011).

3.3 Rota do Carvão dentro da Siderurgia

Após a extração, o carvão *run-of-mine* é processado em uma planta de beneficiamento, onde passa por um processo de britagem que produz partículas grossas, intermediárias e finas. Posteriormente, essas frações passam por tratamentos independentes e geram produtos com diferentes faixas granulométricas que são vendidas no mercado separadamente ou combinadas.

Este capítulo da dissertação trata da rota do carvão, desde o seu recebimento no porto até o seu armazenamento no *Coal Bunker*, foco de estudo deste trabalho e a Figura 3.6 ilustra todas estas etapas.

O setor de preparação do carvão pode ser dividido em duas áreas: a preparação primária e a secundária. A primária compreende no recebimento, remoção ou retomada, britagem e ensilamento; a secundária consiste na dosagem e na mistura mecânica dos carvões.

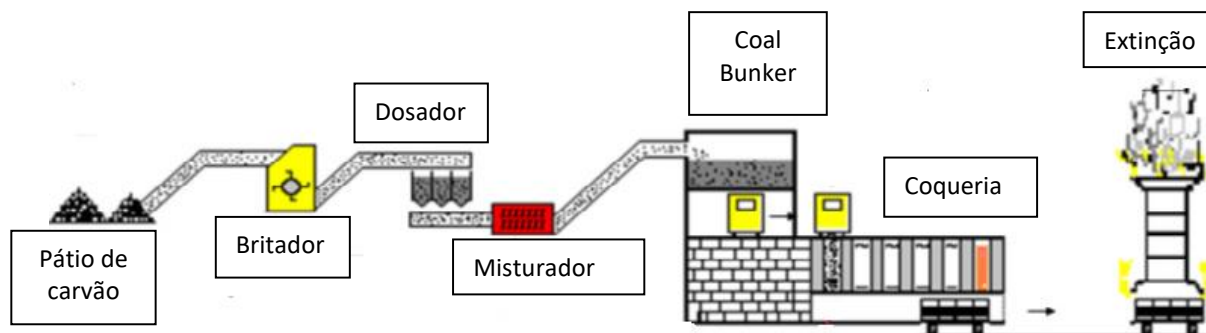


Figura 3.6: Rota do carvão desde recebimento até a produção de coque (ULHÔA, 2003- adaptado)

Em se tratando das siderúrgicas brasileiras, do porto até as instalações, o recebimento dos carvões pode ocorrer via transporte ferroviário ou correias transportadoras, ou ainda a combinação de ambos.

Na empresa em estudo, os carvões são recebidos via malha férrea e direcionados para o *Car Dumper* (basculador de vagões). Após o seu descarregamento, os carvões seguem o fluxo por sistema de correias transportadoras até o pátio de estocagem de matérias-primas, para a formação das pilhas.

A estocagem do carvão em pátios é uma prática comum, pois garante um pleno funcionamento dos altos-fornos, aja visto a possibilidade de intercorrências, irregularidades e até mesmo interrupções do suprimento dos carvões. Porém o carvão quando exposto a atmosfera, sofre oxidação, o que acarreta na sua degradação, resultando principalmente em perdas acentuadas do poder calorífico e das propriedades coqueificantes.

Essas pilhas de carvões são removidas ou retomadas pela empilhadeira/retomadora e direcionadas, via correia transportadora, ao britador para o ajuste granulométrico. O tipo de britador, martelo ou impacto, e o tipo de britagem adotada, pode diferenciar de acordo com os interesses da empresa, que pode optar por uma britagem diferenciada de cada carvão componente da mistura ou a britagem diferenciada por grupo de carvões equivalentes; ou ainda a britagem da mistura de carvões. A Figura 3.7 ilustra o britador de martelos adotado pela empresa em estudo.

Uma das vantagens da britagem de carvão individual é o controle da granulometria em função do tamanho ideal, de acordo com as propriedades de cada carvão. Em se tratando da britagem de um grupo ou da mistura, este tipo auxilia na homogeneização dos diversos componentes da mistura. A britagem seletiva por sua vez, também chamada de sistemática ou petrográfica, consiste em inicialmente passar o carvão/mistura em uma peneira, e posteriormente britar apenas o material retido na mesma. Dessa forma, o carvão é recirculado em um circuito fechado, para garantir que todo o carvão transpasse na malha desejada.



Figura 3.7: Britador de martelos (Gerdau- Usina Ouro Branco-MG)

O objetivo da britagem é garantir que a distribuição granulométrica da mistura de carvões, para a produção de coque, esteja com as partículas de 70 a 85 % inferiores a 3 mm (LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A, 1989). O controle do percentual de ultrafinos (menor que 0,15 mm), faz-se necessário, pois esses em percentuais superiores a 12 %, provocam problemas de depósito de carbono em tubos de ascensão, teto e paredes dos fornos de coqueria, aumento dos insolúveis no alcatrão e poluição ambiental (SILVA, 2011).

Após o ajuste granulométrico, os carvões são ensilados em seus respectivos silos na *Blending House* (casa de mistura), de acordo com as suas propriedades físicas e químicas. Para compor a mistura de carvões que será utilizada na coqueria, esses carvões são recolhidos dos silos correspondentes a cada carvão componente, via correia transportadora, e dosados em um sistema de balança, em quantidades equivalentes às especificadas em um modelo matemático de previsão de qualidade do coque. A Figura 3.8 ilustra os silos da *Blending House* e o seu sistema de dosagem e envio de mistura para o *Coal Bunker*.

Esse modelo de previsão consiste na definição dos carvões e suas proporções, baseado nas suas propriedades química, física e metalúrgica, a fim de atender às condições operacionais do processo de coqueificação e os requisitos de qualidade do coque, definidos pelo alto-forno.



Figura 3.8: Vista da Blending House e o sistema de dosagem das misturas de carvão (Gerdau).

A mistura escoava via correias transportadoras até o misturador, onde a homogeneização mecânica ocorre através de pás giratórias. O *blend* de carvões é direcionado via correias para o *Coal Bunker*, silo de estocagem da mistura de carvões da Coqueria.

Na coqueria, a mistura é transferida para as baterias de coque, sendo enfiada por gravidade pelo carro de carregamento. Durante a coqueificação, ocorre o processo de destilação, aquecimento em ausência de oxigênio em elevada temperatura, aproximadamente de 1100 °C a 1300 °C, por um período de 16 a 24 horas. Durante esse aquecimento ocorre a liberação de gases, oriundos da matéria volátil dos carvões, e a formação de subprodutos como alcatrão, óleos leves, gás de coqueria e, por fim, a formação de um sólido poroso e infusível, formado essencialmente de carbono, com elevada resistência mecânica, denominado coque, principal combustível utilizado no alto-forno.

3.4 Coal Bunker

A estrutura do *Coal Bunker* é de concreto e a parte inclinada (tremonha) é revestida internamente com material cerâmico, para melhorar o escoamento do carvão. Esse silo é

constituído de duas células e oito tremonhas por célula, com uma capacidade total de armazenamento de três mil toneladas. A Figura 3.9 ilustra a vista da estrutura externa deste silo.



Figura 3.9: Vista do *Coal Bunker* (GerdaU Usina Ouro Branco)

O carregamento da mistura de carvões no *Coal Bunker* é feito por um distribuidor rotativo, Figura 3.10, com movimentos de vai e vem, montado sobre uma plataforma giratória, com a finalidade de promover um abastecimento mais uniforme e homogêneo. Desta forma, é possível minimizar a segregação do carvão e alcançar uma operação mais regular e estável durante o descarregamento da mistura.

Os indicadores de níveis presentes no silo são responsáveis pelo controle do abastecimento da matéria-prima. Estes se tornam essenciais, pois sabe-se que operar com silos em níveis muito baixos implica em problemas operacionais como formação de arco de tensão e segregação, entre outros, que serão abordados detalhadamente no capítulo 3.9.



Figura 3.10: Distribuidor rotativo (Gerdau- Usina Ouro Branco-MG)

O descarregamento por gravidade é sempre realizado em ciclos alternados, de tal forma que, enquanto quatro comportas da mesma fileira permaneçam abertas, por um intervalo de tempo fixo, as outras doze tremonhas permanecem fechadas. A Figura 3.11 apresenta o sistema de fechamento e abertura das tremonhas do *Coal Bunker*.



Figura 3.11: Comportas de abertura e fechamento das tremonhas (Gerdau- Usina Ouro Branco)

Após esse ciclo, inicia-se outro trocando a fileira, até que todas as fileiras tenham feito o descarregamento. Esta prática é essencial para evitar a segregação do carvão dentro do silo.

3.5 Caracterização do Carvão Mineral

O carvão mineral é constituído de material orgânico e inorgânico, água, elementos inorgânicos e gases contidos em poros submicroscópicos (SPEIGHT, 2013). A parte orgânica é denominada macerais e a parte inorgânica é intitulada minerais.

Os macerais são as unidades básicas que compõem o carvão, mas esses não ocorrem de modo isolado. Eles são encontrados associados uns aos outros, em diferentes proporções e com quantidades variáveis de matéria mineral (FLORES, 2014). Os minerais, por sua vez, presentes em menor quantidade, apresentam as suas próprias características físicas e químicas.

A caracterização do carvão mineral é extremamente difícil, pois se trata de um material complexo e heterogêneo, e pode ser dividida basicamente em:

- Análise química: determinada a partir da análise imediata e elementar;
- Análise física: caracterizada pelo ensaio de granulometria, densidade de carga e *Hardgrove Index* (HGI);
- Análise das propriedades metalúrgicas: ditada pelas propriedades petrográficas/coqueificantes.

Este trabalho abordará apenas algumas propriedades químicas e físicas do carvão, que possuem influência direta sobre o fluxo granular no *Coal Bunker*, como: granulometria, umidade e densidade de carga.

3.5.1 Umidade

Os diferentes tipos de carvões apresentam quantidades distintas de água. De acordo com Speight (2005), a umidade tem origem em três fontes diferentes, sendo elas: i) vegetais que deram origem ao carvão; ii) presença de água nas minas que circulam pelos veios de carvão; iii) durante a preparação para a venda, o carvão é lavado, e, além disso, fica exposto à chuva e neve durante o beneficiamento, transporte e armazenamento.

A figura 3.12 apresenta as diferentes formas de água associadas ao carvão que pode ser subdividida em:

- Umidade superficial ou livre: é a água agregada à superfície externa do carvão e no interior de fissuras e capilares maiores. É decorrente de manuseio e/ou agentes externos, e segundo Oliveira (2008), a sua concentração aumenta com a diminuição do tamanho do carvão.
- Umidade residual ou inerente: trata-se da água retida no interior da estrutura dos poros ou capilares menores do carvão, necessita de baixa energia calorífica para sua retirada, devido as suas ligações serem muito fracas. A umidade inerente é resultado das propriedades naturais do carvão. Nesse caso, a umidade ocorre na forma de combinação química e/ou inclusa na matriz porosa do carvão mineral (SILVA, 2011).
- Umidade total: é o somatório da umidade superficial com a residual. Os laboratórios das siderúrgicas analisam este tipo de umidade, por razões comerciais e analíticas.
- Água de constituição: aquela combinada principalmente com a matéria mineral e que somente é liberada em temperaturas mais elevadas, quando comparado aos outros tipos de umidade.

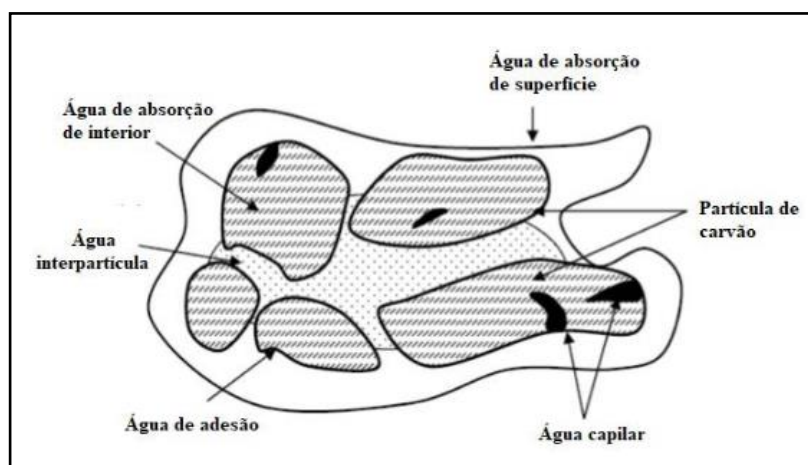


Figura 3.12: Diferentes formas da água associada ao carvão (KARR, 1978).

Cada tipo de umidade possui um método apropriado e normatizado para a sua determinação, a qual se baseia na evaporação da água presente no carvão e consequentemente a perda de massa da amostra, quando esta é submetida a um rígido controle de temperatura e tempo.

A umidade varia de 2 a 15 % em carvões betuminosos, e cerca de 45 % para linhitos (SILVA, 2016). Sabe-se que uma elevada umidade interfere diretamente nas etapas de transporte, britagem, carregamento/descarregamento nos silos e principalmente durante a Coqueificação, corroborando para um aumento do consumo de calor, e perda de produção por redução da carga por forno.

Em se tratando da influência da umidade durante o acondicionamento do material em silos, quando a temperatura ambiente está menor que a do material armazenado, o resfriamento das paredes da estrutura, provoca correntes de convecção do ar, descendo próximo as paredes do silo e subindo no centro da carga, conduzindo a umidade para a parte superior, conforme pode ser observado na Figura 3.13 (esquerda). Nas estações quentes do ano, o calor que o material da estrutura do silo transfere do meio ambiente para as partículas faz com que haja uma corrente ascendente de ar na lateral do silo, provocando uma corrente descendente no centro da carga e levando a umidade a se concentrar na parte inferior, conforme representado na Figura 3.13 (direita), (WERBER, 2005).

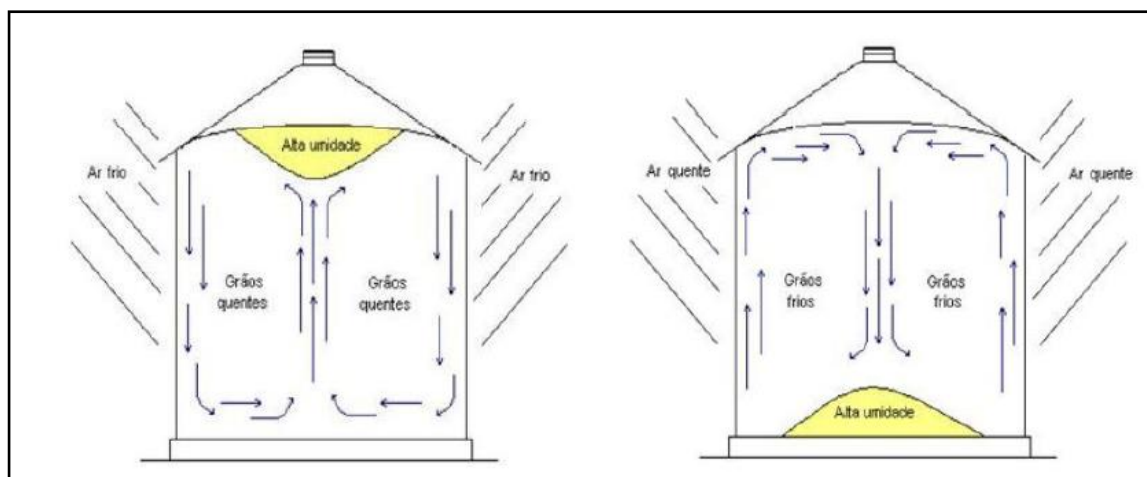


Figura 3.13: Migração de umidade no silo na estação: fria (esquerda), quente (direita) (KWIATKOWSKI, 2011).

Com relação ao fluxo de umidade dentro da partícula, quando a pressão de vapor interna (P_{vg}) é maior que a pressão de vapor do ar (P_{va}), existe um fluxo de umidade de dentro para

fora da partícula, causando a perda de umidade do produto num processo denominado dessorção. Quando a pressão de vapor interna (P_{vg}) é menor que a pressão de vapor do ar externo (P_{va}) o produto recebe umidade do ar, em um processo intitulado adsorção. A umidade irá se deslocar sempre do ponto de maior pressão para o de menor pressão, sendo que o processo de adsorção é muito lento quando comparado ao processo de dessorção, (WERBER, 2005).

3.5.2 Distribuição Granulométrica

O ajuste granulométrico do carvão é voltado para a produção de coque com propriedades requeridas pelo alto-forno. A granulometria de um carvão pode alterar tanto as suas propriedades aglutinantes e coqueificantes, quanto os parâmetros operacionais, como a densidade de carga e operação das baterias de coque.

Segundo Ulhôa (1988), uma distribuição granulométrica adequada e mais constante influencia positivamente na homogeneidade do coque, aumentando o seu rendimento no alto-forno e reduzindo o *coke-rate*.

As partículas reativas do carvão, durante a carbonização, tornam-se plásticas e atuam como material ligante, que envolve os constituintes inertes, porém se estas partículas forem muito pequenas, segundo Silva (2008), com tamanho ínfimo ($< 0,15$ mm), elas perdem as suas características coqueificantes e aglutinantes.

Se por um lado, uma maior finura da mistura melhora a distribuição das partículas reativas, por outro lado, aumenta a área superficial, e com isso a necessidade de maior poder aglomerante dos reativos.

Uma diminuição excessiva do tamanho do carvão afeta a operação na coqueria, por consequência da diminuição da densidade de carga, o que leva a uma consequente falha no peso de carregamento por câmara de coqueificação; uma menor resistência do coque devido a um menor contato efetivo entre as partículas da carga; um aumento do transporte de carvão fino; e a formação de carbono no interior dos fornos (KUBOTA et al., 2008; SILVA, 2008).

Em se tratando dos constituintes do grupo da inertita, estes permanecem inalterados, não passam por um estágio plástico durante a coqueificação, exercendo um efeito depressivo sobre a fluidez, sendo mais significativo quanto mais finamente estiverem britados. Portanto o tamanho dos componentes inertes, da matéria mineral e da inertinita são importantes e afetam a resistência mecânica a frio do coque (LOISON et al. 1989).

Ao contrário, se os grãos inertes são demasiadamente grossos, podem se tornar pontos de nucleação e propagação de trincas, em função das diferentes velocidades de contração que possuem em relação aos constituintes reativos (SILVA, 2008).

Com a britagem é possível reduzir o tamanho da inertita do carvão, além de homogeneizar a carga em relação ao conteúdo dos materiais reativos e inertes. Uma alternativa é o processo de britagem petrográfica, no qual as partículas grossas de carvão contendo quantidades de inertes relativamente maiores são seletivamente britadas, o que leva a diminuição de pontos de fratura do coque e aumento de sua resistência (NOMURA & ARIMA, 2017).

A granulometria interfere no comportamento do fluxo granular. De acordo com Calil (1984), o produto armazenado pode ser classificado em função da granulometria das partículas, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3-2: Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas (CALIL, 1984).

D (mm)	Classificação
$d_p > 0,42$	Granulares
$0,42 < d_p < 0,149$	Pulverulentos coesivos
$0,149 < d_p < 0,079$	Pulverulentos coesivos finos
$d_p < 0,079$	Pulverulentos coesivos extrafinos

O ensaio de granulometria compreende na separação por tamanho das partículas e pode ser definida como a relação entre a porcentagem de massa das partículas retidas ou passante em uma determinada malha.

3.5.3 Densidade

A densidade pode ser determinada como a relação entre a massa e o volume ocupado pelo material. De acordo com Guerra (2006), podem ser definidos três tipos de densidades:

- Densidade solta ρ e aerada ρ_a : é considerado a massa do produto não compactado. Deve ser aplicada para a determinação da capacidade do silo e da tremonha;
- Densidade compacta ρ_u : é a massa de uma amostra compactada utilizada para fins de cálculo;
- Densidade de trabalho ρ_w : empregada na determinação do grau de velocidade no carregamento ou descarregamento do silo. Pode ser calculada através da seguinte equação (1.0):

$$\rho_w = \frac{(\rho_u - \rho_a)^2 + \rho_a}{\rho_u} \quad (1.0)$$

3.5.4 Densidade de carga

A densidade de carga contida no *Coal Bunker* é usualmente determinada como a razão da massa de carvão carregada pelo volume do silo.

Alguns fatores são determinantes para a densidade a granel de uma mistura de carvão, tais como: distribuição granulométrica, umidade, morfologia das partículas, massa específica e porosidade (NASCIMENTO, 2016).

A influência da granulometria sob a densidade de carga está relacionada com o empacotamento dos grãos. Uma distribuição granulométrica ótima deve apresentar um arranjo onde as partículas menores preencham os espaços entre as partículas maiores, proporcionando uma densidade de carga máxima, ilustrado na Figura 3.14 (LOISON et al., 1989; LYALYUK, 2010, 2011).

A densidade de carga, fisicamente, está ligada à maior ou menor proximidade entre as partículas e, quanto maior a densidade, mais estreito é o contato entre elas, proporcionando o melhor aproveitamento da habilidade aglutinante do carvão.

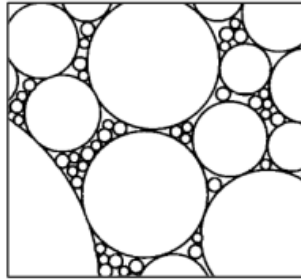


Figura 3.14: Diagrama ilustrando as partículas de carvão, com diferentes tamanhos (STANDISH, 1991).

Em termos operacionais, a granulometria possui influência sobre a densidade de carga do carvão e produtividade das baterias de coque (STANDISH et al., 1991; KAYE e HORTON, 1975). Além disso, uma mistura de carvões com uma maior densidade de carga proporciona ganhos na qualidade do coque produzido.

Com a redução da granulometria, a densidade de carga diminui devido ao aumento da fração de vazios no material (SILVA, 2011). A explicação, segundo Carias (2018), é devido ao fato que quando as partículas de carvão são divididas, a área de superfície total e o número de espaços vazios entre as partículas aumentam, conseqüentemente aumenta o volume ocupado pela massa de carvão e assim diminui a densidade de carga, conforme mostra a Figura 3.15.

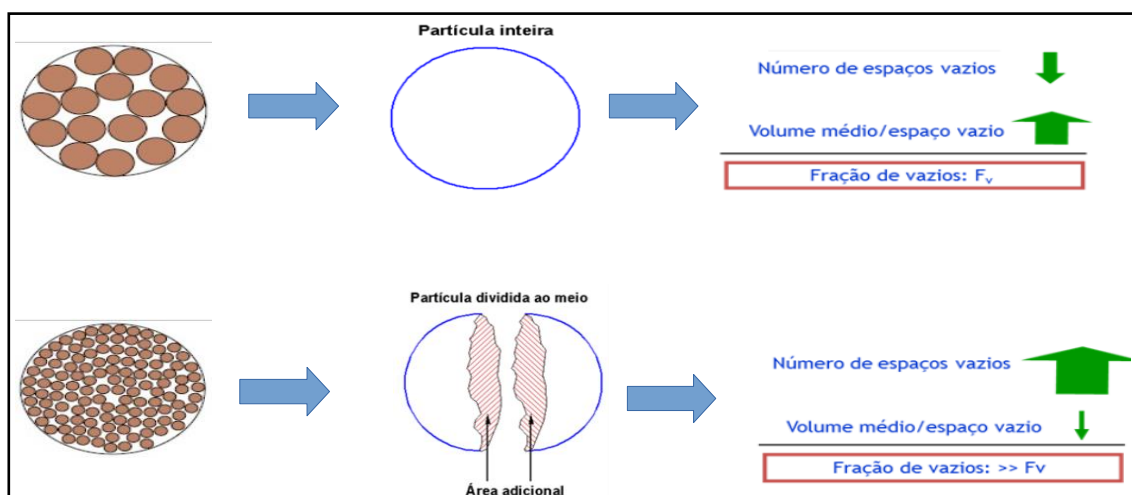


Figura 3.15: Efeito da granulometria e a formação de vazios (Carias, 2018) adaptado.

O trabalho de Silva (2011) mostrou a possibilidade de um aumento da densidade de carga da mistura a partir da utilização de material superfino (< 0,15 mm), até aproximadamente 13 %. A partir desse valor, tem-se um decréscimo da densidade. Isto pode ser explicado devido ao fato que, até 13%, os superfinos tendem a preencher os vazios existentes entre as partículas maiores, diminuindo a fração de vazios da carga. Acima desse valor tem-se uma saturação em superfinos. Com isso, formam-se camadas ou zonas de alta concentração de superfinos fora dos interstícios já saturados. A Figura 3.16 exemplifica o exposto.

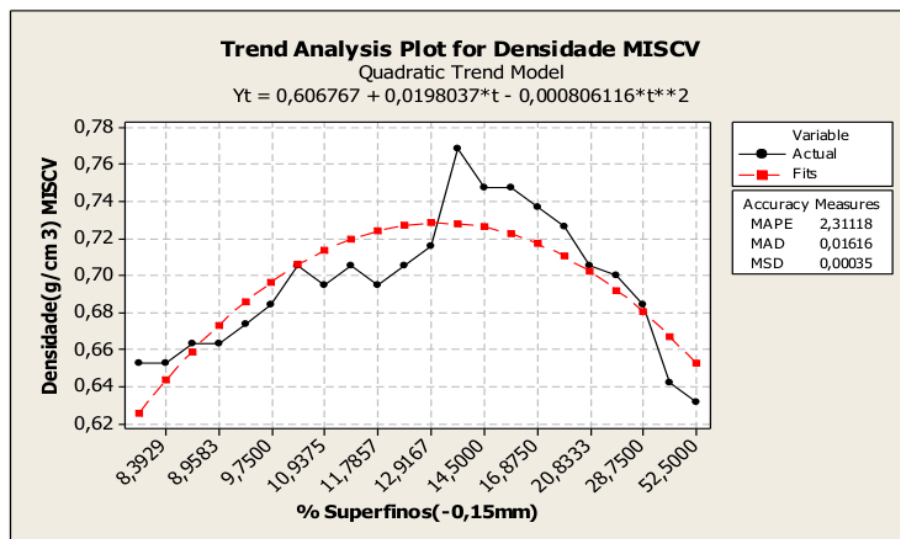


Figura 3.16: Influência do superfino na densidade da mistura (SILVA, 2011)

A umidade pode influenciar na tensão superficial do material, promovendo um maior ou menor grau de deslizamento das partículas, fazendo com que estas ocupem melhor os espaços vazios. Para produtos mais úmidos, a tensão superficial é maior e conseqüentemente os espaços vazios também é maior. Em se tratando de produtos mais secos, a tensão superficial entre as partículas é menor, com maior deslizamento, aproveitando melhor os espaços vazios.

Segundo Das et al. (2013), a densidade de carga atinge um valor máximo para o carvão seco, decresce até um mínimo para valores de umidade entre 6 e 10 % (dependendo da granulometria do carvão), e cresce novamente com o aumento subsequente da umidade, conforme pode ser observado na Figura 3.17(a). Isto ocorre devido ao fato da água repelir as partículas de carvão devido ao seu comportamento hidrofóbico, aumentando a distância entre elas (CARIAS, 2018).

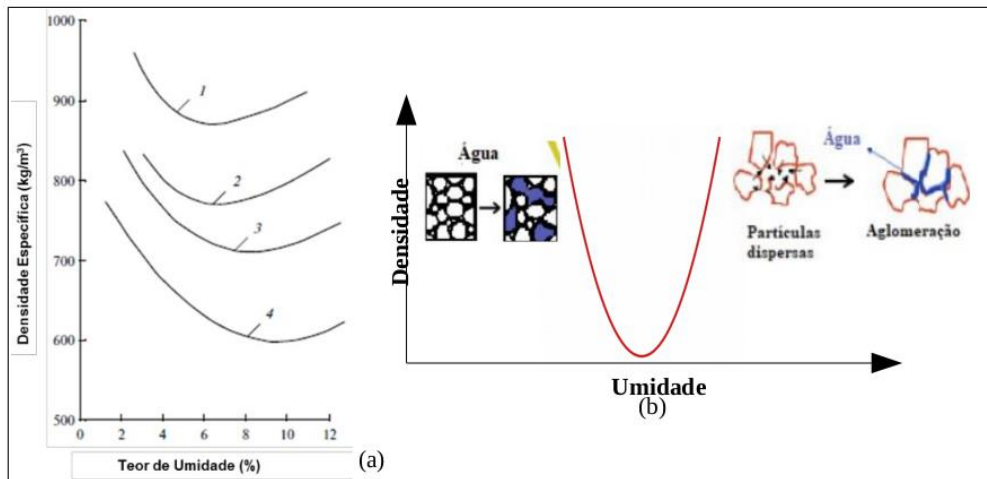


Figura 3.17: Efeito da umidade sobre a densidade de carga para diferentes tamanhos de carvão (1) 0-35 mm; (2) 0-20 mm; (3) 0-10 mm e (4) 0-3 mm (DAS et al., 2013; CARIAS, 2018) Adaptado.

A inversão da influência da umidade acontece para umidades mais altas, uma vez que a propriedade da água de facilitar o escorregamento das partículas umas nas outras passa a ser mais determinante para a densidade do que o afastamento pela tensão superficial (DAS et al, 2013).

Na busca por uma relação entre a densidade de carga adequada, deve-se atentar para a proporção entre a quantidade de partículas finas e grosseiras, e o teor de umidade do carvão.

3.5.5 Porosidade

A porosidade é constituída pelas partículas e os espaços vazios entre elas. De acordo com Park et al. (2007), pode influenciar na capacidade do silo e na facilidade de escoamento do ar. A Figura 3.18 ilustra a porosidade intergranular de um material carregado no silo.

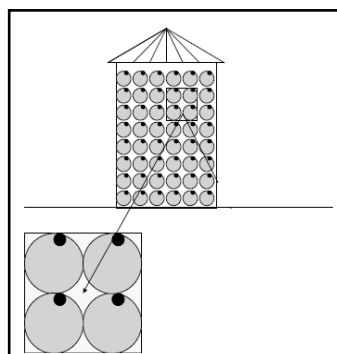


Figura 3.18: Porosidade intergranular (MATA, 2002).

Vários fatores influenciam na porosidade da carga, entre os quais pode-se destacar: forma, tamanho e não uniformidade das partículas, altura da queda, impurezas, percentual de grãos danificados, umidade e a compactação (MATA E EDUARTE, 2002). A seguir serão abordados alguns destes fatores.

Tamanho e forma: em se tratando da forma, sabe-se, que uma partícula mais arredondada forma maiores espaços intergranulares que os com forma de um elipsoide e este, por sua vez, tem maior porosidade que os de forma elipsoidal mais alongada. Quanto a influência do tamanho, as partículas com formato similar, mas tamanhos diferentes, apresentarão diferentes porosidades. Sendo que as partículas maiores apresentam menor porosidade, porém com maior dimensão dos poros em relação às partículas menores.

Altura da queda do material: os silos armazenadores normalmente são carregados pela parte superior. No início do carregamento, as partículas sofrem uma queda considerável, que, dependendo do material, pode provocar danos mecânicos, e levar à fratura das partículas, tendo como resultado uma geração de partículas mais finas. A Figura 3.19 ilustra a influência da queda na porosidade intergranular.

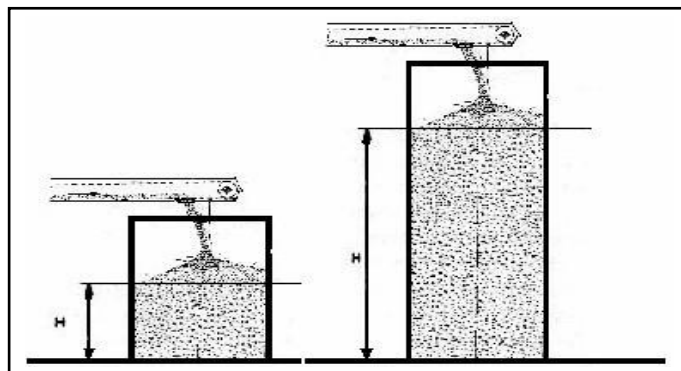


Figura 3.19: Influência da altura da queda na porosidade intergranular (MATA, DUARTE, 2002).

É importante destacar que as partículas quebradas geram uma distribuição granulométrica indesejada e aumentam a porosidade, mas diminuem as dimensões dos poros, dificultando o escoamento do ar.

Arranjo das partículas no escoamento: Um mesmo material pode se arranjar de diferentes maneiras durante o processo de escoamento e acomodação das partículas, fazendo com que diferentes porosidades intergranular possam ser formadas. Na Figura 3.20 é possível observar

a influência do arranjo das partículas a partir de duas situações distintas para o mesmo número de partículas.

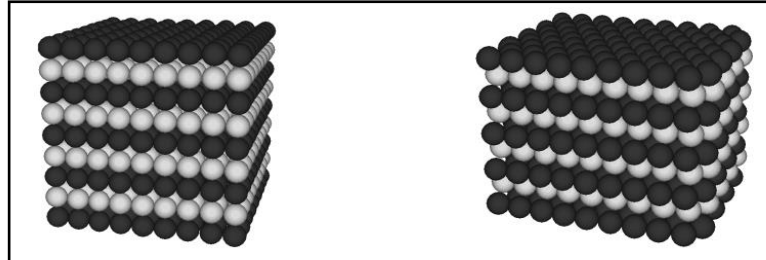


Figura 3.20: Influência do arranjo das partículas (NEVES, 2009).

A Figura 3.20 (esquerda) apresenta um arranjo tridimensional cúbico, cuja porosidade (n) é de aproximadamente 0,48. A Figura 3.20 (direita) ilustra um arranjo tetraédrico de partículas, com porosidade de aproximadamente 0,26, o qual leva a uma situação muito compacta e densa (NEVES, 2009).

Para Neves (2009), a denominação do arranjo está relacionada com o número de contatos que cada partícula (exceto as do contorno) possui. Logo, no arranjo cúbico, cada partícula está em contato com seis vizinhas e no caso tetraédrico, em contato com doze partículas.

3.6 Características Gerais dos Silos

Os silos são extensivamente utilizados na estocagem dos mais diversos tipos de produtos e em diferentes setores como na mineração, siderurgia e agroindústria. Dentre as suas principais vantagens pode se destacar: a capacidade de assegurar uma maior regularização do fluxo entre duas operações, utilização eficiente do espaço, conservação do estoque e descarga do material a uma taxa controlada.

Entretanto, são estruturas complexas de se projetar, que frequentemente apresentam problemas operacionais, principalmente quando são arquitetadas sem o conhecimento prévio das características do fluxo, que dependem das propriedades do material armazenado e a geometria do meio confinante.

O silo é constituído de duas partes: uma seção de convergência na base, denominada tremonha, e uma seção vertical, acima da tremonha, que pode ser circular, retangular,

quadrada ou poligonal, chamada de célula, que geralmente contém a maior parte do volume estocado. A Figura 3.21 apresenta as diferentes formas geométricas para tremonhas e células.

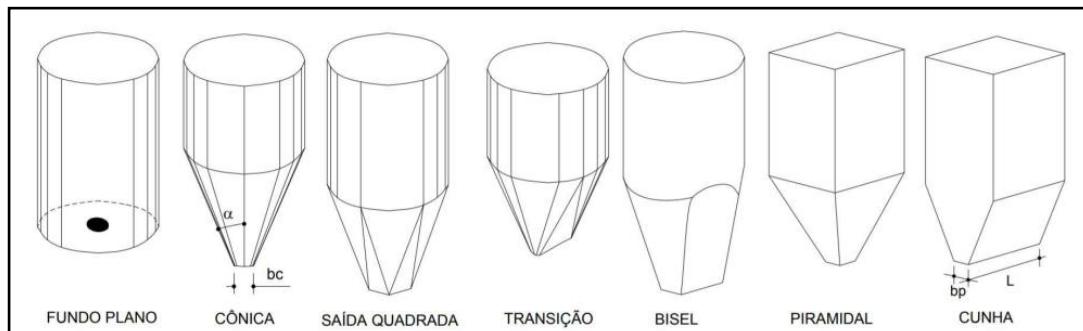


Figura 3.21: Diferentes formas geométricas para tremonhas e célula (CHEUNG, 2007).

A estrutura ainda pode apresentar variações quanto ao número de células, sendo classificada como unicelular quando apresenta apenas uma célula ou multicelular quando é constituída de duas ou mais células, a Figura 3.22 ilustra estas variações.

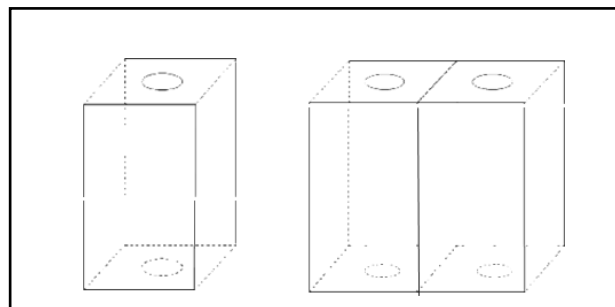


Figura 3.22: Silo unicelular (esquerda) e multicelular (direita) (Adaptada-EUROCODE, 2006).

Em se tratando da geometria, de acordo com a norma europeia EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), os silos podem ser classificados em função da relação hc/dc , ou seja, a razão entre a altura da parede vertical e o maior diâmetro inscrito na seção transversal, sendo definida da seguinte forma:

Tabela 3-3: Classificação dos silos (EUROCODE, 2006)

SILO	RELAÇÃO
Esbelto	$hc/dc \geq 2,0$
Intermediário	$1,0 < hc/dc < 2,0$
Baixo	$0,4 < hc/dc \leq 1,0$
Contenção	$hc/dc \leq 0,4$ (fundo plano)

3.7 Tipos de Fluxo

As partículas armazenadas em um silo, com granulometria e formas variadas, podem estar em movimento devido à ação da força da gravidade. Quando isso ocorre, temos um material em fluxo. O tipo de fluxo que vai ocorrer depende de alguns fatores, tais como:

- i) as características e as propriedades físico-químicas do material armazenado, como: a forma e o tamanho das partículas, a umidade, a massa específica, o ângulo de repouso, a força coesiva do material e as tensões aplicadas sobre as partículas;
- ii) as propriedades da parede confinante, como: a geometria, a rugosidade e as tensões na parede, a configuração da boca de saída, o tempo de armazenamento, a inclinação e a configuração da tremonha.

Kim (1959), com o intuito de entender melhor o comportamento do fluxo granular, realizou experimentos testando diferentes produtos em um silo com paredes transparentes. Observou que o movimento do produto era menor nas zonas próximas à parede quando comparado com a região central do silo, confirmando os diferentes tipos de fluxo, que podem ser classificados em: fluxo em massa, em funil, ou misto, sendo que cada um apresenta as suas vantagens e desvantagens.

3.7.1 Fluxo de Massa

No fluxo em massa, durante o processo de descarregamento, todas as partículas encontram-se em movimento contínuo, inclusive as que estão em contato direto com a parede do silo, conforme ilustra a Figura 3.23. Este fluxo é indicado para materiais que se degradam ou consolidam com o tempo, e deve ser obtido sempre que possível, pois apresenta inúmeras vantagens como: produz um fluxo uniforme e controlado, promove a remoção total do produto, gera menor segregação e uma maior homogeneização do produto (PALMA, 2005).

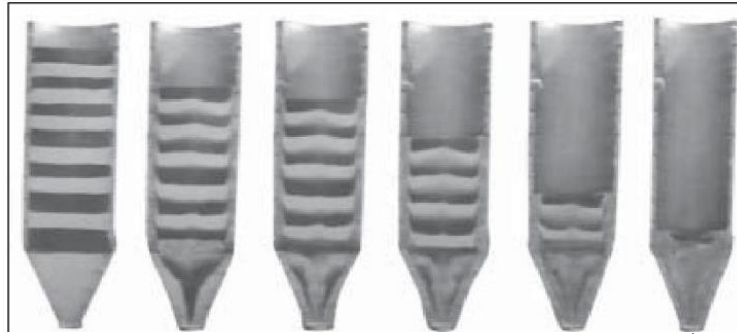


Figura 3.23: Imagens da descarga do silo com fluxo de massa (AMORÓS et al., 2000).

Algumas propriedades do material armazenado e certas características do silo podem contribuir para a obtenção do fluxo em massa. De acordo com Andrade (2016), normalmente apenas produtos granulares de baixa coesão e de baixo atrito interno conseguem alcançar o fluxo de massa; para Madrona (2008), a geometria da tremonha e o coeficiente de atrito da parede da tremonha são fundamentais para garantir um fluxo em massa.

Nesse tipo de fluxo, todo o material armazenado pode ser descarregado por gravidade, com pequenas variações de vazão em função de o fluxo ser bem definido e a ausência de zonas estagnadas, dispensando a necessidade de pressurizadores e vibradores. A possibilidade de um esvaziamento completo permite que toda a capacidade de armazenamento seja aproveitada.

Em contrapartida, silos com fluxo em massa sofrem mais esforços estruturais, uma vez que todo o produto armazenado se movimenta ao mesmo tempo, transmitindo elevadas pressões às paredes e ao fundo do silo (ANDRADE, 2016).

3.7.2 Fluxo em Funil

O fluxo em funil tem como característica a formação de um canal de fluxo limitado, alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático. Logo, apenas uma pequena porção do material encontra-se em movimento. Quando o canal de escoamento intercepta a parede vertical em um ponto abaixo da superfície do material, é denominado *Mixed Flow*. Entretanto, quando o canal se estende até a superfície do material armazenado, dá-se o nome de *Pipe-Flow*, conforme ilustra a Figura 3.24 (LEITE, 2008).

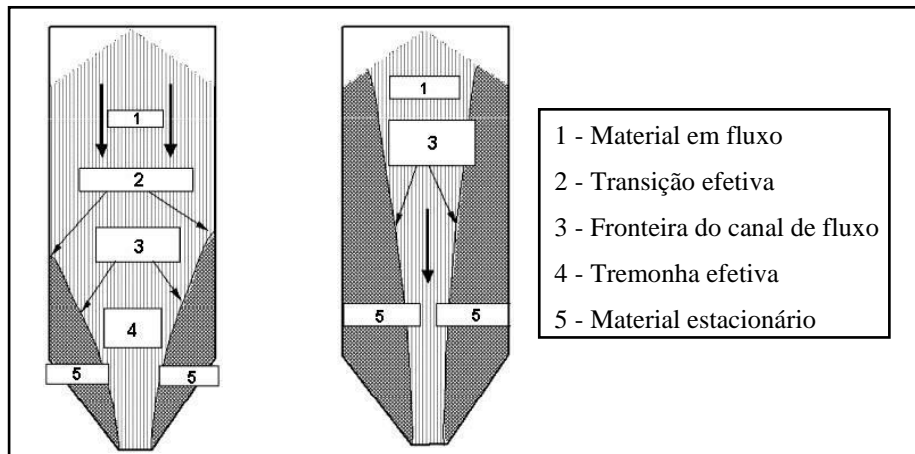


Figura 3.24: (a) Fluxo em funil: mixed flow (esquerda) e pipe flow (direita) (EUROCODE, 2006 - Adaptada)

Durante a descarga, o produto não se move todo de uma vez, para materiais pouco coesivos, a parte mais alta que está em contato com as paredes, vai desmoronando e alimentando o canal central. Entretanto, para produtos muito coesivos, a descarga pode até ser interrompida, ocorrendo a formação de um canal central vazio, cercado de produto estático (PALMA, 2005). Algumas partículas podem permanecer estáticas na tremonha, ou certas partículas que estavam temporariamente estáticas sob ação da pressão podem adquirir força e porventura obstruir o fluxo.

O fluxo em funil é indicado para materiais abrasivos, granulares e pesados, pois provoca de pequeno a nulo desgaste nas paredes do silo. Segundo Thomson (1997) é característico de silos verticais quadrados ou retangulares. Também ocorre em silos com paredes muito rugosas e de fundo plano ou pouco inclinado.

A sequência do primeiro enchimento/esvaziamento pode ser consolidada, porém as partículas localizadas no topo do silo ao redor do canal de fluxo continuarão em repouso até que o canal de fluxo seja esvaziado. Conseqüentemente isto pode provocar aglomeração, consolidação, oxidação, deterioração ou combustão espontânea (LEITE, 2008). Se o produto armazenado tende a deteriorar com o tempo, então aqueles produtos acumulados nas zonas estagnadas serão os mais suscetíveis à degradação, podendo comprometer as suas propriedades e características físico-químicas ao longo do tempo.

O silo com fluxo em funil é o mais comum na indústria. No entanto, a sua capacidade de armazenamento é reduzida em função da formação das zonas estagnadas. Portanto, a capacidade real é sempre menor que a projetada.

Por outro lado, a zona morta diminui o desgaste das paredes, pois o atrito da partícula com a parede é desprezível; também reduz a pressão nas paredes laterais. Apesar dos esforços menores nas paredes, o fluxo em funil não é desejável, pois problemas como a formação de arco e túnel podem provocar complicações estruturais no momento de sua ruptura.

Para este tipo de fluxo o controle de vazão é muito difícil, já que a vazão do fluxo tende a ser irregular e não uniforme, especialmente se o silo apresenta várias bocas de descarga, carregamento excêntrico, ou se o produto armazenado é propício a segregar (ROBERTS, 1987).

3.7.3 Fluxo Misto

No fluxo misto, as partículas vão apresentar comportamentos distintos ao longo de todo o silo, sendo que as células apresentam um fluxo em funil e na tremonha um fluxo em massa uniforme e controlado na saída, conforme ilustra a Figura 3.25.

Para obter este tipo de fluxo, o projeto conta com o dimensionamento do diâmetro superior da tremonha, de tal modo que minimize a formação do canal estável na porção superior.

Este tipo de fluxo é interessante quando se deseja uma descarga uniforme. Porém, as restrições de espaço ou custo, excluem um silo com fluxo em massa completo, ou quando o foco é modificar silos com fluxo em funil ou ainda para corrigir problemas de fluxo. Tremonhas múltiplas com fluxo em massa são às vezes montadas sob um silo com fluxo em funil (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; THOMSON, 1997).

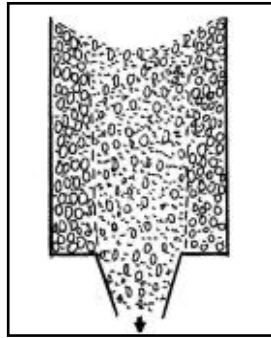


Figura 3.25: Padrões de fluxo em silos do tipo misto (Adaptado, EUROCODE, 2006).

O tipo de fluxo está intimamente relacionado com as características geométricas do silo e pode caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas estacionárias e se o silo pode ser esvaziado completamente (CALIL, 1990).

3.8 Modelo Físico do Elipsoide de Fluxo

Durante a etapa de descarregamento em silo, podem ser observadas na Figura 3.26, 5 zonas de fluxo. Na zona E as partículas permanecem quase que totalmente estáticas durante todo o processo. Ao longo da zona A as partículas fluem livremente, tal movimentação influencia a ocorrência de um escoamento desacelerado e na forma de blocos na zona B. Tão logo as partículas ou camadas em movimento alcancem o campo C, elas sofrem uma aceleração e, na zona D, perdem contato com a vizinhança caindo livremente (BROWN; NIELSEN, 1998).

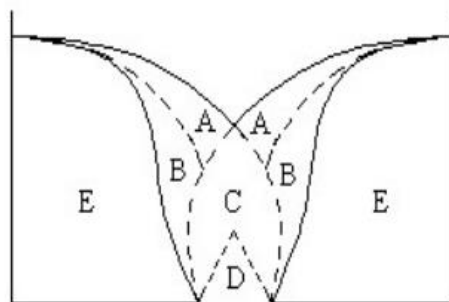


Figura 3.26: Zonas de fluxo de sólidos (BROWN; NIELSEN, 1998)

Todo o material descarregado por gravidade, após um determinado período, origina-se de uma zona aproximadamente elipsoidal, denominada elipsoide de movimento, localizada logo acima da abertura de descarregamento. O volume em movimento tem a forma de um elipsoide

de revolução alongado, conforme pode ser observado na Figura 3.27. O material contido na zona ativa desloca-se, mas não atinge o ponto de descarga, e o material que está além do elipsoide limite não está em movimento.

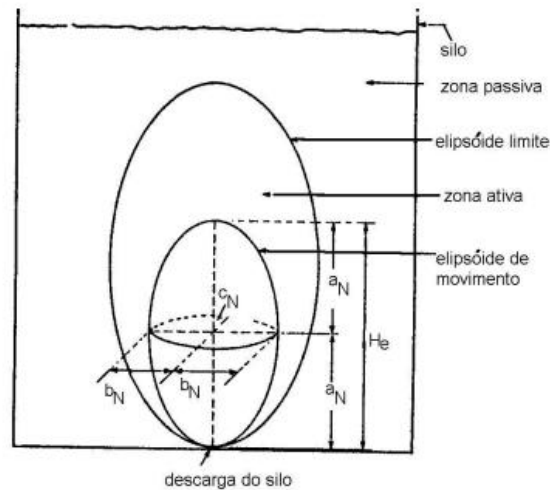


Figura 3.27: Elipsoide de movimento (TROTTER e GODDARD, 1981)

À medida que o material é descarregado, ocorre a formação de um cone invertido, indicando os grandes deslocamentos que ocorrem no canal central de fluxo.

3.9 Fenômenos de Instabilidade em Silos

A obstrução do fluxo nos silos ocorre quando o produto adquire resistência, de tal forma que passa a suportar o seu próprio peso. A resistência adquirida, em função da pressão de consolidação, varia de acordo com o tipo de material armazenado, (JENIKE, 1964).

Dentre os fatores que influenciam o fluxo granular, destacam-se a dimensão das partículas, a temperatura, o tempo de armazenamento e o teor de umidade, sendo que o fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade (CALIL, 1984). Just (1980) afirma que os principais fatores que afetam a frequência de paradas do fluxo são: a distribuição granulométrica, a tendência à aglomeração e as dimensões do canal de fluxo.

Existem diferentes tipos de intercorrências de fluxo que podem ocorrer com os materiais ensilados. Entretanto, os problemas mais comuns são: formação de arco, formação de um canal preferencial de fluxo, segregação, degradação granulométrica, fluidização e transbordo,

fluxo errático ou transientes de fluxo, fluxo excêntrico e taxa insuficiente de fluxo (SILVA, 2005).

O fluxo em funil não garante que todas as partículas estejam em movimento contínuo, fazendo com que certos fenômenos ocorram durante o descarregamento no silo. Dentre os principais problemas, os mais comuns são: a formação de arco de tensão, que funciona como um tampão, impedindo a total movimentação do material; e a formação de túnel, que limita o escoamento do material.

Estes problemas comprometem a capacidade de armazenamento do silo, em função da obstrução parcial ou total do fluxo, além de trazer sérios danos à integridade estrutural do silo, principalmente para a tremonha. Se o material, que a princípio estava estagnado, começar a se mover no sentido axial, as partes inferiores que se moverem primeiro, causarão uma sucção na parte superior do silo, resultando em uma expulsão abrupta do ar contido no tubo pela saída (ANDRADE, 2016).

A seguir, serão detalhados os principais problemas de irregularidades no fluxo.

3.9.1 Segregação

A segregação é um fenômeno que produz alteração no grau de homogeneidade do material granular em relação a alguma propriedade. Manifesta-se devido à existência de variações nas propriedades do sólido granular, aparece principalmente quando esse se encontra em estado seco e em movimento (SILVA, 2005).

Um dos principais problemas durante a estocagem do carvão é a segregação, que está presente nas etapas de transferência do carvão nas correias transportadoras, durante a formação das pilhas de carvão nos pátios, no ensilamento na *Blend House* e, por fim, na estocagem no *Coal Bunker*.

O fenômeno de segregação ocorre, principalmente, quando materiais particulados apresentam propriedades físicas diferentes tais como: tamanho, densidade e rugosidade superficial

(COMBARROS et al., 2014). Os carvões que compõem a mistura apresentam uma variação granulométrica, que contribui para o processo de segregação.

A Figura 3.28 (esquerda) ilustra o efeito da segregação natural das partículas de carvão, em função da heterogeneidade da distribuição granulométrica da mistura, durante o processo de formação de pilha. É possível observar que as partículas mais grosseiras rolam para a base da pilha, enquanto a região central e superior concentra uma maior quantidade de finos.

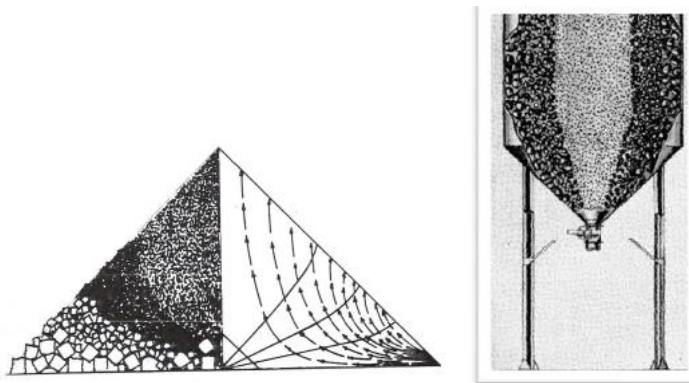


Figura 3.28: Processo de segregação em pilhas de carvão e no bunker de carvão (WANI Ahmad, MSK Prasad, BHAT Javed, 2012) adaptado

Na Figura 3.28 (direita) é possível observar a segregação dentro do silo, onde as partículas mais grosseiras escorregam para a base, concentrando-se próximo às paredes, enquanto as partículas mais finas estão presentes em maior quantidade no centro do silo.

De acordo com Rotter (2001), o processo de carregamento do silo e o tipo de fluxo são largamente responsáveis pela segregação dos sólidos.

3.9.2 Formação de Arco

A formação de arco é um fenômeno típico de silos com fluxo em funil, onde geralmente a obstrução ocorre logo acima da abertura da tremonha. O arco formado atua como um tampão, resultado do intertravamento das partículas, interrompendo completamente o fluxo de descarga. O efeito do arqueamento pode ser dividido em arco mecânico ou coesivo, e a Figura 3.29 ilustra as suas diferenças.

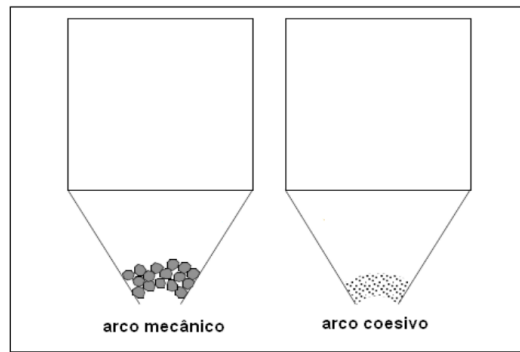


Figura 3.29: Obstruções : (esquerda) arco mecânico e (direita) arco coesivo (TEIXEIRA, 2006)

O arco mecânico geralmente é formado por partículas grossas, que quando iniciado o fluxo, são impedidas de se movimentar no sentido axial e de rotação entre si, principalmente quando os espaços vazios entre essas partículas são preenchidos por partículas menores (RAVENET, 1983). Ocorre em função de alguns fatores como a relação entre o tamanho das partículas e a dimensão da abertura da saída da tremonha, o arranjo das partículas, a forma e a porcentagem das partículas maiores e a velocidade ao longo do fluxo.

O arco coesivo ocorre com maior frequência em produtos de granulometria fina, quando sob ação de forças de coesão, agrupam-se e adquirem resistência suficiente para sustentar toda a coluna da carga, impedindo completamente o fluxo. Para prevenir a sua formação, é necessário conhecer as propriedades de atrito e coesão das partículas finas (SILVA, 2005).

Drescher et al. (1995) afirmam que, normalmente, esse fenômeno está associado à geometria do silo e da tremonha, à dimensão do orifício de descarga e ao desenvolvimento de esforços de coesão nos sólidos. Teunou et al. (1999) citam outros fatores que influenciam esse fenômeno, tais como, as propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e as condições ambientais (pressão, temperatura e umidade). Para Batista (2009) o tempo de armazenagem é outro fator que pode afetar consideravelmente o tipo de fluxo e favorecer a formação de arcos coesivos. Quanto maior for o período do produto no interior do silo, maior será o nível de compactação de suas partículas, uma vez que todas as camadas estarão submetidas à ação da gravidade.

Tanto o arco mecânico quanto o coesivo representam riscos a integridade estrutural do silo. Por isso, para resolver esse problema, e obter um fluxo livre, alguns autores aconselham considerar uma dimensão mínima da abertura da tremonha, diâmetro no caso de secção circular, ou diagonal no caso de secção quadrada/retangular.

Segundo Reed (1991) essa abertura deve ser um valor de oito a dez vezes maiores que o diâmetro máximo das partículas alimentadas neste silo. Para Leite (2008), basta considerar o tamanho oito vezes maior o tamanho da maior partícula. Para Palma (2005), a dimensão da boca de descarga deve ter em média 8 vezes a dimensão da maior partícula para abertura circular, 9 vezes para abertura quadrada ou retangular.

O arco coesivo pode assumir diferentes configurações em função da forma da tremonha utilizada. Em formato de cunha é denominado “ponte”, em tremonhas de eixo simétrico recebe o nome de abóboda ou domo, conforme ilustra a Figura 3.30.

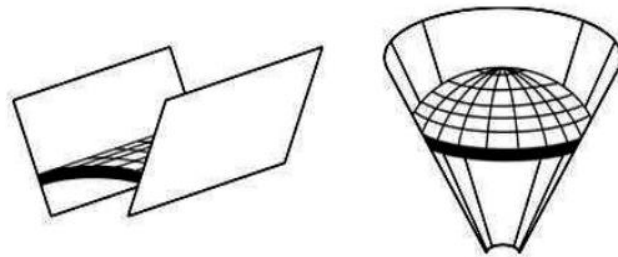


Figura 3.30: Formação de arco do tipo “ponte” (esquerda) e abóboda ou domo (direita) (BATISTA, 2009)

3.9.3 Formação de Túnel

Comumente a formação de túnel ocorre com maior frequência em silos com fluxo em funil ou quando a resistência do material aumenta com o tempo. Consiste na formação de um canal vazio, por onde o material escoá, que se forma acima da tremonha. Esse fenômeno faz com que o escoamento do material fique limitado a esse canal, e o restante do material encontra-se estagnado. Isso tem como consequência uma redução significativa da capacidade efetiva do silo, conforme ilustra a Figura 3.31.

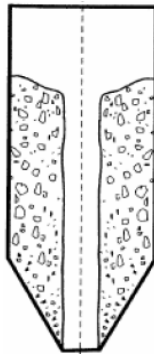


Figura 3.31: Formação de túnel (LEITE, 2008)

3.9.4 Descarga Incompleta

A descarga incompleta ocorre quando uma parte do material continua dentro do silo, preso nas paredes após o término do esvaziamento, ilustrado na Figura 3.32. Suas consequências vão desde a perda da capacidade efetiva de armazenamento até possível deterioração e/ou contaminações, uma vez que certa quantidade de material permanece no interior do silo por um período superior ao desejado.

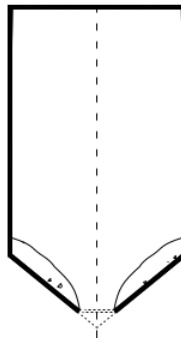


Figura 3.32: Descarga incompleta (SILVA, 2005)

3.9.5 Degradação Granulométrica

Na degradação granulométrica o material carregado é esmagado pela ação do peso das camadas sobrejacentes, durante a queda sofre impacto e abrasão e durante a movimentação

sofre abrasão mútua entre as partículas, alterando a sua distribuição granulométrica original e aumentando a porcentagem de finos (CHAVES e FERREIRA, 1996).

3.9.6 Fluxo Errático (ou transientes de fluxo)

O fluxo errático consiste na formação de arcos instantâneos e vazios que sofrem colapso após alguns instantes, variando a descarga do silo, conforme a Figura 3.33. (SILVA, 2005)



Figura 3.33: Fluxo errático (SILVA, 2005)

3.10 Aplicação da Modelagem para o Estudo do Fluxo Granular em Silos.

A modelagem é utilizada para representar sistemas, objetos ou fenômenos, com a finalidade de auxiliar na compressão do problema, seja nos aspectos quantitativos ou qualitativos. Esta aplicação vem se tornando cada vez mais comum no estudo do comportamento do fluxo granular em silos, principalmente com o uso de modelos físicos, matemáticos e numérico computacionais.

O modelo físico depende da concepção de um protótipo em escala real ou reduzida, o qual será submetido a ensaios que refletem as condições mais próximas do real.

Os modelos matemáticos representam soluções baseadas em fórmulas, em que são definidas variáveis de entrada para o cálculo de uma ou mais variáveis de saída. Trata-se de uma metodologia simples, de baixo custo e complexidade. Porém, as equações normalmente contemplam condições relativamente idealizadas, muito simplificadas quando comparadas às condições normais.

No método numérico computacional é desenvolvido um protótipo virtual a partir da aplicação de algoritmos, representado por um sistema de equações fundamentadas em uma teoria matemática.

Neste trabalho será abordado a aplicação da modelagem física e numérica computacional, para o estudo do fluxo granular do carvão, durante o processo de carregamento e descarregamento no *Coal Bunker*.

3.11 Modelo Físico

O objetivo de um modelo físico é simular um sistema da maneira mais realista possível, de modo que medições possam ser realizadas de forma conveniente, a um custo efetivamente baixo (SZEKELY, 1987). Os ensaios em modelo físico têm a capacidade de fornecer informações a respeito dos padrões do comportamento do material em estudo. Porém, para que um modelo físico represente de forma realista as condições reais, devem-se cumprir alguns critérios quantitativos de similaridade, que de acordo com Heaslip et al. (1983), são:

- similaridade geométrica: similaridade das formas, ou seja, a razão de qualquer medida do protótipo é correspondente a do modelo.
- similaridade dinâmica: representa a similaridade das forças (de inércia, pressão, viscosas, gravitacionais, tensão superficial, elásticas e eletromagnéticas).
- similaridade cinemática: representa similaridade dos movimentos.
- similaridade térmica: a razão entre as taxas de transferência de calor deve ser iguais no modelo e no protótipo.
- similaridade química: estabelece as condições necessárias do modelo para que a taxa das reações químicas em qualquer parte do sistema seja proporcional à taxa da mesma reação, no mesmo tempo e no mesmo local do protótipo.

Para Oi et al. (1998), os modelos físicos não são capazes de prever com exatidão o padrão do fluxo granular em silos, pois a caracterização do tipo de fluxo é bastante complexa e em laboratório os modelos em escala reduzida muitas vezes não representam o verdadeiro fenômeno em um silo de escala industrial.

Com o advento da tecnologia da informática, os modelos numéricos apresentaram um forte crescimento. Porém, ainda se faz necessário a utilização de outras abordagens em paralelo. Vários modelos numéricos foram concebidos a partir de estudos anteriores em modelos físicos, que propiciam diretrizes úteis para projeto e fornecem padrões de comportamento do material (GERTSCH; BULLOCK, 1998; HARTMAN, 1987), o que valida, portanto, o uso dessa técnica.

3.12 Modelo Numérico

Tanto o modelo físico quanto o modelo numérico, apresentam as suas vantagens e desvantagens. Embora a modelagem física forneça informações importantes a respeito do comportamento, ainda assim apresenta algumas limitações com relação a sua capacidade e precisão. Nem sempre a construção de um modelo físico é algo possível, muito em função do tempo, do custo e do espaço disponível. Em contrapartida, a modelagem numérica revela um nível maior de detalhes do fluxo granular. Porém, deve-se atentar para o fato que o modelo numérico seja um reflexo acurado da realidade física.

Modelar o comportamento das partículas durante o carregamento e o descarregamento em silos é um problema difícil, dado o caráter discreto do meio granular. Por isso algumas técnicas de simulação têm sido estudadas, entre elas destaca-se o Método dos Elementos Discretos (MED).

Simulações numéricas utilizando o MED se tornaram uma ferramenta valiosa para o estudo de diferentes fenômenos que ocorrem em escala micro em materiais granulares, fornecendo um laboratório virtual que permite ao pesquisador realizar experiências que são difíceis ou impossíveis de realizar em experimentos físicos (CARVALHO, 2013).

3.13 Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos (MED) é um método de simulação numérica do movimento de um grande número de partículas, normalmente modeladas por geometrias simples, dentro de um sistema fixo ou móvel variante com o tempo (MESQUITA, et al. 2012).

Existem dois tipos principais de métodos dos elementos discretos: Dinâmica Molecular (DM) e Dinâmica de Contato (DC). A DM é o método mais conhecido e mais utilizado para simular o MED, foi desenvolvido por Cundall e Strack (1979). Este método é baseado no uso de um esquema numérico explícito no qual a interação das partículas é monitorada em cada contato e o movimento delas é modelado em cada partícula através das equações newtonianas. A DC possui um esquema numérico para lidar com muitos contatos, com a integração das forças de contato e não das forças propriamente ditas. Neste método não é possível a interpenetração dos elementos nos seus contatos.

Durante muitos anos a modelagem permaneceu restrita a problemas com geometria simples em 2D e escala reduzida. Com o avanço da tecnologia computacional, em meados dos anos 90, tornou-se possível a aplicação do MED para cálculos mais complexos em escala industrial, com geometrias complexas e em três dimensões.

De acordo com Montellano et al. (2011), o MED é usualmente utilizado na determinação do comportamento do material granular em silos e tremonhas, incluindo as pressões que o material exerce.

Diversos autores vêm se dedicando ao estudo da aplicação do MED para o conhecimento do fluxo granular em silos, como os trabalhos de Cleary e Sawley (2002), que utilizaram o método para estudar as vazões mássicas de diferentes geometrias de silos com variadas formas de partículas; Li et al. (2004) compararam o comportamento das partículas na descarga de silos 3D, tanto experimentalmente quanto por meio de simulação.

Goda e Ebert (2005) analisaram o carregamento e descarregamento em silos a partir da aplicação do MED, em dois tipos de silos: com fundo chato e funil. O material granular foi gerado como um conjunto de partículas esféricas e foi estudado o seu movimento provocado pela ação da gravidade durante o escoamento. Os resultados obtidos pelos autores foram muito próximos a dados reais e mostram claramente as vantagens da utilização do MED para entender o comportamento complexo do fluxo de materiais granulares.

Com o intuito de avaliar alguns parâmetros que podem interferir diretamente na taxa de descarga de um silo, Anand et al. (2008) utilizaram o MED para estudar o efeito da variação do tamanho da partícula, altura e largura do silo e o tamanho da abertura de saída do material,

comparando os resultados experimentais com os disponíveis na literatura. Os autores encontraram boa concordância para todos os parâmetros investigados.

Lopes (2015) propôs o estudo do fluxo de materiais granulares por meio de 3 abordagens distintas, um modelo matemático a partir das equações diferenciais básicas que governam o problema, um modelo experimental em escala reduzida e um modelo numérico computacional utilizando o MED implementado no software comercial PFC2D. O autor trabalhou com amostra de gnaiss britado, em diferentes faixas granulométricas. O modelo de simulação numérica baseado no MED reproduziu satisfatoriamente o modelo experimental, conforme verificado na Figura 3.34.

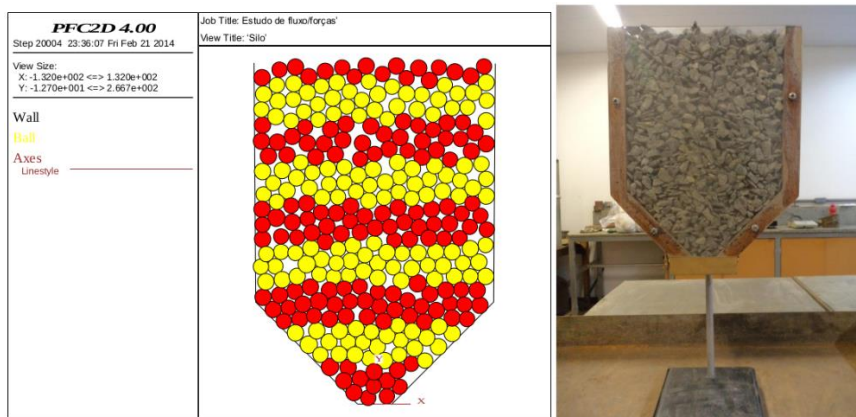


Figura 3.34: Modelo numérico experimental desenvolvido no software PFC2D (LOPES, 20115)

No Brasil, a PETROBRAS desenvolve um projeto intitulado PETRODEM. É uma iniciativa de integrar parte do conhecimento existente dentro das universidades brasileiras relacionado ao MED. Diversos trabalhos já foram publicados por algumas universidades como a Universidade de São Paulo (TPN/USP) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAMCE/UFRJ).

A aplicação do MED para simulação de problemas relacionados ao manuseio, transporte e carregamento/descarregamento de partículas na indústria siderúrgica é recente, de tal modo que a literatura disponível ainda é muito escassa. Alguns centros de pesquisas de grandes empresas, como a Vale, Paul Wurth e ArcelorMittal, vêm adotando esse método como ferramenta de análise e otimização de seus processos. Porém, infelizmente, grande parte do conhecimento gerado com a aplicação dessa técnica por esses centros de pesquisa privados é, em muitos dos casos, de domínio próprio e, portanto, não se encontra disponível na literatura.

Dentre os trabalhos disponíveis, pode-se citar o trabalho de Yu e Saxén (2010), que estudaram durante a descarga de um silo, o fenômeno da segregação granulométrica de pelotas com três classes granulométricas. Neste trabalho foi realizada uma validação experimental da simulação utilizando o MED.

Adema et al. (2009) modelaram o alto-forno, desde o seu carregamento até a saída do ferro-gusa na região do cadinho, utilizando o MED acoplado ao CFD (*Computational Fluids Dynamics*- dinâmica de fluidos computacional). Nesse trabalho foi investigado o formato da zona coesiva.

Wu et al. (2013) realizaram um estudo da segregação granulométrica em um silo de geometria aproximada da real, durante a descarga de pelotas. Os autores analisaram o comportamento de descida das camadas de matérias primas no interior do silo, como ilustra a Figura 3.35.

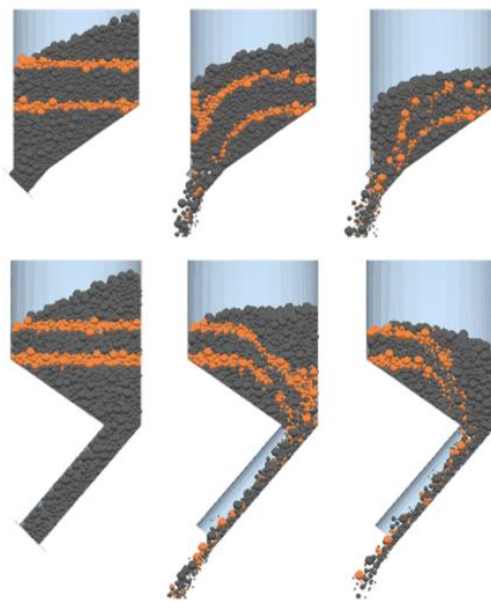


Figura 3.35: Movimentação das camadas de matérias-primas durante a descarga de um silo (WU et al., 2013)

Mio et al. (2012) investigaram o efeito da segregação da alimentação das matérias primas, sinter e coque, durante a descarga de um silo genérico. Nesse trabalho foi realizada uma simulação completa da operação de carregamento do silo, desde a correia transportadora até o topo do silo. Os autores constataram que as partículas de sinter e coque percorrem caminhos preferenciais de acordo com a sua granulometria.

Em um outro trabalho de Mio et al. (2010) foi analisado o comportamento do sinter e coque, variando os seus diâmetros na calha rotatória durante a alimentação dessas matérias primas no alto-forno. Eles observaram que as partículas na região central da calha alimentadora apresentaram uma maior velocidade e, portanto, foram projetadas mais próximas das extremidades do alto-forno.

Holmes (2011) avaliou a distribuição mássica obtida no carregamento de minério de ferro granulado, sinter e coque no alto-forno usando o MED para variadas condições de carregamento. O autor obteve informações, via simulação, da situação da carga alimentada neste reator, informação que dificilmente seriam alcançadas somente com a modelagem física. O autor observou que há segregação por tamanhos e propôs uma mudança no algoritmo de carregamento da carga.

O trabalho de Lima (2016) faz uso do MED para simular o processo de carregamento das diversas matérias primas no alto-forno. Em virtude do grande número de partículas no sistema computacional, o autor optou por repartir a simulação em três etapas: i) correia transportadora até a entrada da alimentação do silo (Figura 3.36-1), ii) carregamento do silo (Figura 3.36-2), iii) descarregamento do silo seguido do carregamento do material no topo do forno (Figura 3.36-3). As simulações avaliaram os efeitos das diferentes características físicas apresentadas pelas pelotas, sinter, granulado e o coque, como o efeito da granulometria, forma, densidade e resistência mecânica, bem como o efeito da dinâmica de movimentação da calha rotatória.

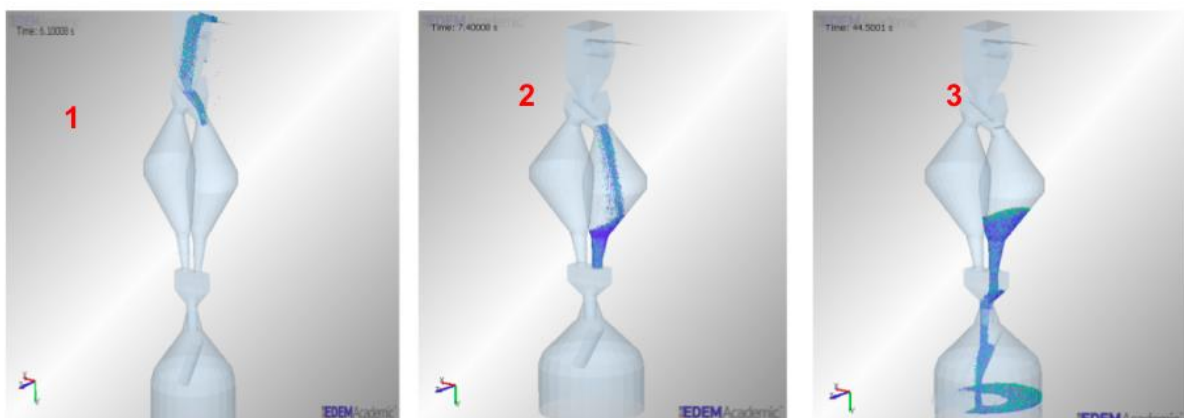


Figura 3.36: Imagens da simulação do carregamento do alto-forno utilizando o MED no software EDEM subdivididas em três etapas: 1) alimentação do silo; 2) carregamento do silo; 3) descarregamento do silo e carregamento do alto-forno. (LIMA, 2016)

Estes e outros trabalhos comprovam que o MED é o método mais indicado para o estudo e a compreensão do comportamento de materiais granulares sob carregamento ou descarregamento em silos.

Na abordagem discreta, cada partícula do meio granular é tratada individualmente, bem como as interações que ocorrem entre elas, respeitando os princípios básicos da mecânica. Esse método fornece uma detalhada descrição das posições, velocidades e forças atuando em cada partícula, assim como nos contornos físicos em cada instante de tempo, levando em conta as forças de contato e de não contato entre cada partícula.

As características discretas do meio permitem modelar o comportamento complexo do material, quando submetido ao carregamento e descarregamento, os quais dificilmente seriam modelados a partir de abordagens contínuas. Nessa abordagem, as forças de contato entre os grãos podem ser calculadas através de leis constitutivas específicas, e representadas graficamente como mostra Lopes (2015) na Figura 3.37. O comportamento tensão deformação pode ser modelado, bem como as relações existentes no contato entre grãos, formato das partículas, a heterogeneidade na distribuição de vazios (LOPES, 2015).

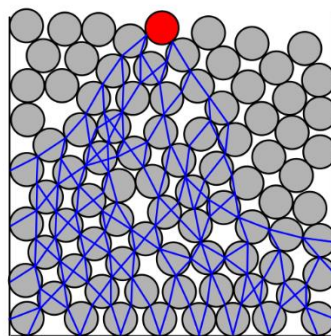


Figura 3.37: Exemplo de simulação computacional de material granular, pelo MED, onde é mostrado um exemplo da cadeia de transmissão de esforço entre as partículas (LOPES, 2015)

Segundo Silva (2018), o MED permite que o comportamento mecânico resultante da integração de todas as partículas, no estado macro, possa ser predito como resultado das interações no estado micro, isto é, entre as partículas ou entre as partículas e a superfície.

As micro propriedades do material devem ser conhecidas, o que é parte fundamental do MED, pois o comportamento macroscópico do sistema considerado na simulação é consequência das propriedades das partículas (CIL; ALSHIBLI, 2014). As variáveis de maior importância são a

densidade, granulometria, atrito entre partículas, atrito entre partícula e parede, rigidez normal, rigidez cisalhante, e por fim, a geometria dos grãos e do meio confinante (LOPES, 2015).

Ainda segundo Lopes (2015), a densidade e a granulometria estão diretamente relacionadas com o peso das partículas, bem como à intensidade das forças de interação entre as partículas e a pressão exercida nas paredes. O atrito é uma propriedade intrínseca ao material, e, com a força peso, influenciam na resistência ao fluxo. A rigidez normal e a rigidez cisalhante são parâmetros relativos às interações de contato entre partículas e no caso do MED, estão ligadas à sobreposição de partículas, também chamada de *overlap*, e à própria convergência do método, devido à sua instabilidade numérica. Por último, mas não menos importante, a geometria do meio confinante tem influência em todo o processo, pois além de se relacionar com o tamanho das partículas, afeta a distribuição de forças no meio, bem como a própria ocorrência de fluxo.

Este método permite o cálculo de obstruções ao fluxo de material, a partir de arranjos geométricos das partículas, conhecido como formação de arco, como mostra a Figura 3.38.

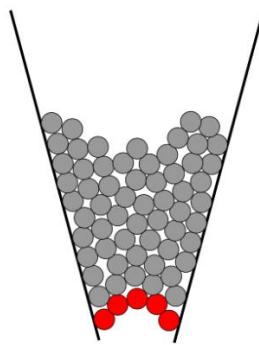


Figura 3.38: Exemplo do efeito arco, e sua obstrução ao fluxo de material granular, simulado pelo MED (LOPES, 2015)

O MED compreende basicamente dois estágios, ilustrados na Figura 3.39, sendo o primeiro a detecção e o cálculo das forças de contato, e o segundo é o cálculo da movimentação das partículas, que é baseado na segunda lei de Newton (LIMA, 2014).

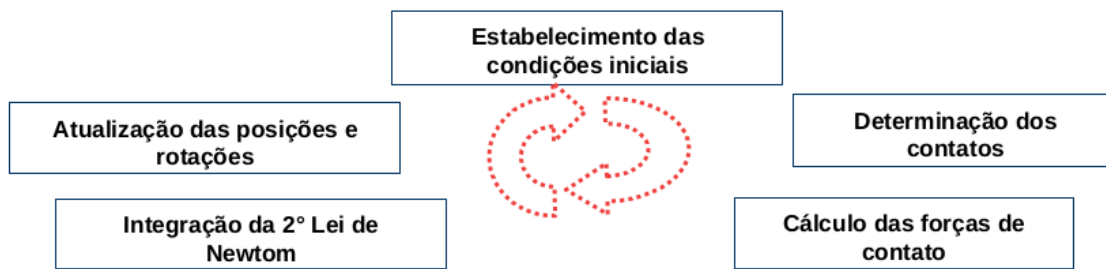


Figura 3.39: Ciclo de cálculos do MED (PINTO, 2011), adaptado

A primeira etapa consiste no cálculo das forças de contato, que pode ser baseado em dois modelos, o linear e não linear. O modelo linear é amplamente utilizado por ser um modelo simples e com solução analítica para os parâmetros de colisão. Neste método, é preciso especificar valores para o coeficiente de amortecimento (CASERTA, 2015). O modelo não-linear considera a não-linearidade das forças conservativas e dissipativas. A força elástica conservativa é calculada com base na teoria de Hertz (1882) e Timoshenko e Goodier (1970) e o coeficiente de rigidez não-linear pode ser estimado de acordo com as propriedades do material como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson (CASERTA, 2015).

Para atualização das forças de contato resultantes do movimento relativo em cada contato, aplica-se a lei da força-deslocamento. Para descrever este contato entre as partículas, existem dois modelos que são os mais utilizados: modelo esfera rígida e esfera suave, sendo que a diferença básica entre eles está no tempo de colisão entre as partículas. No modelo esfera rígida as colisões entre as partículas são binárias e instantâneas, já no modelo de esfera suave, os contatos podem ser multipartículas, as quais são sobrepostas por um determinado intervalo de tempo (CASERTA, 2015).

A segunda etapa consiste na aplicação da segunda Lei de Newton para determinação das velocidades e acelerações de cada partícula, e a partir disso, a nova posição dos elementos (NEVES, 2009; MESQUITA et al., 2012). As partículas ficam sujeitas a forças e momentos externos que são provenientes da força gravitacional, dos choques entre as partículas, choques entre as partículas e a geometria confinante.

A equação do movimento liga cada elemento à soma das forças aplicadas e ao seu comportamento dinâmico, assumindo que a velocidade e aceleração são constantes em cada

passo de tempo (BEHMER, 2019). Isto pode ser obtido por meio do método de diferenças finitas, no qual o intervalo de tempo definido seja suficientemente pequeno para que a perturbação induzida se propague entre um elemento e seus vizinhos. Assim, a cada passo de tempo, as forças atuando em qualquer partícula podem ser determinadas exclusivamente pelas interações com as partículas com as quais estiver em contato.

No MED a interação entre as partículas é tratada como um processo dinâmico com os estados de equilíbrio sendo alcançados sempre que as forças internas se encontram equilibradas, e obviamente, são as leis do movimento que proporcionam a relação fundamental entre a cinemática das partículas e as forças envolvidas (MORAES, 2016).

Na maior parte dos códigos baseados no MED, as partículas estão no formato de disco (2D) ou esferas (3D), pois somente um único valor de raio é necessário para se definir a geometria do problema e somente um tipo de contato é possível, tornando a sua detecção mais facilitada (DONZÉ et al., 2008). No entanto, tais geometrias nem sempre refletem o comportamento real, pois tendem a rolar excessivamente. As geometrias mais complexas como polígonos, poliedros, elipses e elipsoides podem fornecer um comportamento mais realista. Porém, a detecção dos contatos e o cálculo de forças é mais difícil, devido aos contatos de cantos.

A principal limitação no uso do MED está relacionada com a capacidade computacional, pois a aplicação deste método requer algoritmos e rotinas computacionais, de modo a processar um gigantesco volume de operações a ele inerentes. Para Horabik e Molenda (2016), a maior limitação deste método está no número de partículas empregadas na simulação, que pode aumentar exponencialmente o tempo computacional.

3.14 YADE

Para a implementação do MED foi utilizado o programa YADE (*Yet Another Dynamic Engine*). Criado em 2004 por Frédéric Donze, foi projetado e desenvolvido no Laboratoire 3SR, em Grenoble na França, a partir de um programa anterior denominado SDEC. O software YADE foi desenvolvido com o intuito de fornecer aos cientistas um ambiente estável para a implementação de algoritmos computacionais para o MED (KOZICKI; DONZE, 2009). Tem sido utilizado para estudos em diferentes áreas como na engenharia, geologia, agroindústria etc.

Trata-se de um software livre, sob licença GPL (*General Public License*), e de código aberto, o que possibilita a constante melhoria em função das contribuições da comunidade científica. A linguagem de programação empregada no desenvolvimento do algoritmo de simulação é o Python. Esta linguagem é utilizada para uma construção mais rápida e concisa das cenas, controle da simulação, pós-processamento e depuração (SMILAUER et al., 2015).

A principal restrição quanto ao uso do YADE é com relação a sua portabilidade e compatibilidade, visto que atualmente o programa é executável somente na plataforma Linux e não apresenta compatibilidade com certas versões de distribuições Linux. Outro fator limitante é o fato da instalação ser um tanto quanto complexa, pois exige a instalação de muitos pacotes extras, além da documentação ser bastante escassa.

O YADE utiliza o paradigma da programação orientada a objetos, tornando-o flexível (NEVES, 2009). Neste software é possível a realização de simulações não somente a partir da implementação do MED, mas também MEF (Métodos dos Elementos Finitos) e SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) e LGM (*Lattice Geometric Model*).

Segundo Lima (2014), o processamento do Yade compreende basicamente três etapas:

- Etapa de Pré-processamento: Nesta etapa são determinadas todas as características físicas e geométricas e de simulação.
- Etapa de Processamento: O modelo constituído na etapa anterior é submetido a aplicação do MED, passando por um ciclo de repetições do processo, sendo assim processadas todas as informações.
- Etapa de Pós-processamento: É a preparação da visualização, através de animações e gráficos, dos resultados obtidos.

É possível criar diferentes tipos de geometria para os elementos discretos no Yade como: elipsoide, poliédrica, esférica ou aglomerados de tais elementos (DONZÉ, 2008). Contudo, até o momento, somente trabalhos com materiais esféricos foram validados, ao passo que pesquisas com outras formas geométricas estão sendo desenvolvidas. Este trabalho

considerou o carvão com forma esférica, uma vez que esta geometria reproduz de forma satisfatória o comportamento do carvão no *Coal Bunker*.

O software calcula a rigidez normal como a rigidez de duas molas, em que o comprimento das molas é dado igual ao comprimento do raio das esferas que estão em contato.

Tornou-se necessário a utilização de um segundo software, o *Paraview*, para o pós-processamento e análise de imagens. Trata-se de um software com capacidade de análise e visualização de dados de código aberto, com a vantagem da análise dos dados serem feitas de forma interativa em 3D. Assim como o Yade, a implementação do MED e as simulações são interpretadas a partir de um código escrito na linguagem Python, livre sob a licença *General Public License* (GPL), com a vantagem de ser compatível com sistemas operacionais *Linux* e *Windows*.

4 PARTE EXPERIMENTAL

Uma das principais motivações desta dissertação é estudar o comportamento da mistura de carvão no *Coal Bunker*, a partir da modelagem física e numérica computacional.

O presente trabalho faz parte do projeto de cooperação entre o programa da REDEMAT (Rede Temática em Engenharia de Materiais) e a Gerdau- Usina Ouro Branco. As análises de caracterização da mistura de carvões foram realizadas nas dependências da Unidade Piloto e no Laboratório de matérias-primas da Gerdau; e os testes nos modelos físico e computacional foram realizados nos Laboratórios de Física da Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente capítulo visa descrever os materiais, os equipamentos e a metodologia aplicada nesta pesquisa, com a descrição detalhada de cada passo. A Figura 4.1 apresenta, de maneira simplificada, o fluxograma das etapas experimentais seguidas ao longo deste trabalho.

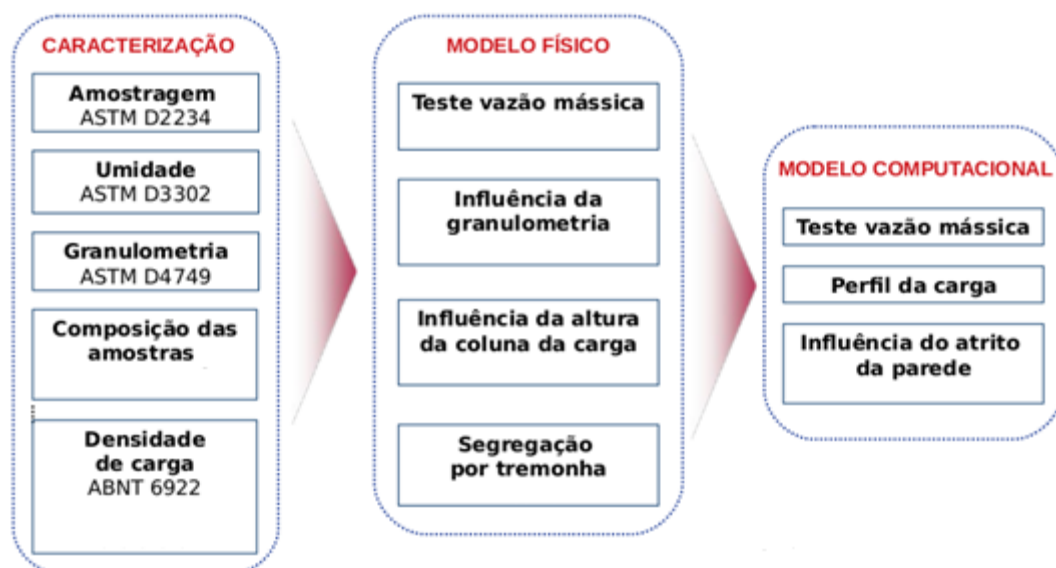


Figura 4.1: Fluxograma simplificado das etapas experimentais

A metodologia empregada consiste nas seguintes etapas:

1ª ETAPA: Amostragem (ASTM D 2234);

2ª ETAPA: Preparação e composição das amostras;

3ª ETAPA: Caracterização física e química da mistura de carvões, a partir das análises de granulometria (ASTM D 4749) , umidade (ASTM D 3302) e densidade de carga (ABNT 6922);

4ª ETAPA: Elaboração do modelo físico;

5ª ETAPA: Testes de fluxo no modelo físico;

6ª ETAPA: Avaliação da influência de algumas propriedades da mistura de carvões sob o fluxo granular, como: granulometria, umidade, densidade de carga, altura da coluna da carga e a segregação;

7ª ETAPA: Elaboração do modelo computacional;

8ª ETAPA: Testes de fluxo no modelo computacional;

9ª ETAPA: Validação do modelo computacional a partir dos dados gerados no modelo físico;

4.1 Amostragem

A mistura de carvões utilizada neste trabalho foi cedida pela Gerdau - Usina Ouro Branco. Trata-se de uma mistura de carvões padrão de coqueria convencional (*By-product coke recovery*), composta por um *blend* de 6 carvões com diferentes origens.

Todo o processo de amostragem foi conduzido segundo a norma ASTM D2234 (*Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal*). Foram coletados aproximadamente 240kg de amostra, retirada após o misturador de carvões, pois, assim, garantiu-se a homogeneidade da mistura.

4.2 Preparação e Composição das Amostras

Após a amostragem, as amostras foram preparadas de acordo com as normas, as quais visam de forma geral avaliar as propriedades físicas e químicas da mistura de carvões, conforme Figura 4.2.



Figura 4.2: Ilustra a etapa de preparação da amostra após o seu recebimento.

Foram compostas 6 amostras, com 10 kg cada, variando a umidade e a granulometria de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição das amostras

	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	AMOSTRA 6
GRANULOMETRIA	65 % <2,83mm	65 % <2,83mm	65 % < 2,83mm	85 % < 2,83mm	85 % < 2,83mm	85 % < 2,83mm
UMIDADE	0%	8%	12%	0%	8%	12%

4.3 Caracterização Física e Química da Mistura de Carvões

Uma breve descrição de cada uma das técnicas utilizadas para a caracterização do carvão é apresentada a seguir. Todas as amostras foram caracterizadas em duplicata.

A caracterização das amostras foram concentradas na análise granulométrica, determinação do teor de umidade e densidade. Leibrock (1983) cita a granulometria e umidade como os dois fatores fundamentais na influência da densidade da amostra.

4.3.1 Teste de Umidade

A determinação da umidade seguiu conforme a norma ASTM-D3302 (*Test Method for Total Moisture in Coal*). Para a avaliação da influência da umidade, foram compostas três amostras com diferentes teores, sendo elas:

- 0% umidade - Amostra seca;
- 8% umidade - Corresponde as condições de um dia normal de operação na usina;
- 12% umidade - Representa os dias chuvosos de operação;

Para a determinação da umidade, o ensaio consiste em aquecer a amostra sob condições controladas de tempo e temperatura, respectivamente, 1 hora e (105 ± 5) °C. Esta faixa de temperatura garante que somente a água superficial seja removida. As amostras são pesadas antes e depois do aquecimento, em balança analítica de menor divisão de 0,001 g. Assim, o teor de umidade é encontrado a partir do cálculo da Equação 4.1.

$$\% \text{ umidade} = \frac{\text{Massa inicial} - \text{Massa final}}{\text{Massa inicial}} * 100 \quad (4.1).$$

Para compor as amostras com 8 e 12% de umidade, o procedimento ocorreu da seguinte maneira: após a retirada das amostras da estufa a 105 °C por 1 hora, foi determinada a massa de água que deve ser adicionada, a partir do cálculo da Equação 4.1, para alcançar a umidade desejada. Posteriormente seguiu com a homogeneização da mistura e o armazenamento em recipiente livre do contato com o ar.

4.3.2 Teste de Granulometria

O peneiramento é uma técnica simples, utilizada para a classificação granulométrica dos materiais. O ensaio consiste em passar a amostra seca, em um conjunto de peneiras, na qual as aberturas das malhas são padronizadas.

O ensaio foi baseado na norma ASTM D4749 (*Test Method for Performing the Sieve Analysis of Coal and Designating Coal Size*) e prosseguiu da seguinte forma. A amostra é inserida em

um conjunto de peneiras padrão, montado em ordem decrescente (4 mm, 2,8 mm, 1,4 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,15 mm, < 0,15 mm) e, permanece sob agitação em um vibrador por 15 minutos. Após o peneiramento, as peneiras foram removidas e a massa retida em cada peneira foi pesada em balança de precisão de 0,001 g. A porcentagem retida em cada peneira foi dada pela relação entre a massa retida (m) e a massa total da amostra (M), conforme descrito na Equação 4.2.

$$P = \frac{m * 100}{M} \quad (4.2)$$

Com o objetivo de estudar a influência da distribuição granulométrica sobre o fluxo granular no *Coal Bunker*, foram compostas duas amostras, de aproximadamente 10 kg cada, com proporções distintas de partículas abaixo de 2,83 mm, conforme ilustra a Figura 4.3.

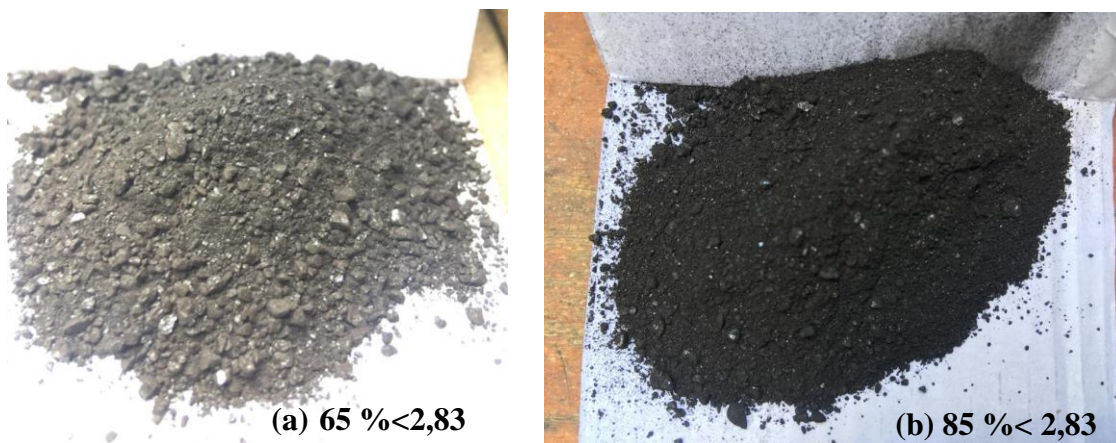


Figura 4.3: Granulometria das amostras (a) 65% e (b) 85% < 2,83 mm

- Amostra (a) → 65 % abaixo de 2,83 mm – amostra mais grosseira;
- Amostra (b) → 85 % abaixo de 2,83 mm – amostra mais fina;

4.3.3 Densidade de Carga

O ensaio de densidade de carga seguiu conforme a norma ABNT 6922 (Determinação da massa específica – densidade a granel).

As principais propriedades que influenciam a densidade de carga do carvão são a granulometria e a umidade, portanto foram compostas 6 amostras variando estas propriedades, conforme já mencionado na Tabela 4.1.

O teste consiste na queda de uma amostra de 20 kg sobre uma caixa, com as seguintes dimensões: 0,24 m² de área de base x 0,30 m de altura. Em seguida, o material foi nivelado na caixa e pesado em uma balança eletrônica, conforme ilustra a Figura 4.4.



Figura 4.4: Ensaio de densidade da mistura de carvão

A densidade de carga (D) é expressa pela razão da massa da amostra (M), pelo volume do recipiente (V), segundo a equação 4.3:

$$D = \frac{M}{V} \quad (4.3)$$

Para cada amostra, os testes foram realizados em duplicata, seguindo as recomendações da norma.

4.4 Modelo Físico

A modelagem física do Coal Bunker propõe o estudo do comportamento da mistura de carvão durante o carregamento e descarregamento, a partir de um modelo experimental em escala reduzida. As etapas foram divididas da seguinte forma:

- I) Construção do aparato experimental em escala reduzida de 1:50 com relação ao *Coal Bunker*.
- II) Realização dos ensaios de vazão mássica para as amostras pré-determinadas.
- III) Determinação da vazão mássica e perfil do fluxo.
- IV) Obtenção dos parâmetros de ajuste para o modelo numérico computacional.
- V) Tratamento estatístico dos resultados experimentais.

A concepção do aparato experimental inicia-se com a criação de um modelo 3D, desenvolvido no *software Fusion*, conforme ilustra a Figura 4.5. Posteriormente este é exportado para impressora 3D, e impresso em polímero de ácido polilático (PLA).

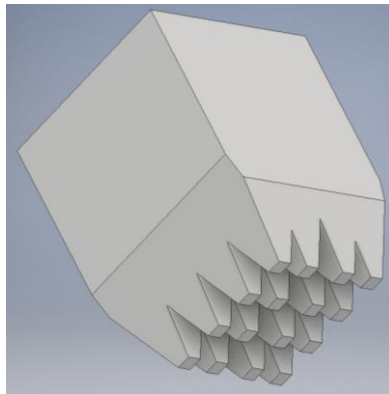


Figura 4.5: Modelo 3D criado no software Fusion

A escolha da técnica de impressão 3D, foi devido ao fato de se tratar de uma tecnologia que permite a produção de peças complexas com alta precisão, baixo desperdício de material, com atrativo preço de produção e rapidez. A Figura 4.6 ilustra o processo de impressão.

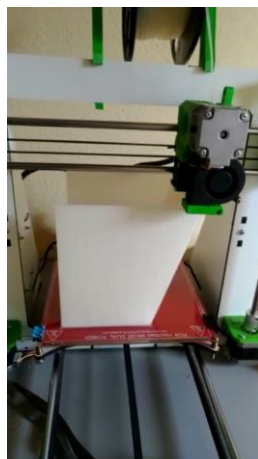


Figura 4.6: Impressão do modelo físico em impressora 3D

A escolha da escala de redução se deu em função do interesse em testar no modelo físico a mistura de carvões que é utilizada pela empresa em estudo, sem a necessidade de cominuição do carvão. Com base no exposto a escolha da escala de redução foi de 1:50.

Todas as características, bem como a geometria do *Coal Bunker*, foram replicadas no modelo físico, conforme pode ser observado na Figura 4.7. Formado por uma célula com oito tremonhas, o aparato apresenta as seguintes dimensões: 32 cm de comprimento, 16 cm de largura, 42 cm de altura, 2,5 cm a abertura de saída do material e 3 mm de espessura da parede.

Os experimentos realizados no modelo físico são fundamentais para a validação dos resultados das simulações computacionais.

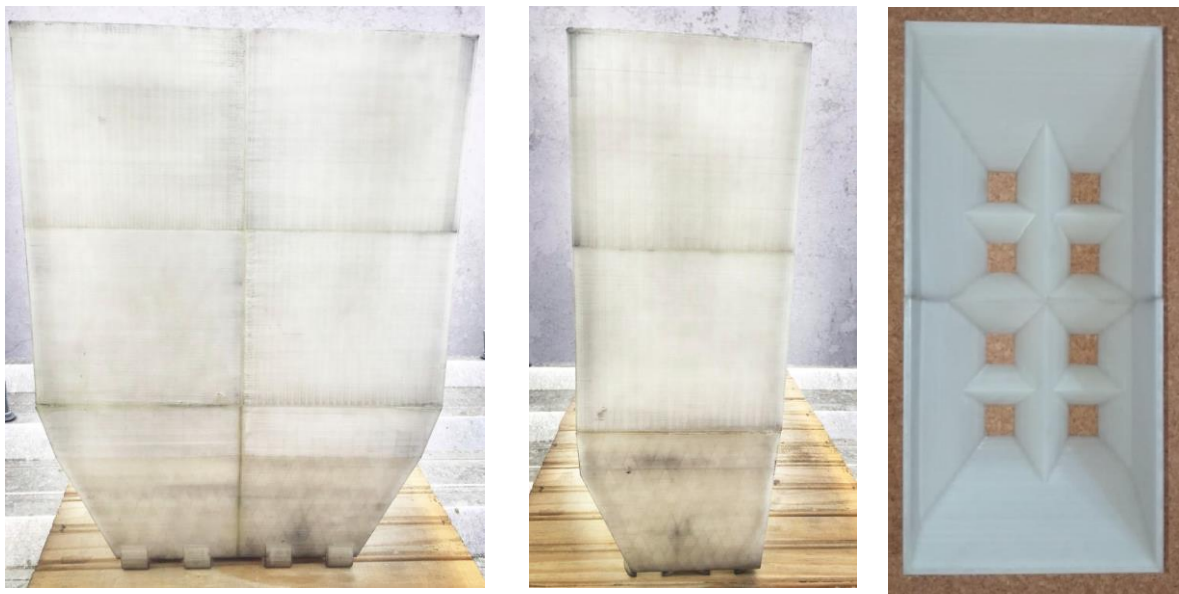


Figura 4.7: Modelo físico impresso

Para que as condições fossem mais próximas do real, todo o sistema de carregamento e descarregamento também foi reproduzido em escala reduzida.

4.5 Sistema de Carregamento

O transporte de materiais granulares no setor siderúrgico é basicamente realizado por meio de correias transportadoras e chutes de transferência. Para simular o sistema de carregamento, foi construída uma mini correia transportadora em MDF (*Medium Density Fiberboard*), e para o movimento contínuo da correia, foi utilizado um motor de 220 V.

A correia é alimentada por um silo localizado logo acima desta, conforme ilustra a Figura 4.8.



Figura 4.8: Sistema de carregamento, mini correia transportadora

O abastecimento do modelo físico deve ocorrer de maneira controlada, com um fluxo de alimentação estável, tudo isso para evitar a formação de vazios na correia transportadora.

4.6 Sistema de Descarregamento

O sistema de descarregamento foi adaptado do sistema utilizado na Gerdau, pois para conhecer o comportamento do escoamento de cada tremonha é necessário que o material seja contido em coletores individuais. Para isto foi construído quatro caixas em MDF, com as seguintes dimensões: 7 cm de largura, 27 cm de comprimento e 30 cm de altura, conforme ilustra a Figura 4.9.



Figura 4.9: Sistema descarregamento

4.7 Teste de Vazão Mássica no Modelo Físico

O teste de descarregamento no modelo físico foi realizado da seguinte forma: com as tremonhas fechadas, a mistura de carvões é carregada no silo de alimentação, por força da gravidade, o material atinge a correia transportadora, a qual transporta todo o material, e por fim, projeta-o para dentro do modelo físico.

Após um certo tempo de acomodação das partículas de carvão dentro do silo, faz-se a abertura de 4 tremonhas da mesma fileira, enquanto as outras permanecem fechadas. O descarregamento é sempre realizado em ciclos alternados, de tal forma que, enquanto quatro comportas permanecem abertas, as outras se mantêm fechadas. Ao fim do ciclo, o aparato deve ser esvaziado antes de iniciar outro teste. Dessa forma, evita-se a segregação e a consolidação das partículas dentro do silo.

Abaixo do silo encontram-se quatro caixas coletoras que estão posicionadas acima de uma balança de precisão de 0,001 g; para a determinação da massa escoada. Com a ajuda de um cronômetro digital com precisão de 0,01 s, o tempo de descarregamento é cronometrado.

Todos os experimentos foram filmados, com o uso de uma câmera posicionada logo acima da balança e do cronômetro. Após a execução dos ensaios de forma sequencial e padronizada, as filmagens foram analisadas, e então, determinada a vazão mássica, ou seja, a razão entre a massa escoada em função do tempo (g/s). Caso ocorresse a obstrução total ou parcial em alguma das tremonhas, o teste era reiniciado. A Figura 4.10 ilustra o ensaio de fluxo.



Figura 4.10: Teste de fluxo no modelo físico

Adicionalmente, buscou-se avaliar o comportamento do fluxo granular quando exposto a diferentes condições de carregamento, alterando a distribuição granulométrica e a altura da coluna da carga.

4.7.1 Teste de Vazão Mássica Variando a Distribuição Granulométrica

O objetivo deste teste é avaliar a influência da distribuição granulométrica sobre o fluxo granular. Para isto foi realizado o teste de fluxo com as seguintes amostras:

- Amostra 1 → 65% abaixo de 2,83 mm – amostra mais grosseira;
- Amostra 2 → 85% abaixo de 2,83 mm – amostra mais fina;

O ensaio de fluxo ocorreu sob a mesma condição para as duas amostras, conforme descrito no item 4.7. Caso ocorresse obstrução parcial ou total em alguma tremonha, o teste era reiniciado.

4.7.2 Teste de Vazão Mássica Variação a Altura da Coluna da Carga

O teste tem como objetivo avaliar a influência da altura da coluna da carga sob o escoamento, para isto, o silo foi carregado em cinco níveis diferentes de carga, que correspondem a 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % da sua capacidade total.

O ensaio de fluxo ocorreu sob a mesma condição para todas as amostras, conforme descrito no item 4.7. Caso ocorresse obstrução parcial ou total em alguma tremonha, o teste era reiniciado.

4.7.3 Avaliação da Segregação por Tremonha

A finalidade deste teste foi avaliar a existência da segregação, nas diferentes tremonhas. Para isto foi construído 4 caixas individuais para coletar o material proveniente do descarregamento de cada tremonha. Após o teste de fluxo, conforme o item 4.7, as amostras, presentes em cada caixa, foram peneiradas individualmente, conforme o item 4.3.2 (Teste de granulometria) nas seguintes malhas: +1,75 mm; +1,00 mm; +0,600 mm; +0,350 mm; - 0,350 mm, para avaliação do percentual retido no abaixo de 0,350 mm.

4.8 Modelo Numérico Computacional

As simulações se concentraram na replicação dos experimentos realizados no modelo físico, buscando assim a validação do protótipo virtual.

A modelagem numérica computacional, utilizando o software *Yade*, foi dividida nas seguintes etapas:

- A construção do modelo computacional a partir da replicação da geometria e das características básicas de operação do aparato experimental.
- Levantamento dos parâmetros de análise e as propriedades relevantes tanto para o carvão quanto para a geometria confinante.
- Desenvolvimento do *script* base em linguagem *Python*.

- Análise do comportamento das simulações buscando a reprodução numérica do modelo físico.
- Análise comparativa entre os dois modelos.

O processamento no *Yade*, é dividido em três etapas. A primeira é o pré-processamento, onde é definido a geometria do silo e as propriedades do material que compõe a sua parede, bem como as propriedades do carvão, as condições de contorno empregadas, restrições e passo de tempo. A segunda etapa é o processamento, onde o algoritmo construído apresenta um ciclo de repetição de processos, descrevendo assim o comportamento dinâmico do meio. Por fim, a terceira etapa é a visualização dos resultados.

Para que a simulação computacional apresente resultados com boa aproximação das condições replicadas no modelo físico, é fundamental que os parâmetros de calibração inseridos no script estejam de acordo. Os valores dos parâmetros utilizados neste trabalho, parte foram baseados na literatura disponível e a outra parte foi obtida a partir de testes em laboratório. A Figura 4.11 traz as informações a respeito das propriedades do carvão e do PLA que foram utilizadas no código.

Variável	Carvão	PLA
Raio médio da partícula (mm)	3	-
Desvio padrão raio (mm)	0,00	-
Densidade (kg/m ³)	700	1250 [b]
Coefficiente de Poisson	0,25 [a]	0,36 [b]
Módulo de Young (Pa)	4.e9 [a]	1.28e9 [b]
Ângulo de atrito (Graus)	30 [a]	6 [b]
Coefficiente de amortecimento	0,02	
Passo de tempo da simulação	3,27E-01	

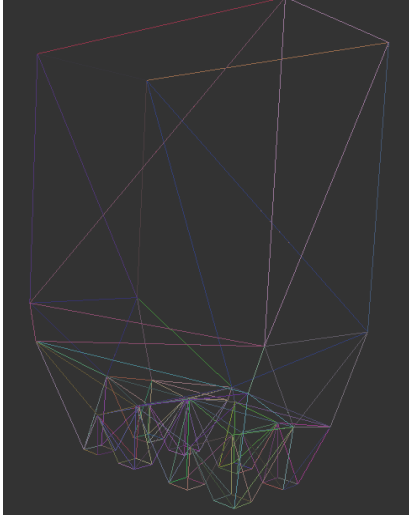


Figura 4.11: Parâmetros modelo computacional

Os parâmetros que foram obtidos em laboratório foram o tamanho médio da partícula e a densidade de carga. Um destaque para o tamanho da partícula, pois esta propriedade física exerce uma grande influência no comportamento do fluxo granular, visto que, em função dela, a porosidade e a densidade podem alterar, entre outros efeitos. O tamanho médio das

partículas de carvão e o desvio padrão, utilizados na simulação foram obtidos a partir dos ensaios de granulometria feitos em laboratório.

Os outros parâmetros de calibração como módulo de Young, coeficiente de Poisson e o ângulo de atrito, tanto para o carvão quanto para o PLA, foram obtidos a partir de dados presentes na literatura.

Outro parâmetro importante é a modelagem da partícula. Mesmo o carvão não sendo esférico, optou-se por utilizar o modelo da esfera única, a fim de simplificar os cálculos. A mistura de carvão apresenta uma granulometria dispersa e heterogênea, sendo que 85% das partículas estão abaixo de 2,83mm, então considerou o tamanho médio e seu desvio padrão respectivamente iguais a 2,83 mm e 0,11 mm.

O modelo de contato implementado foi o modelo linear clássico de Cundall (1979). A razão desta escolha foi em função da sua simplicidade, facilidade de implementação e otimização da demanda computacional.

Além dos parâmetros que descrevem a constituição do carvão, do PLA e as suas interações, outros parâmetros também são necessários, como por exemplo, o coeficiente de amortecimento e o passo de tempo da simulação. O coeficiente de amortecimento é usado no MED para considerar a dissipação da energia cinética do sistema, e para acelerar a convergência para o estado quase estático de equilíbrio. No Yade, este coeficiente tem como valor padrão de 0,2, podendo ser ajustado. Foram realizadas várias simulações testando diferentes valores para o coeficiente de amortecimento, até que a vazão mássica encontrada seja próxima dos experimentos.

O hardware disponível para a simulação foi uma estação de trabalho com sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS, com processador Xeon 2600 de oito núcleos e 2.99 GHz, com 64 GB de memória RAM.

4.8.1 Teste de Vazão Mássica no Modelo Numérico Computacional

A simulação inicia-se com a geração de um pacote de partículas virtuais, com uma quantidade suficiente para preencher toda a geometria do silo. Os carvões apresentam formatos irregulares. Porém, neste trabalho foram considerados esféricos. As partículas com uma faixa granulométrica estabelecida são sorteadas aleatoriamente segundo uma distribuição estatística uniforme.

As placas de bloqueio das tremonhas permaneceram fechadas até que todas as partículas caem sob a ação da gravidade e em seguida permaneçam estáticas. Após atingir o estado de equilíbrio, 4 tremonhas da mesma fileira são abertas. A simulação de descarga continua até que todas as partículas tenham escoado e no final seja gerado a vazão mássica. A Figura 4.12 ilustra o teste de vazão mássica no modelo computacional.

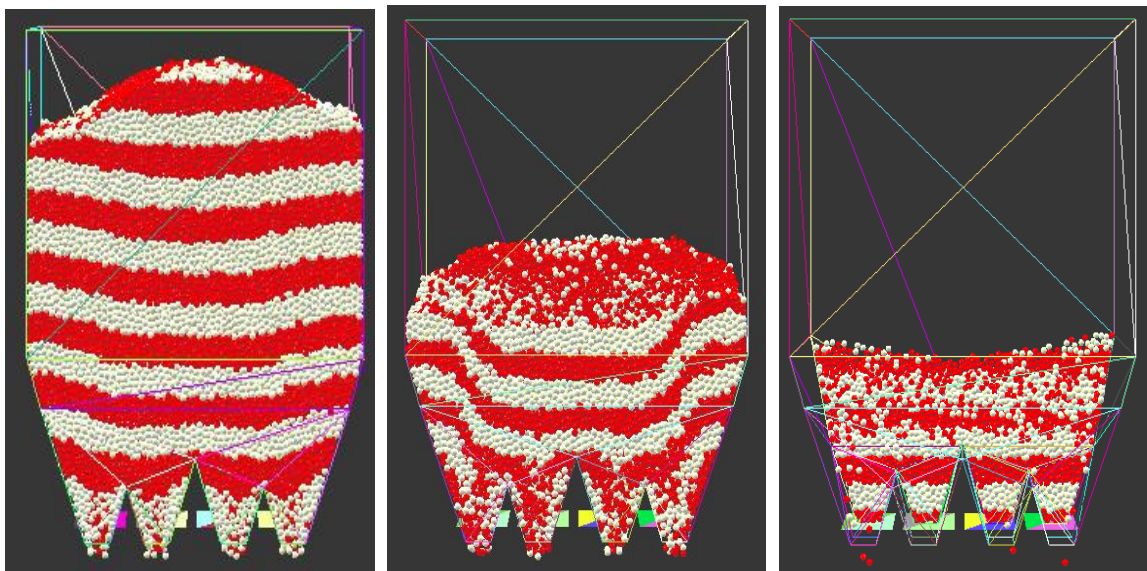


Figura 4.12: Modelo computacional no Yade

O modelo de rigidez adotado nesta pesquisa, para os contatos entre partícula – partícula e partícula - parede, foi o modelo linear. O algoritmo usado no *Yade* calcula a rigidez normal de interação como a rigidez de duas molas com comprimento igual ao raio de esfera.

Para que o tempo computacional fosse reduzido, foi necessário a paralelização com o uso de 8 *threads*. Ainda assim o tempo computacional permaneceu elevado, demorando em média 30 dias para geração dos dados da vazão mássica em função do tempo, para cada ciclo de teste. Os dados gerados pela simulação no *Yade* foram importados para o programa *Paraview*, para a visualização dos resultados obtidos na forma de gráficos e animações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do Carvão

Os ensaios de caracterização da mistura de carvões através das análises de granulometria, umidade e densidade de carga foram realizados com sucesso e os resultados são apresentados a seguir.

5.1.1 Análise Granulométrica

Com a análise granulométrica foi possível identificar como a mistura de carvões se distribui em diferentes faixas de tamanhos. A Figura 5.1 apresenta a curva de distribuição normal da mistura industrial utilizada na coqueria. Em média 85 % da mistura está abaixo de 2,83 mm, com tamanho médio de partícula igual a 0,77 mm e desvio padrão de 0,11 mm. Observou-se também que a maior parte da população de partículas concentra-se na faixa 0,15 mm a 1,4 mm, apresentando tamanhos dentro de um intervalo ótimo para o processo de coqueificação.

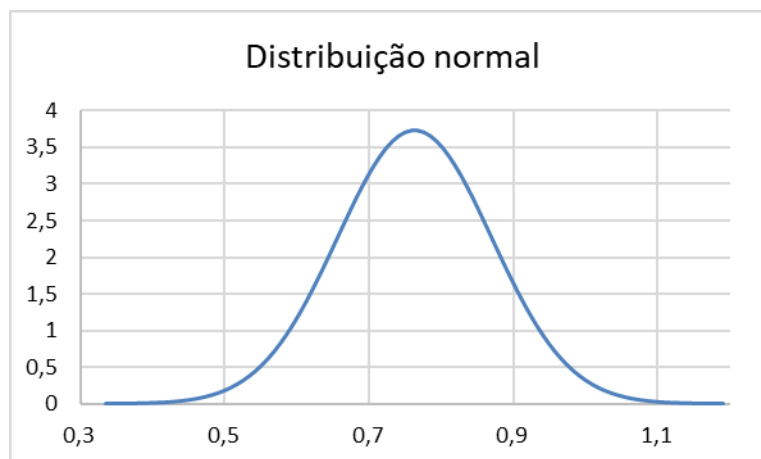


Figura 5.1: Curva de Distribuição Normal da Mistura de Carvão

5.1.2 Determinação da Densidade de Carga e sua Correlação com a Granulometria e a Umidade

A Figura 5.2, mostra os resultados do teste de densidade de carga em função da variação da granulometria (65 % e 85 % < 2,83 mm) e para diferentes teores de umidade (0 %, 8 % e 12 %).

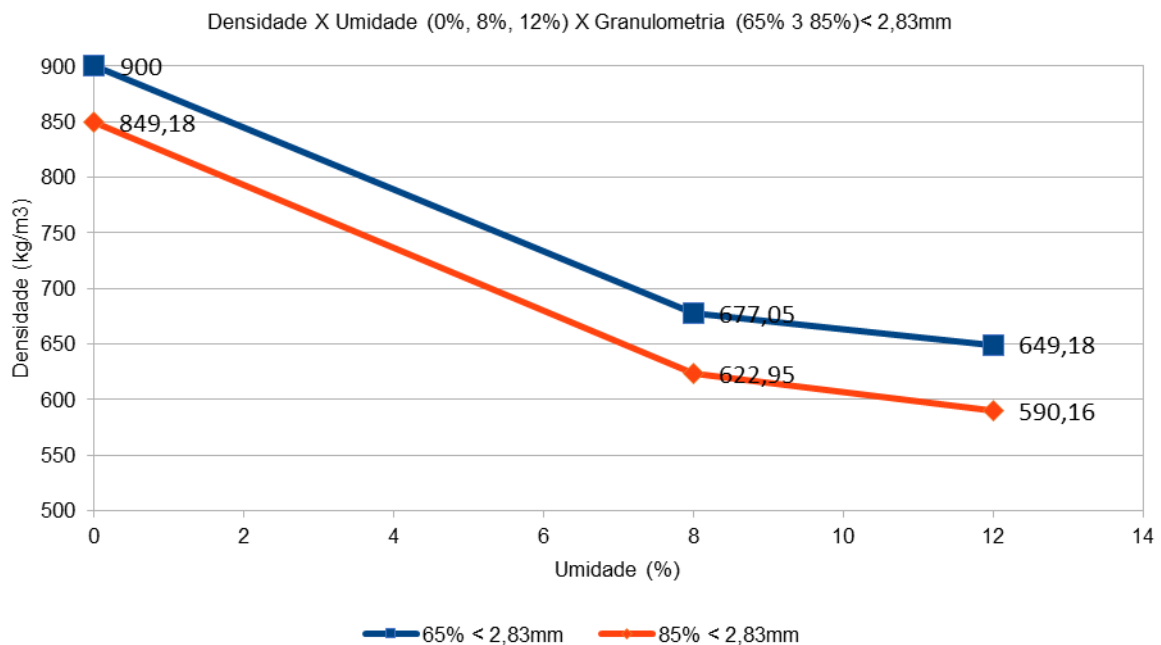


Figura 5.2: Resultado dos testes de densidade variando a umidade e a granulometria

As principais propriedades que influenciam a densidade de carga do carvão são a granulometria e a umidade. Com relação a influência da granulometria, observou-se que as amostras com 65 % apresentaram uma maior densidade quando comparado com as amostras de 85 %. Isto ocorre devido ao fato das amostras de 65 % apresentarem uma menor quantidade de finos e estes estão melhor distribuídos nos interstícios das partículas maiores. Ao passo que as amostras de 85 % apresentam uma maior porcentagem de finos, o qual os interstícios já estão saturados por esses finos.

Portanto, conclui-se que a densidade de carga diminui junto à quantidade de finos da mistura, ou seja, quanto maior a porcentagem abaixo de 2,83 mm na mistura, menor a densidade de carga. O efeito da granulometria está ligado basicamente ao empacotamento dos grãos de carvão.

Em se tratando da influência da umidade sobre a densidade de carga, o aumento da umidade contribui para a diminuição da densidade de carga, portanto as amostras com 12 % de umidade apresentaram uma menor densidade de carga, comparado com as amostras de 8 % e 0 %. Isto ocorre porque o carvão sendo altamente higroscópico absorve a água presente nos interstícios das partículas de carvão. A presença de uma camada de líquido na superfície das partículas pode aumentar a coesão entre as partículas.

O aumento da densidade tem impacto direto nos parâmetros da qualidade do coque como efeito da aproximação das partículas de carvão que garantem o contato efetivo durante a fase plástica, produzindo um coque com melhores propriedades. Por isso, considerando as duas propriedades em conjunto, a maior densidade de carga pode ser alcançada nas amostras secas com granulometria de $65 \% < 2,83 \text{ mm}$.

5.2 Resultados do Teste de Vazão Mássica no Modelo Físico

Os resultados dos ensaios de vazão mássica no modelo físico foram divididos segundo:

- A influência da granulometria sob o escoamento;
- A influência da altura da coluna da carga sob o escoamento;
- O efeito da segregação nas tremonhas individuais;

Foram realizadas simulações de carregamento e descarregamento no modelo físico com as amostras de 65% e $85 \% < 2,83 \text{ mm}$; e 0% , 8% e 12% de umidade. Todos os testes realizados com as amostras de 8% e 12% de umidade, nenhuma apresentou fluxo, portanto, todos os testes foram realizados com as amostras secas. Uma explicação é devido ao fato que na amostra seca, as partículas estão livres da interação da umidade.

Para as amostras secas com 65% e $85 \% < 2,83 \text{ mm}$, apenas em parte dos ensaios ocorreu fluxo pleno, sem interrupção parcial ou total das tremonhas, portanto apenas os ensaios onde não houve obstrução foram analisados os resultados. Isso ocorreu em função da relação entre a diagonal da abertura da descarga (D), igual a 3 cm , e o diâmetro da maior partícula (d), corresponde a $4,0 \text{ mm}$. Para evitar uma alta frequência de obstrução, e alcançar um fluxo

pleno, o indicado é que a dimensão da abertura da tremonha seja de oito a dez vezes maior que o diâmetro máximo da partícula de carvão.

Os resultados da vazão mássica média foram usados como parâmetros de ajuste e calibração do modelo numérico e encontram-se disponíveis nos Anexos.

5.2.1 Influência da Granulometria sob o Escoamento

A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos, da influência da granulometria, sob o descarregamento, para as amostras secas de 65 % e 85 % < 2,83 mm. O resultado apresentado representa a média dos seis ensaios do total de 20 realizados que apresentaram fluxo livre sem obstrução nas tremonhas. Observa-se que as amostras com uma menor quantidade de finos (65% < 2,83 mm) apresentam uma maior vazão mássica média quando comparado com as amostras com maior presença de finos (85% < 2,83 mm).

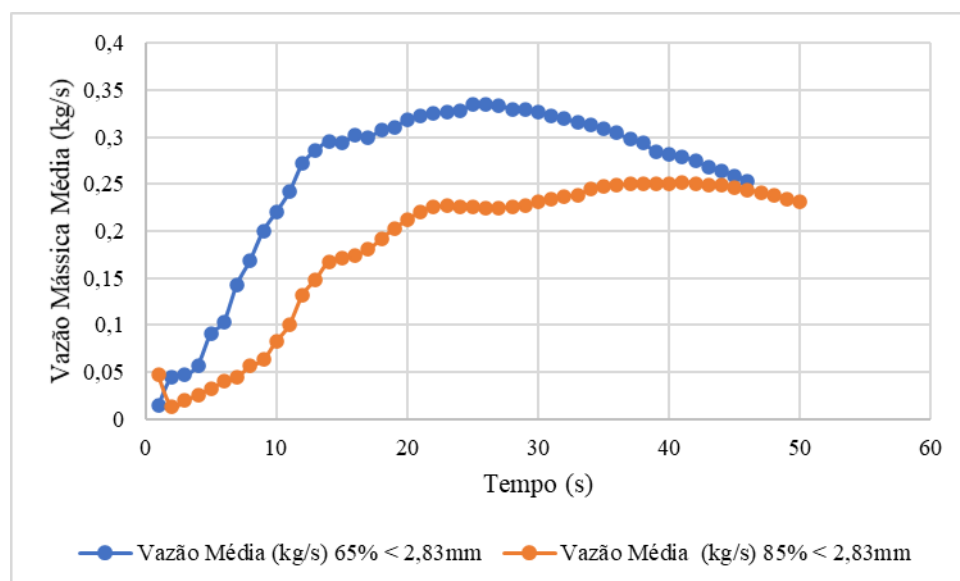


Figura 5.3: Influência da granulometria sob o escoamento nas amostras secas

Dentro do silo as partículas estão sujeitas a ação de forças externas e internas, e a interação destas forças tem influência direta na forma como estas partículas fluem. Nas partículas mais grosseiras, a influência da força externa, peso da partícula, é maior do que as forças internas, enquanto para as partículas mais finas verifica-se o contrário.

A partir das análises dos resultados dos testes de vazão mássica, verifica-se que com relação as amostras com 65% < 2,83 mm, o escoamento é mais suave e progressivo, enquanto as amostras com 85 % < 2,83 mm, parecem fraturar-se e escoar na forma de “avalanches”. Este comportamento se reflete no gráfico 5.3, onde se pode observar uma vazão mais linear para as amostras de 65 %, enquanto nas amostras de 85 % a vazão não é linear e ainda apresenta picos, exatamente em função do escoamento em “avalanches”.

Um outro fator a se considerar é a heterogeneidade da distribuição granulométrica da mistura de carvões. Durante o descarregamento algumas partículas se comportam como pó coesivo. Segundo Coelho (2007), o fato de o pó coesivo parecer fraturar mais do que escoar sugere que as forças internas neste pó têm uma intensidade muito grande comparada com o peso das partículas, sendo por isso necessário para vencê-las, não o peso de uma, mas o de muitas partículas. Por isso se movem em blocos, confirmando o resultado encontrado na Figura 5.3.

Ainda segundo Coelho (2007), abaixo de uma certa dimensão as partículas tendem a mover-se em conjunto, já que as forças internas se tornam comparáveis às externas. O fato das partículas se moverem em conjunto, ou seja, como se a unidade independente deixasse de ser partícula e passasse a ser um agregado de partículas, contribui para um aumento da porosidade, e conseqüentemente, uma diminuição da densidade de carga, indo de encontro com os resultados apresentados na Figura 5.2.

Estes resultados estão de acordo com o Fitzpatrick et al. (2004), que afirmam que mudanças no escoamento podem ser perceptíveis se o tamanho das partículas diminui, pois, a área de contato entre as partículas fica maior, aumentando a interação entre as forças coesivas. Esta análise converge para os resultados encontrados no teste de densidade de carga, onde as amostras de 65 % < 2,83 mm apresentam uma maior densidade de carga, pois as partículas menores encontram-se mais bem distribuídas pelos espaços vazios da amostra. Porém, a densidade tende a diminuir com o aumento da umidade.

Portanto, conclui-se que a dimensão das partículas não é o único fator que afeta a vazão mássica, a densidade e a porosidade também.

Os Anexos A.1 e A.2 apresentam as planilhas com os resultados dos testes de vazão mássica variando a granulometria em 65 % e 85 % < 2,83 mm.

5.2.2 Efeito da Altura da Coluna da Carga sob o Escoamento

Para avaliar a influência da altura da coluna da carga, foram realizados testes de vazão mássica variando a altura da carga em: 20, 40, 60, 80 e 100% da capacidade total do volume do silo.

A Figura 5.4 ilustra o efeito da altura da coluna da carga sobre o escoamento. É possível observar que um aumento gradativo desta altura contribui para um aumento da vazão mássica. A partir dos testes é possível concluir que o silo a uma capacidade de 20 % apresenta uma baixa vazão (0,15kg/s), acima de 40 % e abaixo de 80 % tem-se um aumento da vazão ($0,20\text{kg/s} < \text{vazão} < 0,25\text{kg/s}$), porém, torna-se mais discreto, sendo que acima de 80 % seria a capacidade ideal de operação, em função da maior vazão mássica do *Coal Bunker* (0,30kg/s).

A partir da análise da Figura 5.4, é possível observar que um aumento da pressão da coluna da carga promove uma diminuição da porosidade do material, e conseqüentemente uma maior vazão mássica.

Portanto conclui-se que a altura livre da superfície do material no silo (parte vertical) pode ter um efeito significativo no padrão de fluxo, influenciando diretamente na vazão mássica, conforme ilustra a Figura 5.4.

O Anexo A.3 apresenta as planilhas com os resultados dos testes de vazão mássica variando a altura da coluna da carga em 20, 40, 60, 80 e 100% do volume total do silo.

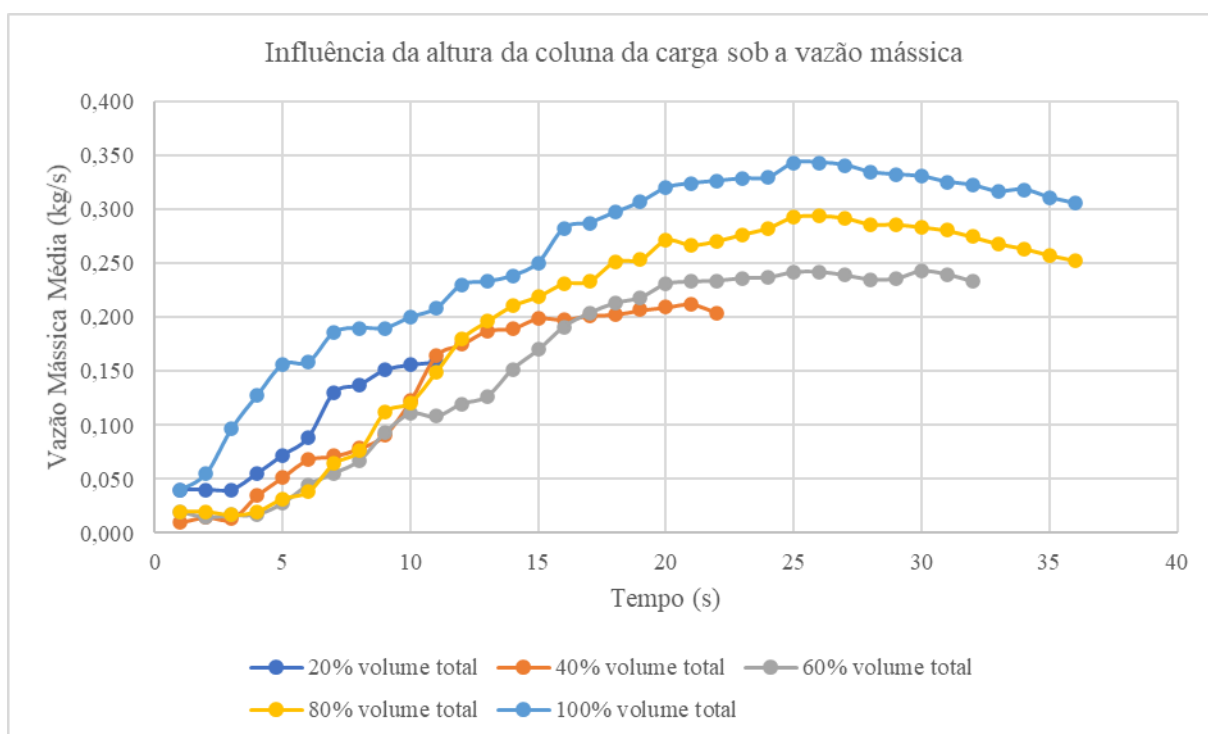
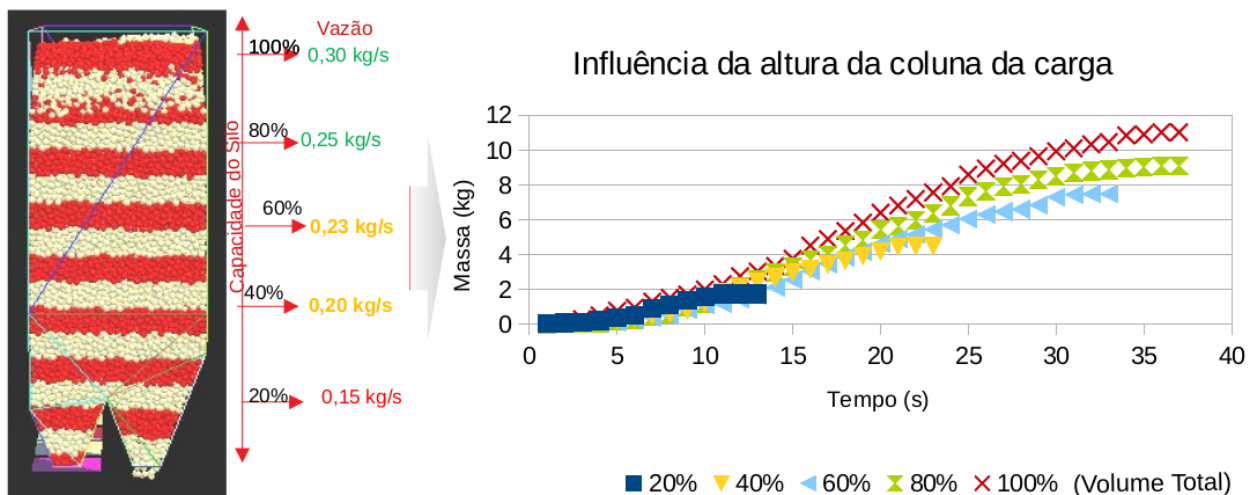


Figura 5.4: Influência da altura da coluna da carga

5.2.3 Efeito da Segregação por Tremonha Individual

Foram realizadas simulações de descarregamento no modelo físico para avaliar a influência da segregação nas tremonhas individuais, nas amostras secas com 85 % < 2,83 mm, pois estas amostras estão mais próximas da condição real de operação do *Coal Bunker*.

As partículas maiores se comportam de forma diferente das menores, sendo que, as partículas maiores apresentam uma maior tendência de rolarem do topo indo em direção a parede do silo, quando comparado com as partículas finas, originando a segregação. É possível observar no gráfico da Figura 5.5, uma maior presença de finos (<0,349), nas tremonhas 2 e 3, que corresponde as tremonhas centrais.

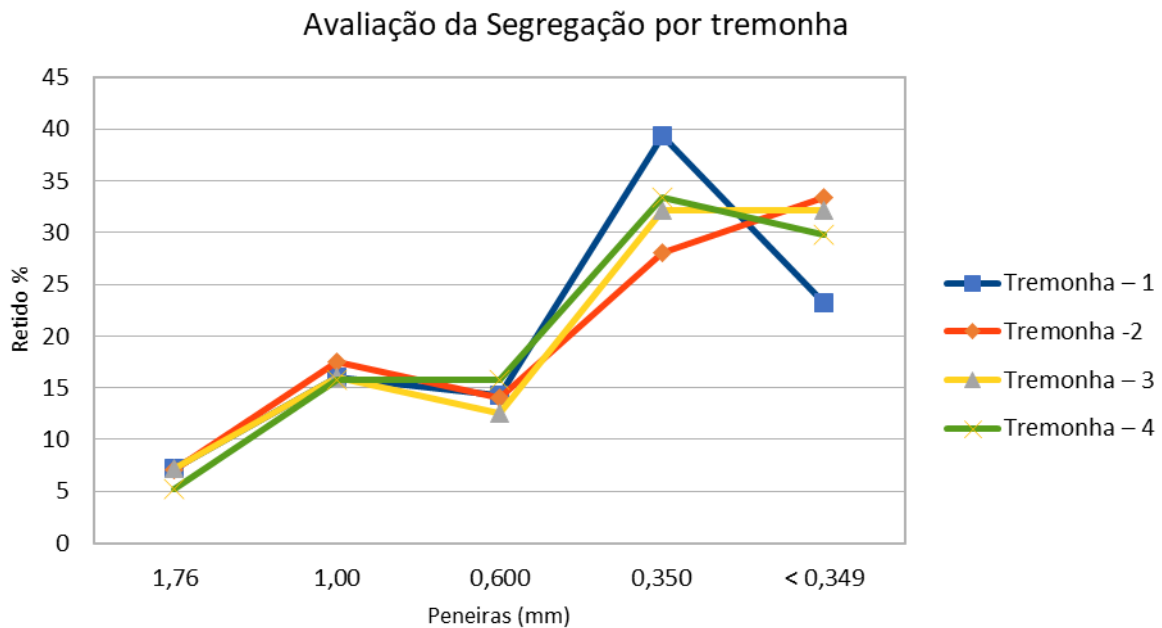


Figura 5.5: Segregação por tremonha: centrais (2 e 3); próxima a parede (1 e 4)

As tremonhas 1 e 4 correspondem as tremonhas de extremidade, justamente onde as partículas têm um maior contato com a parede da geometria confinante, logo ficam mais sujeitas ao atrito.

Portanto, por mais que estes resultados não tenham sido tão expressivos, ainda assim permitiram identificar um pequeno indício de segregação de partículas nas tremonhas centrais com uma maior presença de finos.

A existência do mecanismo de segregação de matérias-primas já no interior do silo durante o seu carregamento, pode também ser observado no trabalho de Lima (2014). Segundo este autor, esta valiosa informação pode ser levada em conta, e então, adotar-se ações para mitigar

os efeitos deste fenômeno, que no caso do *Coal Bunker* poderia ser mudanças na: inclinação, velocidade e angulação do distribuidor rotativo que direciona o material para o interior do silo.

5.3 Resultados do Modelamento Numérico Computacional

Os testes da modelagem numérica seguiram conforme os experimentos realizados no modelo físico, visando à convergência de ambos os resultados, dividido da seguinte forma:

- Definição dos parâmetros utilizados na modelagem;
- Teste de vazão mássica;
- O efeito do atrito na parede do silo;

5.3.1 Definição dos Parâmetros

Os parâmetros inseridos no YADE podem ser obtidos a partir de análises em laboratório, literatura disponível, ou ainda a partir de calibração.

Os parâmetros, tamanho da partícula e densidade foram determinados em laboratório, enquanto as propriedades módulo de Young, coeficiente de Poisson e o ângulo de atrito, foram usados valores disponíveis na literatura. Para o fator de amortecimento (*damping*) foi necessário a calibração deste parâmetro.

O fator de amortecimento aplicado no MED, com a finalidade de considerar a dissipação da energia cinética do sistema, tem como valor padrão no *Yade* de 0,2. Foram realizadas várias simulações variando o *damping* com valores de: 0,00; 0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4 a fim de alcançar uma convergência com os resultados obtidos no aparato experimental.

As primeiras simulações foram sujeitas a um procedimento de calibração do *damping* utilizando o valor padrão do *Yade* de 0,2, porém os resultados não foram satisfatórios, uma vez que a curva da vazão mássica não coincidiu com os dados experimentais. O mesmo pode-se dizer para os valores de 0,00; 0,02; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4. Somente quando usado o *damping* de 0,05 os resultados foram satisfatórios.

Logo o coeficiente de amortecimento de valor 0,05 implementado no Yade, pode ser considerado um valor ideal para as demais simulações deste trabalho.

5.3.2 Resultados do Teste de Fluxo no Modelo Computacional

A Figura 5.6 mostra um comparativo entre a vazão mássica da simulação computacional e o modelo físico. Como pode ser observado o escoamento do carvão no modelo físico apresenta uma curva sigmoide enquanto o modelo computacional apresenta um comportamento linear. Ainda assim, a simulação conseguiu prever o comportamento do fluxo de descarga com boa precisão ao representar a vazão mássica do experimento.

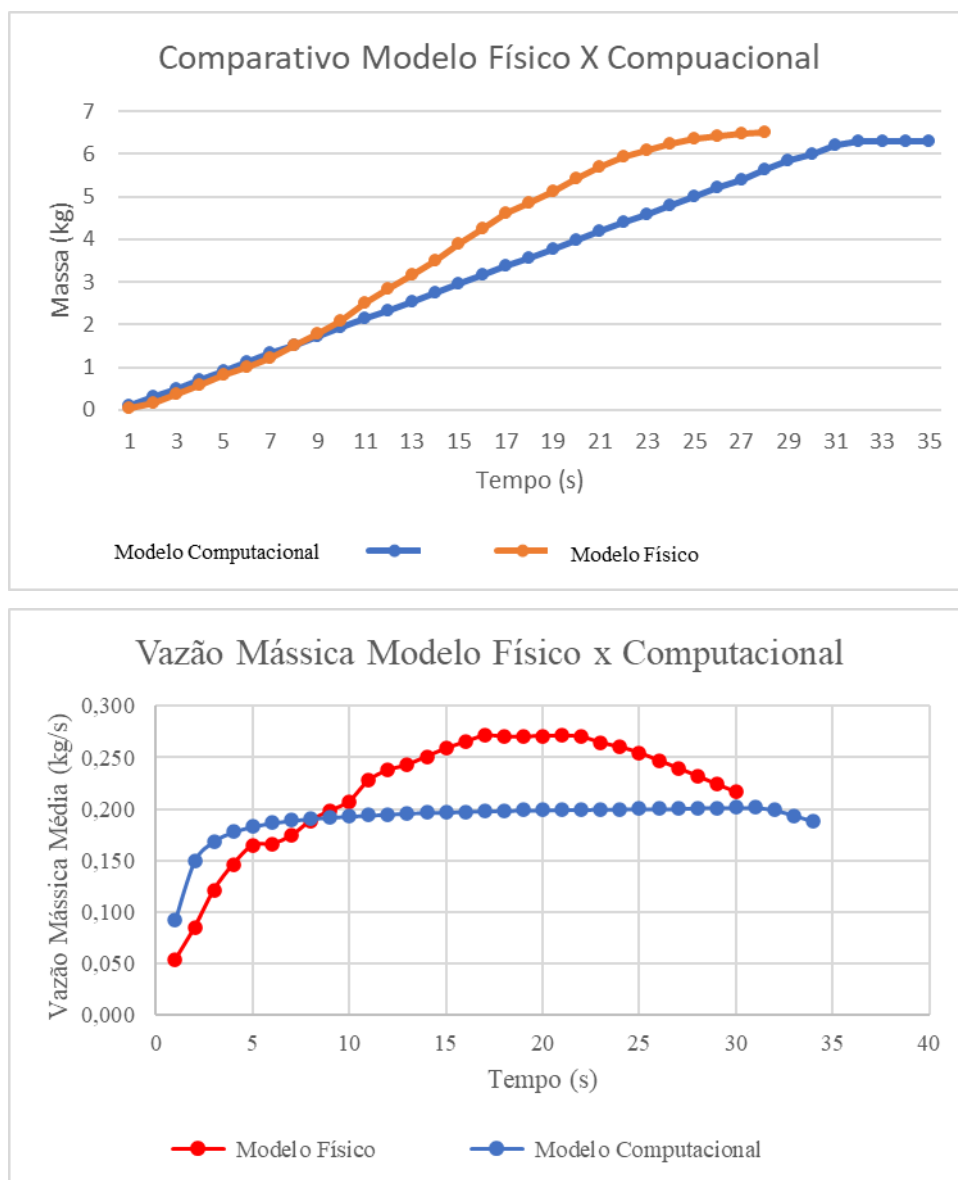


Figura 5.6: Comparativo entre modelo físico e computacional

A forma das partículas é um fator importante ao se realizar simulações no MED, pois ao alterá-la vários outros fatores são modificados, porém o YADE apresenta uma certa limitação quanto ao uso de outras geometrias, para as partículas que não sejam circulares, em função da dificuldade da detecção do contato entre as partículas.

A vazão média da massa escoada em função do tempo do modelo computacional foi igual a 3,35 kg/s, valor próximo e coerente com os resultados obtidos no modelo físico, de 3,55 kg/s, para mesma faixa granulométrica. Justifica-se a diferença entre os resultados devido ao fato que no modelo numérico as partículas são perfeitamente esféricas, e dessa forma, rolam mais. Por isso, o modelo numérico é mais restritivo em relação ao fluxo, porém a ordem de grandeza da vazão mássica e o tempo de descarregamento foram similares, sendo que no modelo físico foi igual a 27 segundos e no modelo computacional igual a 31 segundos.

Portanto, conclui-se que a simulação numérica possui vários pontos positivos. Entretanto, ela não deve ser considerada como substituta dos métodos tradicionais, que são igualmente fundamentais para o entendimento do comportamento do fluxo granular. Desta forma, a simulação numérica deve ser vista como uma abordagem complementar aos métodos analítico e experimental, trazendo vários benefícios para o projeto, como uma maior riqueza dos detalhes.

O Anexo A.4 apresenta as planilhas com os tempos de descarga para cada um dos testes realizados nos modelos físico e computacional.

5.4 Efeito do Atrito da Parede do Coal Bunker

Os sólidos quando armazenados tem a capacidade de transmitir tensões entre as partículas e as paredes do silo. A partir dos testes nos modelos físico e computacional, é possível constatar o efeito do atrito nas paredes laterais do silo e nas tremonhas. Estes resultados concordam com os dados obtidos por Keppler (2011), no qual o autor afirma que as camadas localizadas mais próximas às paredes laterais sofrem grande influência do atrito, retardando o fluxo.

O atrito influencia diretamente no perfil de escoamento da carga, promovendo uma vazão mássica não uniforme entre as quatro tremonhas abertas. Portanto, o fluxo das partículas de carvão entre as 4 tremonhas é heterogêneo, muito em função do atrito e da geometria do silo.

É possível observar na Figura 5.7 que as duas tremonhas centrais sofrem um menor efeito do atrito da parede do silo, e as suas partículas estão em velocidade quase que constante durante o descarregamento, diferentemente das tremonhas que estão em contato direto com a parede lateral do silo. As partículas que estão localizadas próximas e em contato direto com as paredes apresentaram uma velocidade de descarga mais baixa durante todo o tempo de simulação e uma menor vazão mássica. A explicação para este fenômeno pode estar ligada ao fato do coeficiente de atrito partícula – superfície (parede) ser maior que o partícula – partícula. Outra explicação possível para esse fenômeno é que a geometria do *Coal Bunker* pode favorecer este perfil de escoamento do material.



Figura 5.7: Perfil de escoamento da carga

Estas diferentes velocidades verticais podem resultar em diferentes tempos de residência das partículas de carvão no silo, como pode ser verificado na Figura 5.8 (a), onde é possível observar no modelo físico, a presença de acúmulo de carvão nas paredes laterais. Este

material estagnado compromete a capacidade real do silo e as características físico-química da mistura de carvão, que será carregada nos fornos de coqueificação.

Estes resultados vão de encontro com os resultados de Lima (2014), que estudou o efeito do atrito em modelos experimental e numérico computacional, para o estudo do fluxo granular de soja em um secador. Este autor observou que quanto mais próximo das paredes e das calhas a partícula permanecer, maior é o efeito do atrito, e mais lento é o seu fluxo.

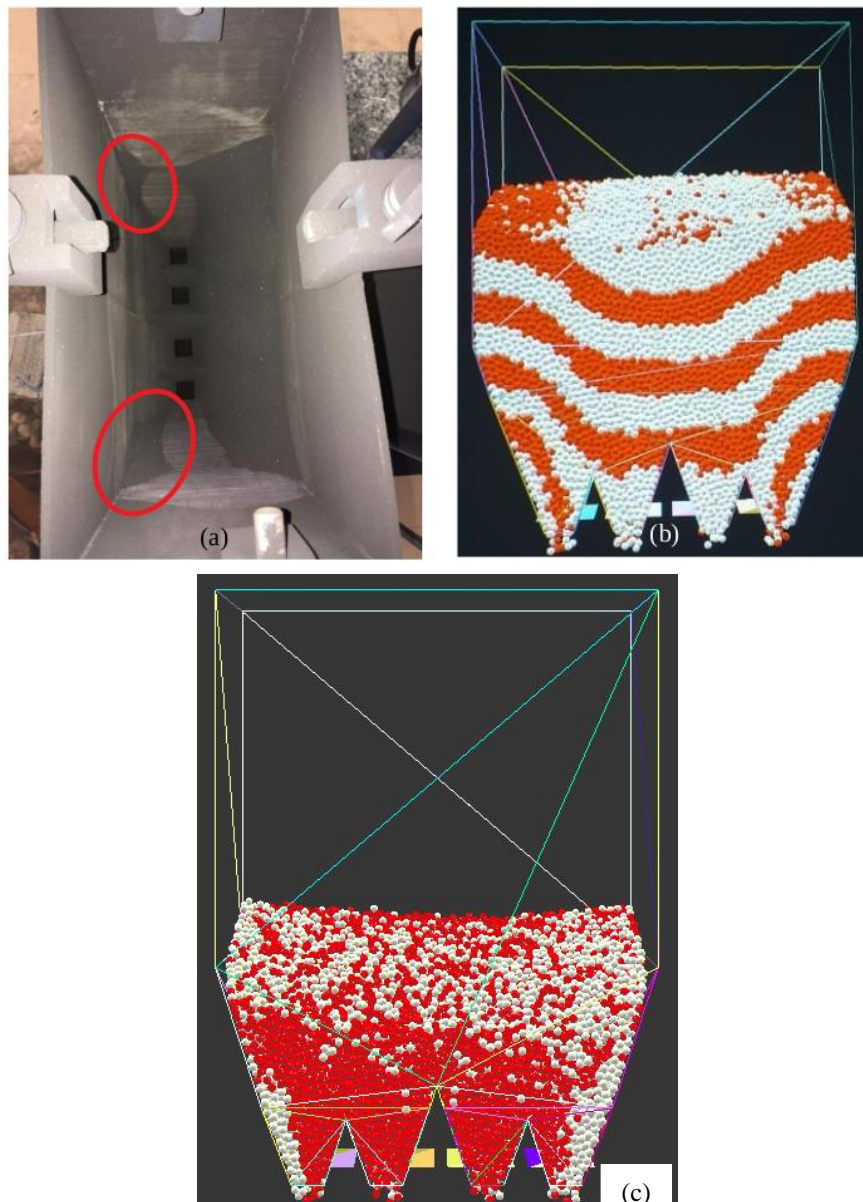


Figura 5.8: Efeito do atrito na parede do silo: modelo físico, modelo computacional.

6 CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos nesta pesquisa e diante dos resultados obtidos acerca do comportamento do fluxo granular da mistura de carvão no *Coal Bunker*, tem-se as conclusões descritas a seguir:

Individualmente, o modelo físico e o numérico computacional apresentaram resultados consistentes, e quando comparados foram semelhantes entre si, sendo que as pequenas diferenças encontradas nos resultados são devidamente compreendidas e justificadas, portanto, os resultados foram satisfatórios. Logo conclui-se que a modelagem física e a numérica computacional se complementam na busca por uma melhor compreensão sobre o comportamento do fluxo granulares da mistura de carvão no *Coal Bunker*.

Uma das vantagens da simulação numérica, quando comparado com o modelo físico, é a possibilidade de visualização de um maior nível de detalhes, com relação ao comportamento do fluxo.

Não foi possível obter um grande valor amostral, nos testes de vazão mássica no aparato experimental, em função da relação entre o maior tamanho da partícula de carvão e a abertura de saída da tremonha.

Ainda assim, o modelo físico foi capaz de prever o comportamento da mistura de carvões no *Coal Bunker*, durante o carregamento e descarregamento, e os dados gerados nos testes serviram de base para validação do modelo computacional.

Com relação a influência da granulometria sob o fluxo granular, constatou-se que a amostra, cujas partículas apresentam granulometria com 65 % < 2,83 mm, apresenta uma maior vazão mássica se comparado a amostra com 85 % < 2,83 mm.

Em se tratando da influência da altura da coluna da carga sob o escoamento, o mais indicado é trabalhar com o silo a uma capacidade superior a 80 % do volume total, pois nestas condições se obtém maiores vazões na ordem de 0,25 a 0,30kg/s.

A correta modelagem do fluxo granular é completamente dependente dos parâmetros utilizados no aparato, por isso é essencial o conhecimento dos parâmetros constitutivos do carvão e do silo, e estes devem ser medidos, adquiridos da literatura ou ainda calibrados.

O coeficiente de amortecimento (*damping*) exerce grande impacto no modelo de contato linear utilizado pelo Yade, portanto é essencial que se estime corretamente este valor. Logo o coeficiente de amortecimento de valor 0,05 implementado no Yade, pode ser considerado um valor ideal para as simulações desta pesquisa.

Os resultados obtidos das simulações concordam com os experimentos não apenas sobre a vazão mássica e tempo de descarregamento, mas também sobre os padrões de escoamento da carga ao longo do processo de descarga.

O pacote de *software* Yade modelou corretamente o fluxo de carvão no *Coal Bunker*, porém este *software* tem como inconveniente o elevado tempo computacional, pois este algoritmo baseado em diferenças finitas tende a tornar-se bastante lento para um elevado número de partículas. O tempo estimado para cada teste de vazão mássica foi de 30 dias.

Os resultados, tanto no modelo físico quanto no computacional, apontam que as partículas que estão em contato direto com as paredes do silo sofrem mais com a ação do atrito, provocando um grande efeito de não uniformidade sobre o padrão de fluxo e a velocidade do escoamento da carga. Com isto as partículas têm distintas velocidades verticais, resultando em diferentes tempos de permanência no silo, resultando em uma heterogeneidade da carga.

Foi identificado um mecanismo de segregação granulométrica no interior do silo no qual a granulometria mais grosseira esteve mais presente nas tremonhas das extremidades, e foi observado uma ligeira maior presença de finos nas tremonhas centrais.

Em geral, foi encontrado uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, as pequenas diferenças são causadas pelas dificuldades práticas em combinar exatamente os parâmetros utilizados nas simulações com os dados reais.

7 SUGESTÕES OPERACIONAIS

Com base nos resultados alcançados, foi elaborado a tabela 7.1, com objetivo de revisar os parâmetros operacionais do *Coal Bunker*, e assim contribuir para o aumento da competitividade da coqueria.

Tabela 7.1: Revisão dos parâmetros operacionais do *Coal Bunker*

Revisão dos parâmetros operacionais do <i>Coal Bunker</i>	
Parâmetro operacional	Recomendações operacionais
Influência da granulometria durante o descarregamento do silo	Um controle efetivo da distribuição granulométrica da mistura de carvões faz-se necessário, haja visto que o tamanho das partículas influencia diretamente na vazão mássica. Visando uma maior vazão mássica, o mais indicado é que a mistura de carvão esteja com uma granulometria de 65% abaixo de 2,83mm.
Influência da umidade durante o descarregamento do silo	Sendo o carvão altamente higroscópico, a presença de uma camada de líquido na superfície das partículas, pode aumentar a coesão entre as partículas, dificultando o escoamento e impactando diretamente na vazão mássica e contribuindo para a formação de arco coesivo. Portanto o mais indicado é trabalhar com a mistura de carvão seca, quando não sendo possível, trabalhar com teores de umidade abaixo de 8%.
Influência da densidade de carga durante o descarregamento do silo	As principais propriedades que influenciam a densidade de carga da mistura de carvões são a granulometria e a umidade, portanto visando o aumento da densidade de carga durante o descarregamento do <i>Coal Bunker</i> , e baseado nos resultados encontrados, o mais indicado é que a mistura de carvões esteja seca e com uma granulometria com $65\% < 2,83\text{mm}$.
Influência da segregação da mistura de carvões nas	A forma do carregamento do silo, influencia no modo como o material pode segregar dentro do silo, portanto, uma alternativa para minimizar o efeito da segregação,

<p>tremonhas.</p>	<p>seria o estudo da influência do carro de carregamento, a partir da variação da inclinação, velocidade e angulação do distribuidor rotativo que direciona o material para o interior do silo.</p>
<p>Influência da altura da coluna da carga durante o descarregamento do silo</p>	<p>Visando uma maior vazão mássica, o mais indicado é trabalhar com o silo com uma capacidade mínima de 80% do volume total, haja visto que a pressão da coluna da carga contribui para o aumento da vazão do material.</p>
<p>Efeito do atrito das partículas de carvão nas paredes do silo</p>	<p>Visando a diminuição do efeito do atrito das partículas de carvão com a geometria confinante, uma opção seria a substituição do revestimento das tremonhas com material cerâmico, por materiais mais resistentes, como por exemplo, o revestimento com basalto.</p>

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a variação da densidade de carga, em função da variação da altura da coluna da carga, durante a etapa de descarregamento do silo.

Avaliar a variação da densidade de carga, após a adição de diferentes teores de alcatrão na mistura de carvão, durante a descarga.

Avaliar a influência do carregamento de acordo com a movimentação da correia transportadora que alimenta o *Coal Bunker*.

Verificar como poderia ser incorporado o efeito da presença da umidade do carvão no comportamento do fluxo granular no modelo computacional.

Pesquisar estratégias que aperfeiçoem o desempenho dos cálculos computacionais.

Realizar simulações utilizando outras formas geométricas para as partículas de carvão, a fim de ter um modelo mais realista.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCM – Associação Brasileira de Carvão Mineral. Dados estatísticos, 2020. Disponível em: www.satc.edu.br/abcm/conteudo.asp?d1=38&d2=&d3=8. Acesso em: 30 de janeiro 2022

ADEMA, A., YANG, Y., BOOM, R., 2009. Coupled modeling of the ironmaking blast furnace, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO Australia, 2009.

AMORIM, O.V.; Estudo para o uso de matérias-primas em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em Altos-Fornos de alta produtividade. 2005. 127 folhas. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

AMORÓS, J. L. et al. Projeto de Silos para o Armazenamento de Materiais na Forma de Pó. Problemas Associados à Etapa de Descarga. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 12-23, 2002.

ANAND, A.; CURTIS, J.S.; WASSGREN, C.R.; HANCOCK, B.C.; KETTERHAGEN, W.R., "Predicting discharge dynamics from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM)", Chemical Engineering Science, v. 63, p. 5821-5830, 2008.

ANDRADE, R. A. Método para a determinação do ângulo de inclinação da tremonha em silos. 2016. 196 folhas. Dissertação Graduação – Departamento e Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BATISTA, C. S.; Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. 2009. 99 folhas. Dissertação de Doutorado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BEHMER, R.D.N.; Simulação numérica de fundação apoiada sobre solo não coesivo reforçado com geotêxtil usando o método dos elementos discretos. 219. 87 folhas. Dissertação

de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Paulo, Campinas, 2019.

BORREGO A.G. Petrografía del coque metalúrgico, Palestra ministrada junto ao PPGE3M-UFRGS, Porto Alegre, 2013.

BP - BRITISH PETROLEUM. Statistical review of world energy, 2022. Disponível em: www.bp.com. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

BROWN, Chris J.; NIELSEN, Jørgen. Silos: fundamentals of theory, behaviour and design. CRC Press, 1998.

CALIL Jr., C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. 1990. 198 folhas. Tese de Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

CALIL Jr., C. Silos de madeira. 1978. 198 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.

CALIL JUNIOR, C. Sobrepecciones em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulents cohesivos. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

CALIL JUNIOR, C., CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos, EESC. 232p. 2007.

CAMPOS, M. M. Análise da escoabilidade de pós. 2012. 129 folhas. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2012.

CARIAS, M.C; BRAGA, E.M.H, SILVA, G.L.R; AMARAL, R. C. V.; ASSIS, P. S.; LEMOS, L. R. Efeito do Tamanho de Partícula e da Umidade sobre a Densidade de Mistura de Carvão e seu Impacto sobre a Qualidade do Coque, p. 45-56. In: 48º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-primas, São Paulo, 2018.

CARVALHO, R. M. Mechanistic Modelling of Semi-Autogenous Grinding. 2013. 162 folhas. Tese de Doutorado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PEMM/UFRJ, 2013.

CASERTA, A.J.; Desenvolvimento de relações não-lineares para mecanismos de contato por meio de estudo analítico e numérico. 2015. 172 folhas. Dissertação de Doutorado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2015.

CHAVES, A. P.; FERREIRA, F. M. Estocagem e Homogeneização. EPUSP. 1996.

CHEUNG, A. B. Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa de confiabilidade estrutural de silos esbeltos. 2007. 333 folhas. Tese Doutorado em Engenharia de Estruturas — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CIL, M. B.; ALSHIBLI, K. A. 3D evolution of sand fracture under 1D compression. *Géotechnique*, v. 64, n. 5, p. 351-364, 2014.

CLEARY, P.W.; SAWLEY, M.L. DEM modeling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge, *Applied Mathematical Modeling*, v. 26, p. 89-111, 2002.

COELHO, M. C.; Tecnologia de pós. Curso de Especialização Pós-Graduação em Farmacotecnica Avançada da Universidade de Lisboa – Faculdade de Farmácia, Lisboa. 28p., 2007. Disponível em: <https://repositorio.ineg.pt/bitstream/10400.9/810/1/Tecnologia%20de%20P%C3%B3s%20282%29.pdf>. Acesso em: 02 de fevereiro do 2022.

COMBARROS, M.; FEISE, H. J.; ZETZENER, H.; KWADE, A. Segregation of particulate solids: Experiments and DEM simulations. *Particuology*, v. 12, n. 1, p. 25–32, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.005>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

COSTA, L.C et al. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno. ABM 2015. Material de treinamento. 2015.

CROSTA G. B; CALVETTI F; IMPOSIMATO S; RODDEMAN D; FRATINNI P; AGLIARDI F. Granular flows and numerical modelling of landslides Dip.Science Geologiche e Geotechnologie, Università degli Di Milano Bicocca, 2001.

CUNDALL, P.A., STRACK, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotèchnique, v29: p. 47-65, 1979.

DAS, S. K.; NANDY, A. S.; PAUL, A.; SAHOO, B. K.; CHAKRABORTY, B.; DAS, A. Coal blend moisture – A boon or bane in cokemaking? Coke and Chemistry, v. 56, n. 4, p. 126-136, 2013.

DONZÉ, F. V.; RICHEFEU, V.; MAGNIER, S. A. Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 8, n. 1, p. 44, 2009.

DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. Arching in hoppers: II. Arching theories and critical outlet size. Powder Technology, Elsevier Science, n. 84, p. 177-183, 1995.

EUROCODE. EN 1991-4: Actions on structures – Part 4: Silos and tanks. 112 p. 2006.

FITZPATRICK, J.J. et al. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. Journal of Food Engineering, vol. 64, p. 435–444, 2004.

FLORES, B. D.; Avaliação experimental em forno piloto da influência de um carvão colombiano de alta heterogeneidade e de carvões de alto e baixo volátil na qualidade do coque. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 166p. 2014.

FLORES, B.D.; Estudo do comportamento termoplástico do carvão da camada Barro Branco (Santa Catarina- Brasil) e sua influência no processo de coqueificação. Tese de Doutorado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 189p. 2018.

FLORES, I.V.; Avaliação da influência do tamanho de partícula sobre as propriedades de carvões coqueificáveis e de coque produzidos em escala de laboratório. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 165p. 2014.

FLORES, I.V.; LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. Coke: Quality and Production. 2nd ed. England: Butterworths, 1989.

GALPERIN, M.; DOMBROVSKY, N.; MESTECHKIN, L. Construction Equipment, MIR, Moscou, pp. 193-199. 1982.

GERTSCH, R. E. e BULLOCK, R. L. Techniques in Underground Mining. SME, pp. 621-653. 1998.

GODA, T. J., EBERT, F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. Powder Technology, v. 158, p. 58-68. 2005.

GOMES C. J. B.; SCHERER S. W. G. Energy strategies for ironmaking and mining – future vision. Painel 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 01 a 04 de setembro – Belo Horizonte – MG – Brasil, 2013.

GUERRA, P. A. Silos metálicos prismáticos: otimização estrutural das paredes em seção trapezoidal e zigzag. 2006. 129 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

HARTMAN, H. L. Introductory Mining Engineering. Jon Wiley and Sons. New York. 1987.

HEASLIP, L. J.; McLEAN, A.; SOMMERVILLE, I. D. Continuous Casting – Chemical and Physical Interactions During Transfer Operation. Iron & Steel Society of Aime, v.1, 155p. 1983.

HERTZ, H., "Über die Berührung fester elastischer Körper", Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, v. 92, p. 156-171, 1882.

HOLMES, M. A. J., BROWN, S. G. R. DEM prediction of burden distribution patterns in a blast furnace bell-less top charging system. DEM6 – International Conference on DEMs, 380 – 385. 2011.

HORABIK, J., MOLEND, M., 2016. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. Biosystems Engineering 147, 206 – 225. 2016. Disponível em: doi:10.1016/j.biosystemseng. Acesso em: 08 de fevereiro de 2022.

IEA - U.S. International Energy Agency. Coal information, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/coal-information-2>. Acesso em: 29 de dezembro de 2021.

JANELID, I.; KVAPIL, R. Sublevel Caving. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v.3, pp. 129-153. 1966.

JANSSEN, H. Versuche über getreidedruck in silozellen. Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, v. 39, n. 35, 1045–1049, 1895.

JENIKE, A. W. Gravity flow of bulk solids. Utah Engineering Experiments Station Bulletin, n. 108. 1961.

JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Utah Engineering Experiments Station Bulletin, n. 123. 1964.

JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Utah: University of Utah. 197p. 1980.

JUST, G. D. Rock fragmentation and the design of underground materials handling systems. CIM Bulletin., pp. 45-51. 1980.

KARR, C. Analytical Methods for Coal and Coal Products, Vol. I; Academic Press: New York, 1978.

KAYE, J. C. A.; HORTON, A. E. Composition and preparation of blends for making metallurgical coke. Commission of the European communities, Coke oven techniques, information symposium. Luxembourg, pp. 6 e 7. 1975.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. Dry Solids Handling. International to Mineral Processing. New York. Jon Wiley, pp. 367-379. 1982

KEPLER, I.; KOCSIS, L.; OLDAL, I.; FARKAS, I.; CSATAR, A. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer. Advanced Powder Technology, v. 23, pp. 824–832. 2011.

KIM, V.S. Davlenie Zerna I Sovershenstvovanie Konstruktsii Silosov (Presión del grano y mejoras en la construcción de silos). Moscow: Khleboissdat. 1959.

KOZICKI, J., & DONZÉ, F. V. A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 197, n 49-50, pp 4429 – 4443. 2008. Disponível em: doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2008.05.023>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2022.

KOZICKI, J., & DONZÉ, F. V. Applying Open-Source software for numerical simulations using finite element or discrete element modeling methods. Computer Methods in Applied Mechanics an Engineering, v. 197, n 49-50, pp. 4429-4443. 2008.

KUBOTA, Y.; NOMURA, S.; ARIMA, T.; KATO, K. Effects of coal inertinite size on coke strength. ISIJ international, v. 48, n. 5, p. 563-571, 2008.

KWIATKOWSKI, J. E. Simulação E Controle Do Sistema De Aeração Da Massa De Grãos De Soja. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí), Ijuí, 2011.

LEIBROCK, K.; PETAK, H. - Coke Production from Low-Coking Coal Blends by
Densification. Fuel Processing Technology. Amsterdam, Holanda. v. 7, pp. 91-107. 1983.

LEITE, L. M. de O. Silos Metálicos. 2008. 194 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia
Civil — Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto. 2008.

LI, J.; LANGSTON, P. A.; WEBB, C.; DYAKOWSKI, T., Flow of sphero-disc particles in
rectangular hoppers-a DEM and experimental comparison in 3D, Chemical Engineering
Science, v. 59, p. 5917-5929, 2004.

LIMA, B. R. M.; Simulação do carregamento do alto forno dotado de um sistema bell less top
® usando o método de elementos discretos (dem). 2016. 128 folhas. Trabalho de conclusão de
curso submetida ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal
do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Rio de Janeiro. 2016.

LIMA, R. F.; Modelagem Matemática do Escoamento de Grãos de Soja em Secadores de
Fluxo Misto. 2014. 87 folhas. Dissertação Mestrado - Curso de Matemática, Ciências Exatas e
Engenharias, Unijuí - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul,
Ijuí, 2014.

LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. Coke: Quality and Production. 2nd ed. England:
Butterworths, 1989.

LOPES, P.F.T.; Modelagem de fluxo em meios granulares: uma abordagem física,
matemática e numérica. 2015. 134 folhas. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
2015.

LYALYUK, V. P.; SHEREMET, V. A.; KEKUKH, A. V.; OTORVIN, P. I.; PISAR, S. A.;
UCHITEL, A. D.; LYAHOVA, I. A.; KASSIM, D. A. Rational crushing of coal charge for
improvement of coke quality for blast-furnace smelting. Metallurgical and Mining Industry, v.
2, n. 2, pp. 81-86, 2010.

LYALYUK, V. P.; UCHITEL, A. D.; LYAKHOVA, I. A.; KASSIM, D. A.; ZAITSEV, G. L. Preparation of coking batch. *Coke and Chemistry*, v. 54, n. 8, pp. 271-286, 2011.

MADIAS, J. - “Non-recovery/Heat-recovery Cokemaking - A review of recent developments, *Acero Latinoamericano*, pp. 36-44. 2010.

MADRONA, F. S. Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. 2008. 196 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MATA, M. E. R. C; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v4, n1, .79-93, 2002.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C. Unit operations of chemical engineering. McGraw-Hill. New York, pp. 801-808. 1956.

MESQUITA, A., SILVA, M. O., SANTOS, E., CARVALHO, L.C., GOMES, E., NETO, E., MAFRA, M. Uso do método dos elementos discretos em manuseio de minérios e sua contribuição para a pós-graduação e graduação no curso de engenharia mecânica da UFPA. Anais: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE, Belém, PA, Brasil. 2012.

MIO, H., KADOWAKI, M., MATSUZAKI, S., KUNITOMO, K. Development of Development of particle flow simulator in charging processo of blast furnace by discrete elemento method. *Minerals Engineering*. v. 33, pp. 27-23. 2012.

MONTELLANO, C. RAMIREZ, Á. GALLEGO, E. AYUGA, F. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*. v 66, I. 21, pp. 5116–5126. 2011.

MORAES, A. Mecânica do contínuo para a geologia estrutural. Petrobras/CENPS, São Paulo, n. 2, p. 824. 2016

NASCIMENTO, L. M.; Simulação física a frio da densificação da mistura de carvões em coqueria via vibração mecânica. 2016. 84 folhas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2016.

NEVES, C. E. V. Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos. 2009. 183 folhas. Dissertação Mestrado submetida ao Curso de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília. 2009.

NOMURA, S.; ARIMA, T. Influence of binder (coal tar and pitch) addition on coal caking property and coke strength. *Fuel Processing Technology*, v. 159, p. 369-375, 2017.

OLIVEIRA, E.M.; Avaliação da influência do tempo de estocagem em pilhas na qualidade de carvões metalúrgicos. 2008. 126 folhas. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008

OOI, J. Y. et al. Measurement of a solids flow patterns in a gypsum silo. *Powder Technology*, Elsevier Science, n.99, p.272-284, 1998.
p. 435–444, 2004.

PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$). 2005. 121 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PARK, K. J; ANTONIO. G. C; OLIVEIRA. R. A; PARK. K. L. B., Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CT&EA, Campinas – SP, p.11-12, 2007.

PINTO, C. N. Uso de elementos discretos na modelagem numérica da perfuração de poços de petróleo por brocas PDC. 2011. 139 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia Cível. Pontífice Universidade Católica, Rio de Janeiro. 2011.

RAVENET, J. Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, p. 335. 1983.

REED, A. R. Ensuring reliable flow from hoppers, bins and silos. In: Mining & Quarry Annual Equipment Review, pp. 53-55. 1991.

ROBERTS, A. W. Storage, flow and handling of bulk solids. Newcastle: Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle. p.612. 1987.

ROBERTS, A. W.; McLEAN, A. G.; ARNOLD, P.C. Determination of bin geometry. Paper 5. Storage, Flow and Handling of Bulk Solids. 1987.

ROTTER, J. M. Guide for the economic design of circular metal silos. London: Spon Press, p. 28. 2001.

SCHULZE, D. Silos – Design Variants and Special Types. Bulk Solids Handling. v. 16, n 2. 1996.

SCHULZE, D. Silo Quaking, In: Silos – Fundamentals of theory, behaviour and design, eds C.J. Brown and J. Nielsen, E & FN Spon, London, p.171-182, 1998.

SILVA, A. C. Simulação Computacional da Redução Direta de Minério de Ferro em Fornos MIDREX. 2010. 158 folhas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2010.

SILVA, A. M. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral utilizado no processo de fabricação do ferro gusa em Alto-Forno. 2008. 147 folhas. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SILVA, F. T.; Modelagem de cisalhamento de particulados utilizando o método dos elementos discretos. 2018. 68 folhas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2018.

SILVA, G. L. R. Caracterização química, física e metalúrgica das frações granulométricas da mistura de carvão da Gerdau Açominas. 2008. 74 folhas. Monografia — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2008.

SILVA, G. L. R. et. al.; Problema da otimização de mistura de carvão na produção de coque metalúrgico. In: XLI Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas, IX Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Vila Velha. ABM, Vol. 1, pp. 1-12, 2011.

SILVA, G. L. R.; Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico. 2011. 173 folhas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2011.

SILVA, G. L. R.; Utilização de Moinha de Biorredutor e Pneu Inservível na Produção de Coque Metalúrgico. 2016. 198 folhas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2016.

SILVA, J.M.; Estudo do fluxo de material fragmentado na mineração subterrânea, com o uso de modelos físicos. 2005. 209 folhas. Dissertação de Doutorado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.

SILVA, M.C.A.T. Estudo da Variabilidade Pressões em Silos. 1993. 192 folhas. Tese Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.1993.

SILVA, O. J. Caracterização tecnológica de carvões para Coqueria. 2008, 90 folhas. Dissertação Mestrado — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SILVA; A. M.B. Estudo da degradação mecânica de pequenas quantidades de coque em testes de tamboreamento. 2016. 121 folhas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2016.

ŠMILAUER, Václav. Cohesive particle model using the discrete element method on the yade platform. 2010. Tese de Doutorado. Université de Grenoble; Czech Technical University in Prague (<http://www.cvut.cz>). Disponível em <http://beta.arcig.cz/lide/eudoxos/smilauer2010-phd-thesis.pdf>. Acessado em 25 janeiro de 2022.

SPEIGHT, J. G. Handbook of coal analysis. John wiley & sons, inc., publication. Canadá. p. 238. 2005.

SPEIGHT, J. G. The Chemistry and Technology of Coal. 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

STANDISH, N.; YU, A. B.; ZOU, R. P. Optimization of coal grind for maximum bulk density. Powder Technology, Wollongong, v. 68, pp.175-186, 1991.

STRACK, J. GPSS. Modelagem e simulação de sistemas. LTC, pp. 1-8. 1988.

SZEKELY, J.; EVANS, J. W.; BRIMACOMBE, J. K. The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations. A Wiley-Interscience publication, p. 261. 1987.

TEIXEIRA, L. G. R. Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos. 2006. 122 folhas. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. Characterisation of food powder flowability. Journal of Food Engineering, n. 39, p. 31-37, 1999.

THOMSON, F. M. Storage and flow of particulate solids. In: FAYED, M. E.; OTTEN, L. Handbook of Powder Science and Technology, New York: Chapman & Hall, 2 ed., pp. 389-486. 1997.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N., “Theory of Elasticity”, McGraw–Hill, New York, 1970.

TROTTER, D. A.; GODDARD, G. J. Design techniques for sublevel caving layouts. In: CIM Bulletin, pp. 92-100. 1981.

ULHÔA, M. B. Britabilidade de carvões. Seminário ABM; Rio de Janeiro, 1988.

ULHÔA, M. B.; Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração ABM. São Paulo, pp. 200-212, 2003.

ULHÔA, M. B.; Origem e Formação do Carvão. Programa de educação continuada. São Paulo: ABM. Pp. 10-15, 2003.

ULHÔA, M.B. – Aplicação de petrografia de carvão na siderurgia. Carvão metalúrgico para a siderurgia – ABM - Volta Redonda – RJ. 1991.

ULHÔA, M.B. – Caracterização e classificação de carvão para coque de alto-forno. “Carvão metalúrgico para a siderurgia”. Volta Redonda – RJ. 1991.

VALLADÃO et al.; Workshop Desafios Comerciais Cadeia Carvão Metalúrgico, Gerdau Ouro Branco. Outubro, 2016.

WANI Ahmad, MSK Prasad, BHAT Javed. Coal Accident Analysis, Risk Quantification and Suggestive Scheme Improvements in Coal Bunkers of Thermal Power Plants. International Journal of Industrial Engineering Research and Development, v. 3, p. 18–25, 2012.

WERBER, E. A. Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos. Ed. Salles.2005.

WORLD COAL INSTITUTE. Coal and steel facts 2014 edition. Coal Facts 2014, Londres, setembro, 2014. p.1-2. Disponível em: <http://www.worldcoal.org/coal-facts-2014>. Acesso em: 10 de agosto de 2021.

WU, S.; KOU, M.; XU, J.; GUO, X.; DU, K.; SHEN, W.; SUN, J. DEM simulation of particle size segregation behavior during charging into and discharging from a Paul-Wurth type hopper. Chemical Engineering Science, v. 99, pp. 314–323, 2013.

YU, Y. W., SAXÉN H. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in blast furnace top bunker model. *Chemical Engineering Science*, v. 65, pp 5237-5250. 2010.

10 ANEXO

A1 Tabela de dados dos ensaios de vazão mássica 65% < 2,83mm

A2 Tabela de dados dos ensaios de vazão mássica 85% < 2,83mm

A3 Tabela de dados dos ensaios de vazão mássica variando a altura da coluna da carga do modelo físico

A4 Tabela de dados do comparativo entre os ensaios de vazão mássica do modelo físico e numérico computacional

A5 Código computacional desenvolvido no YADE.

A1 TABELA DE DADOS DOS ENSAIOS DE VAZÃO MÁSSICA 65% < 2,83MM

Faixa granulométrica 65% < 2,83mm

Tabela A.1 – Dados dos ensaios de vazão mássica para amostra de 65% < 2,83mm.

Tempo (s)	Teste 1 Massa escoada (kg)	Teste 2 Massa escoada (kg)	Teste 3 Massa escoada (kg)	MÉDIA (Kg)
1	0,002	0,001	0,040	0,014
2	0,080	0,080	0,110	0,090
3	0,120	0,011	0,290	0,140
4	0,150	0,025	0,510	0,228
5	0,240	0,340	0,780	0,453
6	0,310	0,600	0,950	0,620
7	0,570	1,140	1,300	1,003
8	0,950	1,580	1,520	1,350
9	1,180	2,510	1,710	1,800
10	1,490	3,120	2,000	2,203
11	1,940	3,750	2,290	2,660
12	2,920	4,110	2,760	3,263
13	3,490	4,630	3,030	3,717
14	4,150	4,940	3,340	4,143
15	4,290	5,150	3,760	4,400
16	4,540	5,450	4,520	4,837
17	4,760	5,650	4,890	5,100
18	5,110	6,140	5,350	5,533
19	5,470	6,410	5,830	5,903
20	5,730	7,000	6,400	6,377
21	6,160	7,370	6,810	6,780
22	6,390	7,870	7,180	7,147
23	6,850	8,170	7,560	7,527
24	7,130	8,580	7,910	7,873
25	7,600	8,930	8,580	8,370
26	7,950	9,210	8,930	8,697
27	8,300	9,550	9,210	9,020
28	8,540	9,800	9,370	9,237
29	8,900	10,070	9,640	9,537
30	9,260	10,260	9,920	9,813
31	9,490	10,470	10,090	10,017
32	9,760	10,640	10,320	10,240
33	9,880	10,930	10,450	10,420

34	10,100	11,060	10,830	10,663
35	10,280	11,340	10,890	10,836
36	10,440	11,440	11,010	10,963
37	10,590	11,490	11,010	11,030
38	10,830	11,490		11,160
39	11,120			11,120
40	11,280			11,280
41	11,460			11,460
42	11,540			11,540
43	11,550			11,550
44	11,620			11,620
45	11,660			11,660
46	11,660			11,660

A2 TABELA DE DADOS DOS ENSAIOS DE VAZÃO MÁSSICA 85% < 2,83MM

Faixa granulométrica 85% < 2,83mm

Tabela A.2 – Dados dos ensaios de vazão mássica para amostra de 85% < 2,83mm.

Tempo (s)	Teste 1 Massa escoada (kg)	Teste 2 Massa escoada (kg)	Teste 3 Massa escoada (kg)	MÉDIA (Kg)
1	0,090	0,040	0,010	0,047
2	0,020	0,050	0,010	0,027
3	0,080	0,080	0,020	0,060
4	0,140	0,130	0,040	0,103
5	0,160	0,230	0,100	0,1633
6	0,230	0,370	0,120	0,240
7	0,300	0,490	0,150	0,313
8	0,440	0,750	0,170	0,453
9	0,570	0,930	0,200	0,567
10	0,930	1,270	0,290	0,830
11	1,300	1,580	0,430	1,103
12	1,800	2,420	0,540	1,587
13	2,020	3,070	0,700	1,930
14	2,230	3,560	1,250	2,347
15	2,330	3,730	1,620	2,560
16	2,500	3,930	1,950	2,793
17	2,640	4,250	2,300	3,063
18	2,770	4,400	3,170	3,447
19	3,030	4,780	3,740	3,850
20	3,350	5,020	4,350	4,240
21	3,790	5,330	4,770	4,630
22	4,110	5,560	5,230	4,967
23	4,210	5,910	5,520	5,213
24	4,350	6,250	5,690	5,430
25	4,570	6,450	5,950	5,657
26	4,750	6,620	6,130	5,833
27	4,850	6,720	6,650	6,073
28	5,090	6,840	7,010	6,313
29	5,320	7,110	7,340	6,590
30	5,650	7,640	7,540	6,943
31	5,850	8,020	7,860	7,243
32	6,180	8,370	8,210	7,587
33	6,530	8,600	8,440	7,857

34	7,230	9,050	8,710	8,330
35	7,800	9,290	8,970	8,687
36	8,010	9,590	9,340	8,980
37	8,430	9,790	9,530	9,250
38	8,710	10,020	9,800	9,510
39	9,110	10,260	9,940	9,770
40	9,440	10,440	10,240	10,040
41	9,820	10,720	10,480	10,340
42	10,050	10,830	10,750	10,543
43	10,270	11,040	10,890	10,733
44	10,490	11,210	11,100	10,933
45	10,760	11,350	11,220	11,110
46	10,910	11,380	11,320	11,203
47	11,130	11,420	11,400	11,317
48	11,410	11,420	11,420	11,417
49	11,580		11,410	11,495
50	11,660		11,410	11,535
51	11,660			

**A3 TABELA DE DADOS DOS ENSAIOS DE VAZÃO MÁSSICA VARIANDO A
ALTURA DA COLUNA DA CARGA DO MODELO FÍSICO**

Tabela A.3 – Dados comparativo entre os ensaios de vazão mássica variando a altura da
coluna da carga em 20, 40, 60, 80 e 100% do volume do silo

TESTE DE VAZÃO MÁSSICA NO MODELO FÍSICO (kg/s)										
Tempo (s)	20% A	20% B	40% A	40% B	60% A	60% B	80% A	80% B	100% A	100% B
1	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09	0,04
2	0,08	0,01	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,05
3	0,12	0,07	0,04	0,13	0,02	0,05	0,06	0,05	0,08	0,08
4	0,22	0,18	0,14	0,29	0,03	0,07	0,10	0,08	0,14	0,13
5	0,36	0,38	0,26	0,51	0,06	0,14	0,13	0,16	0,16	0,23
6	0,53	0,71	0,41	1,28	0,18	0,27	0,18	0,23	0,23	0,37
7	0,91	0,87	0,50	1,66	0,27	0,39	0,40	0,45	0,30	0,49
8	1,10	1,03	0,63	1,92	0,35	0,54	0,62	0,61	0,44	0,75
9	1,36	1,44	0,82	2,42	0,42	0,84	0,90	1,01	0,57	0,93
10	1,56	1,70	1,23	2,58	0,62	1,11	1,17	1,21	0,93	1,27
11	1,74	2,02	1,81	2,83	1,01	1,19	1,39	1,64	1,30	1,58
12	1,74	2,15	2,10	2,99	1,35	1,44	1,54	2,16	1,80	2,42
13		2,17	2,44	3,11	1,64	1,65	1,76	2,55	2,02	3,07
14		2,20	2,66	3,37	1,75	2,13	2,00	2,95	2,23	3,56
15		2,26	2,99	3,54	2,02	2,55	2,30	3,29	2,33	3,73
16		2,30	3,17	3,91	2,29	3,06	2,67	3,70	2,50	3,93
17		2,30	3,43	4,03	2,64	3,47	2,90	3,97	2,64	4,25
18			3,65	4,15	2,96	3,84	3,44	4,53	2,77	4,40
19			3,93	4,15	3,20	4,15	3,65	4,82	3,03	4,78
20			4,19		3,58	4,62	4,02	5,43	3,35	5,02
21			4,46		3,82	4,90	4,37	5,61	3,79	5,33
22			4,49		4,03	5,15	4,65	5,96	4,11	5,56
23			4,49		4,22	5,44	4,98	6,37	4,21	5,91
24					4,44	5,69	5,26	6,79	4,35	6,25
25					4,56	6,05	5,67	7,33	4,57	6,45
26					4,88	6,30	5,92	7,65	4,75	6,62
27					5,08	6,46	6,23	7,89	4,85	6,72
28					5,40	6,59	6,39	8,02	5,09	6,84
29					5,60	6,84	6,71	8,30	5,32	7,11
30					5,85	7,29	7,07	8,51	5,65	7,64
31					6,01	7,44	7,34	8,70	5,85	8,02
32					6,21	7,47	7,50	8,79	6,18	8,37
33					6,58	7,47	7,73	8,85	6,53	8,60
34					6,75		8,06	8,97	7,23	9,05
35					6,99		8,24	9,02	7,80	9,29
36					7,07		8,43	9,10	8,01	9,59
37					7,07		8,50	9,10	8,43	9,79

A4 TABELA DE DADOS DO COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS DE VAZÃO MÁSSICA DO MODELO FÍSICO E NUMÉRICO COMPUTACIONAL

Tabela A4 – Dados comparativo entre os ensaios de vazão mássica no modelo físico e numérico computacional.

Tempo (s)	Vazão Mássica Modelo Físico (kg)	Vazão Mássica Modelo Computacional (kg)
1	0,054	0,092
2	0,171	0,299
3	0,365	0,506
4	0,586	0,711
5	0,824	0,915
6	0,996	1,119
7	1,219	1,323
8	1,510	1,525
9	1,783	1,728
10	2,075	1,930
11	2,505	2,135
12	2,851	2,338
13	3,156	2,549
14	3,513	2,751
15	3,880	2,953
16	4,241	3,161
17	4,609	3,369
18	4,866	3,575
19	5,131	3,779
20	5,419	3,982
21	5,693	4,186
22	5,941	4,391
23	6,081	4,595
24	6,243	4,802
25	6,363	5,006
26	6,426	5,203
27	6,473	5,408
28	6,498	5,634
29	6,499	5,838
30	6,499	6,041
31		6,245
32		6,371
33		6,396
34		6,396

A5 CÓDIGO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO NO YADE

```
from yade import ymport, pack, plot
material-
Parede=FrictMat(density=7800,poisson=0.35,frictionAngle=radians(6),young=2e11,label="p
arede")
idParede=O.materials.append(materialParede)
global ja_abriu
ja_abriu=False
global massa #massa
massa=0.0 #massa
for vx in range(4):

    for vy in range(2):

        p1=[0.04+vx*0.06,0,0.0+vy*0.07]
        p2=[0.04+vx*0.06,0,0.06+vy*0.07]
        p3=[0.09+vx*0.06,0,0.06+vy*0.07]
        p4=[0.09+vx*0.06,0,0.0+vy*0.07]
        f1=facet([p1,p2,p4],wire=False)
        f2=facet([p2,p3,p4],wire=False)
        O.bodies.append(f1)
        O.bodies.append(f2)

geometria=ymport.gmsh(meshfile='PAREDESv2.mesh',shift=Vector3(-6.80, -5.76, -
7.6),wire=True,scale=0.001)
O.bodies.append(geometria)
materi-
al-
soja=CohFrictMat(density=1243,young=2.6e6,poisson=0.25,alphaKr=0.05,alphaKtw=0.05,fric
tionAngle=radians(22.6),label="soja")
idcarvao=O.materials.append(materialcarvao)
sp=pack.SpherePack()

sp.makeCloud((0.02,0.12,0.0),(0.3,0.95,0.15),rMean=0.003,rRelFuzz=0.00)

sp.toSimulation(color=(0,1,0),material=idcarvao)
O.engines=[

    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
    InteractionLoop(
        [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(), Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],

        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],

        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()
    ],
    ),
```

```

    NewtonIntegrator(gravity=(0,-9.81,0),damping=0.1),
    PyRunner(command='minhafuncao()',virtPeriod=0.01),
    #VTKRecorder(fileName='res_vtk-
',recorders=['spheres','facets','velocity'],virtPeriod=1.0/5.0)
    VTKRecorder(fileName='res_vtk-',recorders=['all'],virtPeriod=1.0/30.0)

]
O.dt=.5*PWaveTimeStep()
O.saveTmp()
arq = open("massa.txt","a") #massa
def minhafuncao():
    global ja_abriu
    global massa #massa
    altura_faixa=0.025
    if O.time> 0.5 and ja_abriu==False:
        for b in O.bodies:
            if b.dynamic==True:
                y=b.state.pos[1]
                if (round(y/altura_faixa)%2)==0.0:
                    b.shape.color=Vector3(1.0,0.0,0.0)
                else:
                    b.shape.color=Vector3(1.0,1.0,1.0)
            ja_abriu=True
            abre_saida(1)
            abre_saida(3)
            abre_saida(5)
            abre_saida(7)

    for b in O.bodies: #massa
        if b.dynamic==True: #massa
            if b.state.pos[1]<-0.01: #massa
                massa=massa+b.state.mass
                O.bodies.erase(b.id) #massa
    arq.write(str(O.time)+" "+str(massa)+"\n") #massa
def abre_saida(i):
    O.bodies.erase(i*2)
    O.bodies.erase(i*2+1)

```