



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Pedro Paulo Azevedo

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA SUCATA METÁLICA EM
UM FORNO DE REFINO EOF**

Belo Horizonte

Julho 2022

Pedro Paulo Azevedo

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA SUCATA METÁLICA EM
UM FORNO DE REFINO EOF**

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Neves

Belo Horizonte

Julho 2022

Azevedo, Pedro Paulo.
A994m Modelagem matemática do aquecimento da sucata metálica em
um forno de refino EOF / Pedro Paulo Azevedo. – 2022.
87 f. : il.
Orientador: Leonardo Neves.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.
Bibliografia.

1. Modelagem matemática. 2. Aço - Tratamento térmico. 3. Refino.
4. Sucata. 5. Fluidodinâmica computacional. I. Neves, Leonardo. II.
Título.

CDD: 511.8



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 16 / 2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.031476/2022-87

Belo Horizonte-MG, 28 de junho de 2022.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*?Modelagem matemática do aquecimento da sucata metálica em um forno
de refino EOF?*

Autor: Pedro Paulo Azevedo

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Neves

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 29 de junho
de 2022 esta Dissertação:

Prof. Dr. Leonardo Neves (ORIENTADOR)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (EXAMINADOR INTERNO)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Roberto Parreiras Tavares (EXAMINADOR EXTERNO)

Universidade Federal de Minas Gerais ? UFMG

(Assinado digitalmente em 30/06/2022 14:48)
ERNANE RODRIGUES DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 392338

(Assinado digitalmente em 03/07/2022 17:10)
LEONARDO NEVES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 1546513

(Assinado digitalmente em 29/06/2022 17:58)
ROBERTO PARREIRAS TAVARES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.686-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **16**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de
emissão: **28/06/2022** e o código de verificação: **44080cbc29**

AGRADECIMENTOS

Aos professores Leonardo Neves, Roberto Parreiras Tavares e Bernardo Martins Braga pelos ensinamentos e pela oportunidade de dar sequência aos estudos científicos da simulação computacional fluidodinâmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, professores, funcionários da coordenação e todo pessoal envolvido. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

No presente trabalho foi proposto um modelo matemático em escala real do escoamento gasoso e da troca térmica dos gases com a sucata no sistema de exaustão de um forno de energia otimizada no refino do aço (Energy Optimizing Furnace - EOF). A compreensão do comportamento dos gases de processo e do aproveitamento térmico para pré-aquecimento da sucata são fundamentais para análise de viabilidade do projeto do forno e continuidade do processo atual. Através da modelagem matemática foi analisado o escoamento dos gases de exaustão e a transferência de calor entre os gases e a sucata metálica no interior do forno, depende principalmente do preparo prévio no pátio de sucata e controle das variáveis de processo do tamanho de sucata e compactação dos pacotes de sucata. Foi possível validar neste trabalho que através de comparação das medições realizadas no forno EOF com os resultados obtidos na simulação, o modelo matemático é capaz de prever o fluxo gasoso no processo de exaustão dos gases e pré-aquecimento da sucata durante o processo de produção de aço no forno.

Palavras chaves: Forno de Energia Otimizada, EOF, Pré-aquecimento de sucata, Modelagem matemática.

ABSTRACT

The present article aims to present a full-scale mathematical model of the gaseous flow and thermal exchange of gases with the scrap in an exhaust system of an Energy Optimizing Furnace (EOF). Perceiving the behavior of process gases and the thermal utilization for scrap preheating are fundamental to analyze the viability of furnace project and the continuing current process. Through mathematical modeling, it was testified that the flow of exhaust gases and the heat transfer between the gases and the metallic scrap inside the furnace primarily depends on the previous preparing in the scrap yard and control of the process variables of scrap size and compaction of scrap packages. By this research is possible to legitimize that, through comparison of the measurements performed in the EOF furnace with the results obtained in the simulation, mathematical modeling can predict the gaseous flow in the process of exhausting gases and preheating the scrap during the production process of steel in the furnace.

Keywords: Energy Optimized Furnace, EOF, Metal scrap preheating, Mathematical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de produção de aço.....	18
Figura 2 - Construção do forno EOF	20
Figura 3 - Principais componentes do forno EOF.....	21
Figura 4 - Posição dos equipamentos de injeção de oxigênio EOF	24
Figura 5 - Sucata interna de oxicorte	25
Figura 6 - Sucata triturada.....	26
Figura 7 - Sucata pacote misto.....	27
Figura 8 – Fração de vazio em pequenos pacotes de sucata	28
Figura 9 – Fração de vazio em grandes pacotes de sucata.....	28
Figura 10 – Variação da permeabilidade com relação a fração de vazio e o diâmetro das partículas	29
Figura 11 - Vista interna do tubo de refrigeração do painel refrigerado	32
Figura 12 - Exemplo de painel refrigerado	34
Figura 13 - Representação esquemática de um tubo de painel refrigerado.....	36
Figura 14 - Fluxograma de definição da estrutura de malhas	42
Figura 15 - Exemplo de malha ortogonal	43
Figura 16 - Exemplo de malha não ortogonal estruturada	43

Figura 17 - Exemplo de malha não estruturada	44
Figura 18 - Variação de velocidade pontual típica em um escoamento turbulento .	46
Figura 19 - Visão frontal do forno EOF.....	49
Figura 20 - Desenho da nave do forno EOF.....	50
Figura 21 - Painéis no interior do forno EOF	51
Figura 22 - Desenho do forno EOF	53
Figura 23 - Parede com painel tubular	56
Figura 24 - Imagem ilustrativa de um painel caixa	56
Figura 25 - Esquema de montagem de termopares nos painéis refrigerados	58
Figura 26 - Montagem de um painel refrigerado	58
Figura 27 - Modelo geométrico forno EOF	62
Figura 28 - Representação em corte da malha numérica	64
Figura 29 - Representação da malha numérica	65
Figura 30 - Vetores de velocidade dos gases em domínio sem meio poroso ativo.	68
Figura 31 - Linhas de representação do fluxo gasoso sem meio poroso ativo.....	69
Figura 32 - Perfil de temperatura dos gases no interior do forno	70
Figura 33 - Perfil de temperatura dos gases no interior do forno	71

Figura 34 - Vetores de velocidade dos gases no interior domínio com meio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.....	73
Figura 35 - Planos de temperatura no interior do forno com domínio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.	75
Figura 36 - Perfil de temperatura superfície do domínio poroso sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.	75
Figura 37 - Distribuição da temperatura da sucata na superfície dos pacotes sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.	77
Figura 38 - Perfil de temperatura no interior do forno com domínio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.	78
Figura 39 - Monitor de temperatura.....	79
Figura 40 - Ganho de temperatura (°C) com o tempo (min).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da água de refrigeração	33
Tabela 2 - Modelos de turbulência - Método RANS	47
Tabela 3 - Análise dos gases pelo método de ORSAT	54
Tabela 4 - Dados dos gases do sistema	55
Tabela 5 - Parâmetro típicos de água nos painéis refrigerados	57
Tabela 6 - Variáveis de trabalho da transferência de calor da água	59
Tabela 7 - Parâmetros e equações para simulação do domínio poroso	61
Tabela 8 - Independência de malha	64
Tabela 9 - Parâmetros domínio poroso	72
Tabela 10 - Resultados de temperatura na superfície da sucata	76
Tabela 11 - Resultados das simulações de aquecimento de sucata.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

$\emptyset$	Componente de flutuação;
μ	Viscosidade do fluido (Pa.s);
A	Área (m ²);
A _s	Área superficial (m ²);
C _p	Calor específico (J/kg.K);
D	Diâmetro (m);
d _c	Diâmetro médio do poro (m);
d _p	Diâmetro da partícula (m);
δ	Espessura (m);
E	Energia (J);
F	Força (N);
f(ω)	Função da fração vazio;
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² .K);
h _{fs}	Coeficiente de transferência de calor fluido-sólido (W/m ² .K);
h _v	Coeficiente de transferência de calor volumétrico (W/m ² .K);
K	Permeabilidade (Darcy);

k	Condutividade térmica (W/m.K);
k_f	Condutividade térmica efetiva do fluido (W/m.K);
L	Comprimento (m);
m	Massa (kg);
Nu	Número de Nusselt;
P	Gradiente de pressão (Pa/m);
Pr	Número de Prandtl;
q	Fluxo de calor (W/m ²);
r	Raio (m);
Re	Reynolds;
Re_p	Reynolds poroso;
T	Temperatura (K);
t	Tempo (s);
u	Velocidade do fluido (m/s);
V	Volume (m ³);
v	Velocidade média (m/s)
V_d	Velocidade Darcy (m/s);

V_f Viscosidade do fluido (Pa/s);

V_r Velocidade relativa (m/s);

ε Fração de vazio;

ρ Densidade do fluido (kg/m³);

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
SUMÁRIO.....	xv
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Forno de energia otimizada - EOF.....	19
3.2 Ciclo Operacional Forno EOF	23
3.3 Sucata Metálica	24
3.4 Painéis Refrigerados.....	31
3.5 Modelagem Matemática.....	38

3.5.1 Equações Governantes	39
3.5.2 Malhas Numéricas	42
3.5.3 Modelos De Turbulência	44
4. METODOLOGIA.....	48
4.1 Visão Geral do Forno EOF	48
4.2 Levantamento de Dados para Análise do Sistema	52
4.2.1 Levantamento de dados dos gases	52
4.2.2 Levantamento de dados da transferência de calor dos painéis refrigerados ..	55
4.2.3 Levantamento de dados da transferência de calor para sucata metálica	60
4.3 Elaboração e Desenvolvimento do Modelo Geométrico	61
4.4 Malha Numérica.....	63
4.5 Descrição do Modelo	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1 Análise do Modelo com Domínio Poroso Desligado	67
5.2 Análise do Modelo com Domínio Poroso Ativado	72
6. CONCLUSÕES	82
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83

8.	BIBLIOGRAFIA.....	84
----	-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

O processo do forno de otimização de energia (EOF) foi desenvolvido em 1982 com o intuito de realizar a fusão/refino associado com o pré-aquecimento da sucata metálica a ser utilizada para produção do aço líquido. A produção se dá pela injeção de oxigênio por lanças supersônicas e ventaneiras submersas, para oxidação e agitação do banho, gerando bolhas de CO que passam do banho líquido para a atmosfera do interior do forno, onde o CO é queimado para CO₂ e libera energia para o pré-aquecimento da sucata metálica. As características do forno EOF apresentam um baixo custo de produção de aço com grande flexibilidade para a mistura de cargas metálicas.

A estrutura do forno EOF é complexa e conta com uma torre de passagem de gases e pré-aquecimento de sucata com 127 painéis refrigerados e um consumo de água na ordem de 1700m³/h para seu resfriamento. Toda essa estrutura retira energia dos gases que pré-aquecem a sucata metálica e demandam de um processo de manutenção rigoroso e de alto custo para prevenção de falhas e conservação da energia e fluxo gasoso.

Com o passar de mais de 30 anos de utilização do forno e várias modificações para seu aperfeiçoamento e modernização, variáveis foram alteradas e seus possíveis resultados podem não mais ser conforme projetado. Assim necessitando de ajustes e modificações para melhorar seu desempenho e benefícios.

O aproveitamento energético de calor pela sucata metálica pode ser avaliado e confirmado através da modelagem matemática. Este estudo realiza uma análise das transferências de calor do fluxo gasoso no interior do forno com a sucata metálica, levando em consideração suas perdas térmicas com os elementos refrigerados e as velocidades dos gases no interior do forno.

O melhor entendimento da atual situação do forno deve ser utilizado para tomada de decisões de continuidade do processo, estratégias de manutenção e produção no

mesmo. Com a simulação matemática do processo de pré-aquecimento da sucata metálica dentro do forno EOF foi possível compreender melhor a influência que variáveis como a fração de vazio (empacotamento), diâmetro de partícula e fluxo gasoso tem no processo e verificar a forma de otimizar o pré-aquecimento em um ambiente de simulação matemática. Estudos do tipo são inviáveis no processo industrial devido ao alto custo de simulação, riscos operacionais do processo e perda de produção da aciaria. Os resultados dessa análise devem futuramente ser avaliadas junto com outros fatores como custo de matéria prima, custo de manutenção, produtividade e tempos padrões de processo para uma avaliação completa de performance da condição atual do forno.

2. OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo geral

Verificar através da modelagem matemática o ganho térmico no pré-aquecimento da sucata metálica pelo fluxo de gases resultantes do refino do aço em um forno EOF com mais de 30 anos de utilização.

2.2 Objetivos específicos

- Propor um modelo matemático que permita analisar a influência das variáveis do processo EOF no pré-aquecimento da sucata metálica a partir dos dados coletados de entrada e saída no processo industrial;
- Calcular o coeficiente global de transferência de calor dos painéis refrigerados verificando perda de calor dos gases para o mesmo;
- Calcular o coeficiente de transferência de calor médio da sucata metálica;
- Realizar testes de simulação matemática para sucata metálica através de domínio poroso analisando resultados obtidos na simulação com resultados do processo;
- Verificar quais as variáveis que tem maior impacto no pré-aquecimento da sucata metálica e o controle dessas variáveis no processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As atuais tecnologias de produção de aço líquido seguem em duas linhas principais: as usinas integradas com fornos BOF (*Basic oxygen steelmaking*) e semi-integradas, que produzem aço através de fornos EAF (*Electric Arc Furnace*). A escolha e viabilidade da linha de produção é feita de acordo com as características da região onde está inserida a unidade produtiva. Basicamente as unidades integradas se situam em região de grande demanda de aço, onde o elevado investimento em altos fornos se torna viável e o forno de refino, BOF ou EOF (*Energy Optimizing Furnace*), utiliza oxigênio para oxidação do banho, com carga metálica predominante de gusa líquido. As unidades semi-integradas por sua vez utilizam forno EAF que através da energia elétrica funde a sucata metálica para produção do aço líquido. A Figura 1 demonstra o fluxo de produção de aço para usinas integradas e semi-integradas do processo de preparação da carga ao processo de laminação do aço.

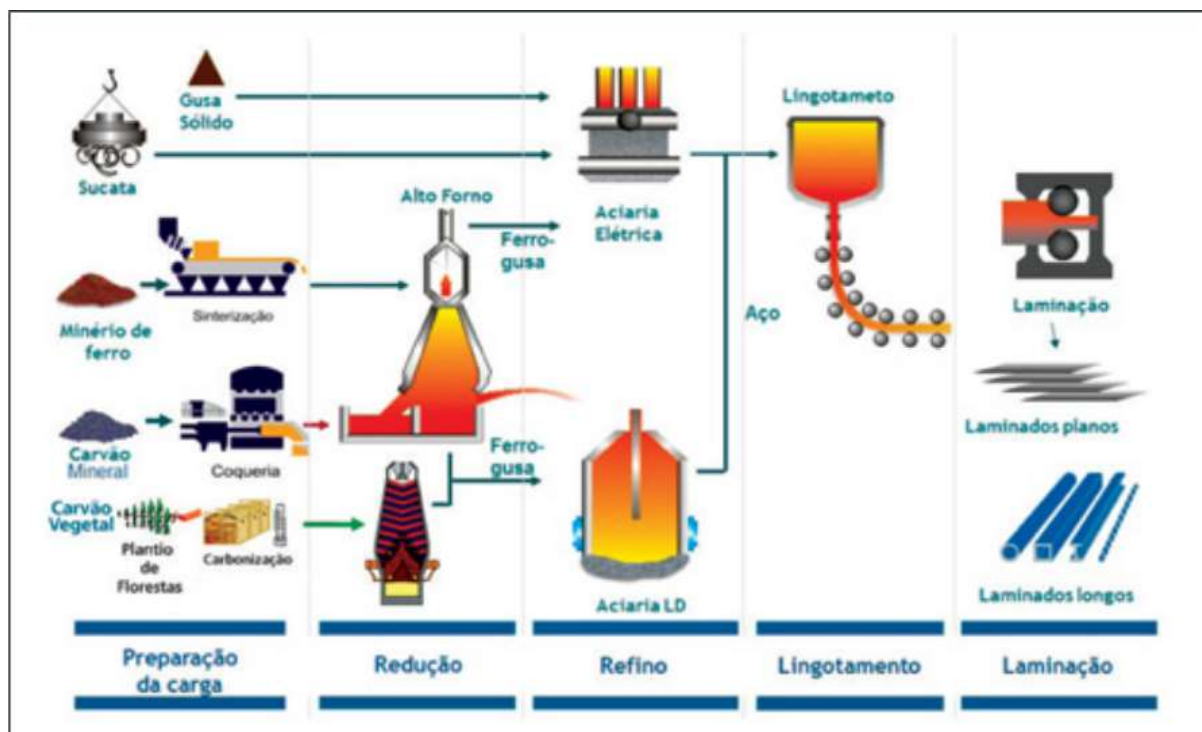


Figura 1 - Fluxo de produção de aço
 Fonte: Confederação Nacional da Indústria.
 Instituto Aço Brasil (2012)

3.1 Forno de Energia Otimizada - EOF

O modelo de forno EOF foi criado em 1982 como sendo uma alternativa para regiões de pouca disponibilidade de energia elétrica e sucata metálica. Este modelo de forno se aplica a unidades integradas que possuem produção de gusa líquido. O EOF pode ser operado com grande flexibilidade entre carga líquida e carga sólida.

Segundo Pfeifer (2009), o EOF é um forno de fusão e refino associado com o pré-aquecimento da sucata metálica, o forno trabalha com sopro de oxigênio combinado, sendo eles sopro atmosférico e sopro submerso. O sopro submerso de oxigênio reage com o carbono gerando bolhas de CO que viajam do banho para a atmosfera do forno, onde o mesmo é queimado para CO₂ pelo sopro dos injetores atmosféricos. Os injetores atmosféricos são lanças que sopram oxigênio na atmosfera no interior do forno em cima do banho de aço líquido.

A reação de pós-combustão na atmosfera no forno se torna essencial para o perfeito funcionamento do mesmo no que diz respeito ao pré-aquecimento da sucata metálica e ao aproveitamento energético, tal fenômeno não pode ser observado durante o funcionamento com os instrumentos atuais de operação, mas pode ser estimado com análises de gases da chaminé. Vários fatores operacionais do forno podem interferir no processo de pós-combustão do CO, como a agitação do banho, temperaturas de trabalho, entrada de ar atmosférico no interior do forno, pressão interna do forno e velocidades dos gases. Segundo Pfeifer (2009) e Petrucelli (2014), as temperaturas de pré-aquecimento da sucata metálica atingem cerca de 800 a 850°C no interior do forno.

A Figura 2 representa a estrutura do forno EOF com a indicação dos injetores de oxigênio e da região de pré-aquecimento da sucata metálica. As lanças supersônicas tem a função de descarburização e as ventaneiras movimentam o banho e também contribuem para a descarburização.

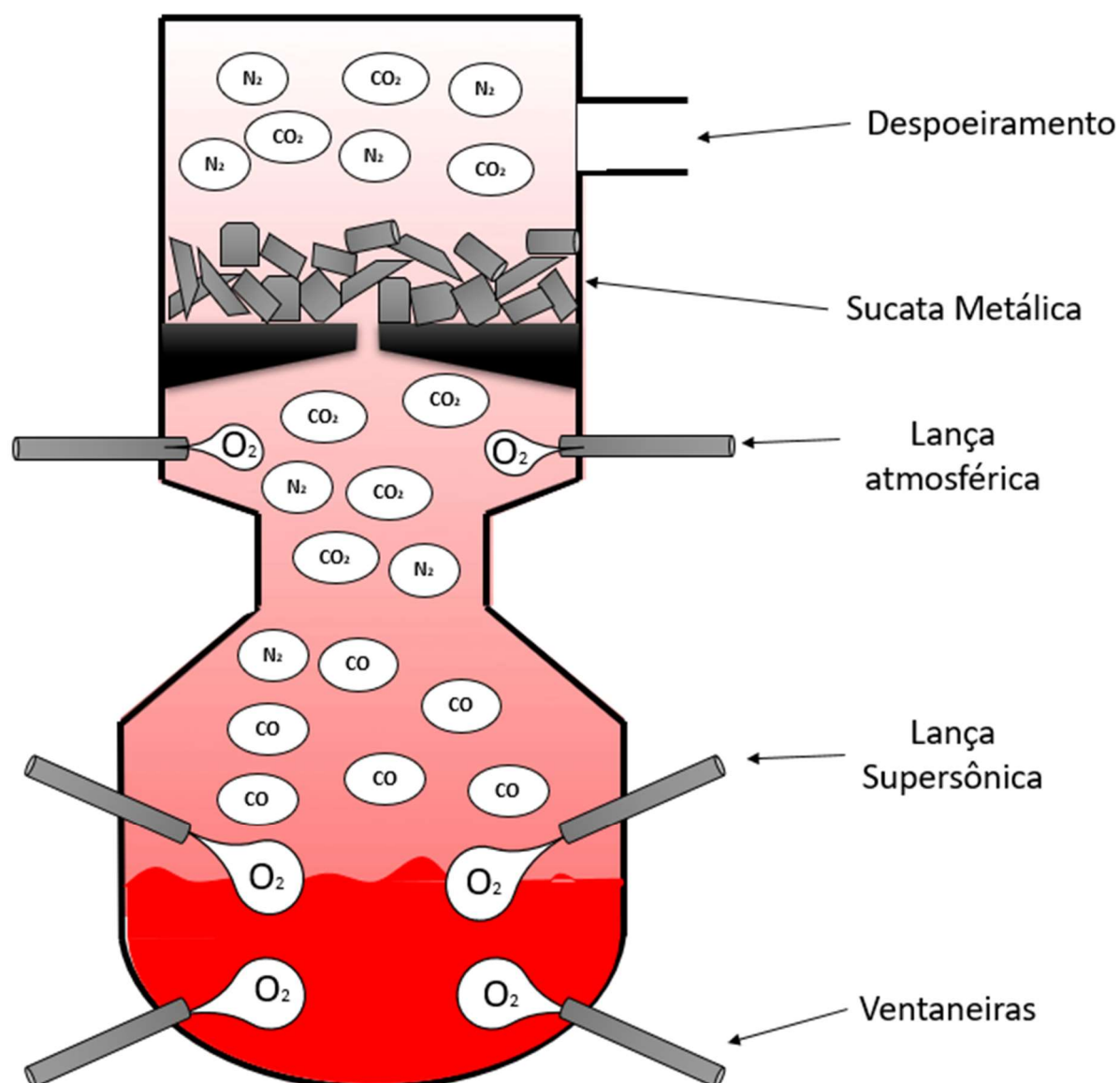


Figura 2 - Construção do forno EOF
Fonte: Próprio autor

O projeto do forno EOF objeto deste estudo tem suas particularidades com relação aos demais modelos de fornos e a compreensão de suas estruturas se torna fundamental para a perfeita modelagem do mesmo. Segundo Barão (2019), o forno é dividido basicamente em 4 parte: Soleira, carcaça, abóboda e pré-aquecedor. Na Figura 3 pode se observar o corpo do forno com suas regiões:

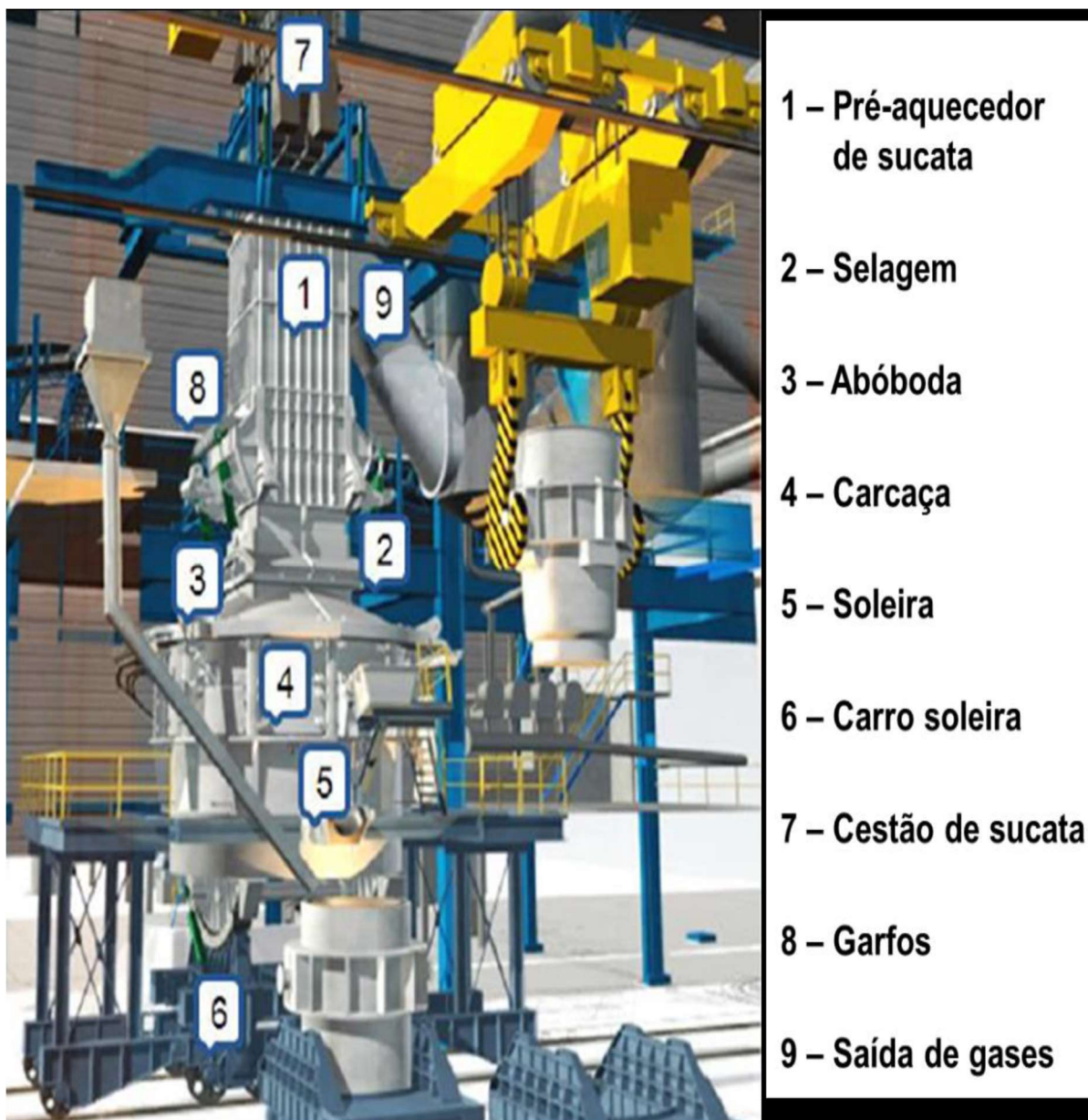


Figura 3 - Principais componentes do forno EOF
Fonte: Barão (2019)

- Soleira

A soleira do forno é revestida em material refratário e nela estão presentes 2 ventaneiras e o canal de vazamento de aço líquido. O intervalo de vida da soleira está entre 800 a 1500 corridas e o tempo para troca da mesma é de um intervalo de 8 horas.

- Carcaça:

A carcaça do forno é formada de painéis em aço refrigerados a água, nos mesmos, contém um sistema de ancoragem para que durante o processo de produção a própria escória grude no painel formando uma blindagem térmica. Na carcaça do forno é localizada a porta de remoção de escória e medição de temperatura e carbono e do lado oposto encontra-se a bica de carregamento de gusa líquido.

A remoção de escória é feita durante o processo de sopro com o basculamento do forno em até 8°, nesse momento a porta de escória se abre e o forno está em pressão negativa para controle ambiental dos fumos.

- Abóboda:

A abóboda do forno é formada por painéis em aço refrigerados a água, nos mesmos, contém um sistema de ancoragem para que durante o processo de produção a própria escória grude no painel formando uma blindagem térmica

A pressão interna do forno é controlada através dos parâmetros operacionais de processo na saída da abóboda e é regulada entre -19,6kPa a -29,4kPa. No EOF estudado, dado as características do forno e o modo de operação, valores maiores que -19,6kPa podem permitir poluição atmosférica e valores inferiores a -29,4kPa provocam entrada excessiva de ar atmosférico no interior do forno.

- Pré-aquecedor:

O pré-aquecedor de sucata se localiza acima da abóboda do forno e nele a sucata metálica está suportada pelos garfos refrigerados que permitem a passagem de gás para o aquecimento da sucata. O volume de gás médio que passa pelo pré-aquecedor está na ordem de 50000Nm³/h e a temperatura do gás varia de acordo com a etapa de sopro e a região de pós-combustão do CO, podendo chegar a 1550°C segundo medições realizadas no EOF.

- *By pass*:

O *by pass* se localiza externamente no corpo do forno e é formado por painéis refrigerados a água. Tem como função, possibilitar a passagem dos gases no interior do forno para manutenção da pressão interna do mesmo.

3.2 Ciclo Operacional Forno EOF

As etapas de operação do forno EOF têm semelhanças com os fornos BOF, sendo que durante a produção de uma corrida com a injeção de oxigênio no banho, os gases resultantes do processo pré-aquecem a sucata metálica que será utilizada na corrida seguinte. Abaixo são descritas as etapas detalhadas do processo de fabricação no EOF.

Etapas do processo:

- Fechamento do canal de vazamento: O canal para bica de vazamento se localiza a 20mm acima da soleira e é fechado de forma manual com a injeção de granulado de refratário;
- Carregamento carga sólida: A carga de sucata metálica suspensa nos garfos do pré-aquecedor é carregada dentro do forno;
- Carregamento carga líquida: Com o auxílio de uma ponte rolante, a panela contendo gusa líquido é basculada na bica para dentro do forno simultaneamente com a adição dos fundentes;
- Sopro de oxigênio: Durante o carregamento de gusa líquido é iniciado o sopro pelas ventaneiras. Logo após inicia-se o sopro com os injetores supersônicos;
- Medição de temperatura e carbono: A medição é realizada durante o processo de sopro por um sistema robotizado através de porta de vazamento de escória;
- Vazamento: Após o refino do aço líquido, o canal de vazamento é aberto para descarregar o aço produzido.

A Figura 4 demonstra o esquema do forno com a bica de vazamento, a porta de escória, as ventaneiras e injetores.

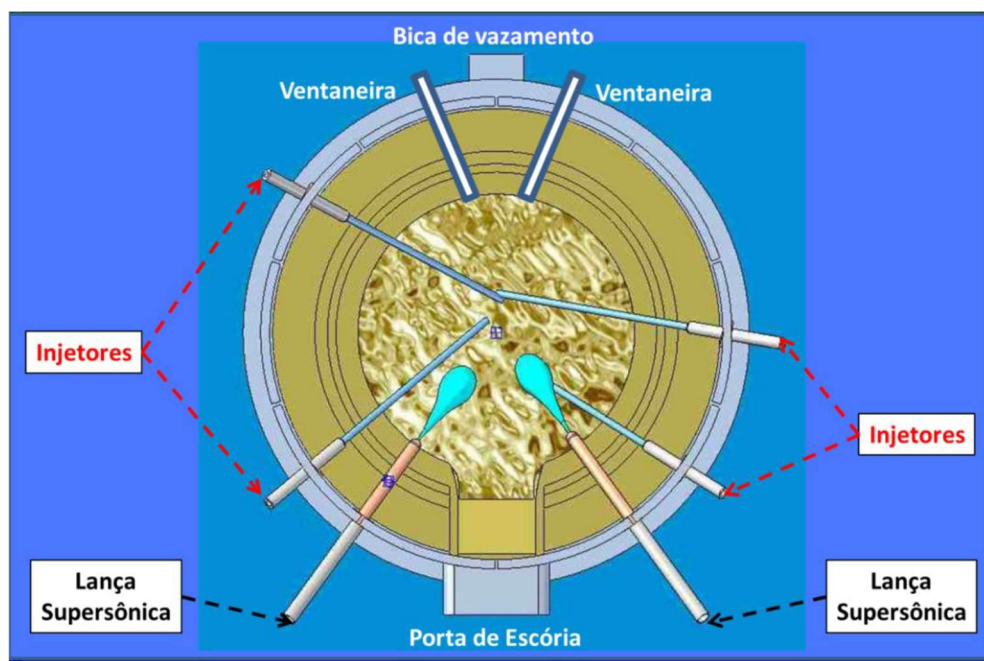


Figura 4 - Posição dos equipamentos de injeção de oxigênio EOF

Fonte: Barão (2019)

3.3 Sucata Metálica

A carga metálica representa aproximadamente 80% do custo de produção do aço em uma aciaria com forno EOF. Basicamente em uma faixa ótima de utilização, a carga metálica é constituída de:

- Gusa líquido: 68 a 74%;
- Gusa sólido: 6 a 16%;
- Sucata de gusa: 0 a 6%;
- Sucata de aço: 10 a 20%;

Devido ao percentual de ferro maior presente na sucata de aço, sua utilização é vantajosa para um maior rendimento metálico e para o controle térmico do processo. As sucatas utilizadas são de geração interna ou adquiridas no mercado externo, podendo ter diversas características de formas, composição química e densidades.

Em um estudo feito por Miranda (2019) foi levantado os tipos de sucatas metálica utilizados na indústria e suas características de composição e densidade, estes dados podem ser verificados abaixo:

- Sucata de oxicorte interno: Sucata de aço carbono pesada e obtida diretamente no processo industrial interno e preparada em cortes por oxicorte ou processo mecânico. Na figura 5 é possível observar a sucata de oxicorte interno.



Figura 5 - Sucata interna de oxicorte
Fonte: Miranda (2019)

- Sucata triturada: Sucata de aço preparada por trituradores Shredders. Durante a preparação grande parte das impurezas e metais contaminantes são retirados. A sucata triturada e empilhada no pátio de sucata é representada na figura 6.



Figura 6 - Sucata triturada
Fonte: Miranda (2019)

- Sucata pacote Misto: Sucata leve obtida através de sucata da região, contendo basicamente restos de estamparias, eletrodomésticos, automóveis, latas e outros, conforme é observado na figura 7. Alto teor de impurezas e preparada em pátio de sucata, sendo prensada em pacotes de 800x600x600.



Figura 7 - Sucata pacote misto
Fonte: Miranda (2019)

Durante o pré-aquecimento da sucata metálica, um fator de extrema importância é a fração de vazio dos pacotes. Segundo Mandal (2010), a fração de vazio é uma das propriedades mais básicas de um conjunto de materiais particulados, esse vazio entre as partículas tem influência direta no fluxo de fluidos e na transferência de calor no meio poroso. A fração de vazio da sucata é fortemente afetada pelo tamanho das partículas e pela distribuição de poros na região próxima as paredes do pacote.

Nos experimentos de Mandal (2010), pode-se verificar a variação da fração de vazio e a fração de vazio média em pequenos e grandes pacotes de sucata com relação a distância da face dos pacotes de sucata. As figuras 8 e 9 mostram os resultados dos estudos de Mandal (2010) para pacotes de sucata com tamanho de partícula médio de 80mm (Figura 8) e tamanho de partícula médio de 150mm (Figura 9).

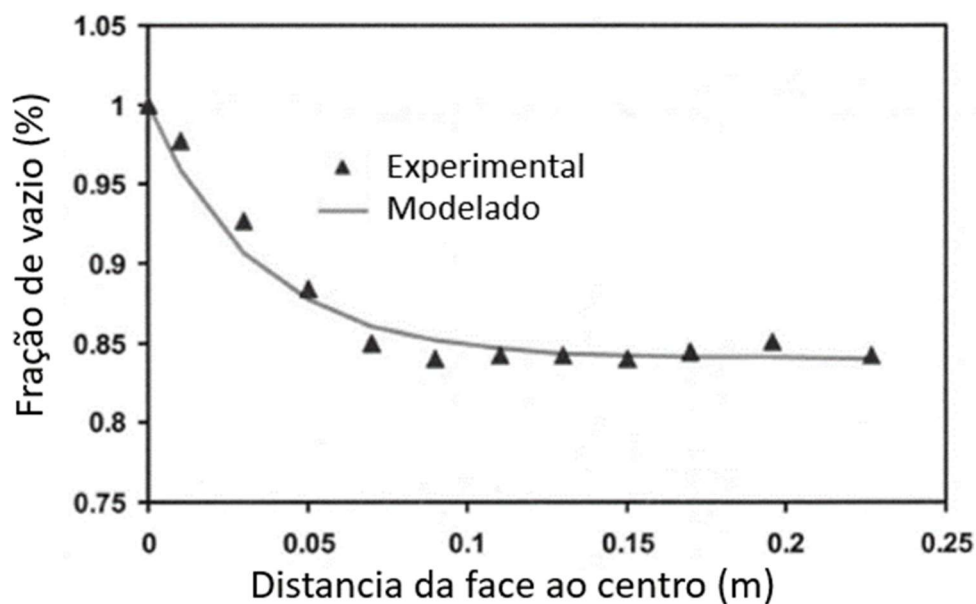


Figura 8 – Fração de vazio em pequenos pacotes de sucata
Fonte: Mandal (2010)

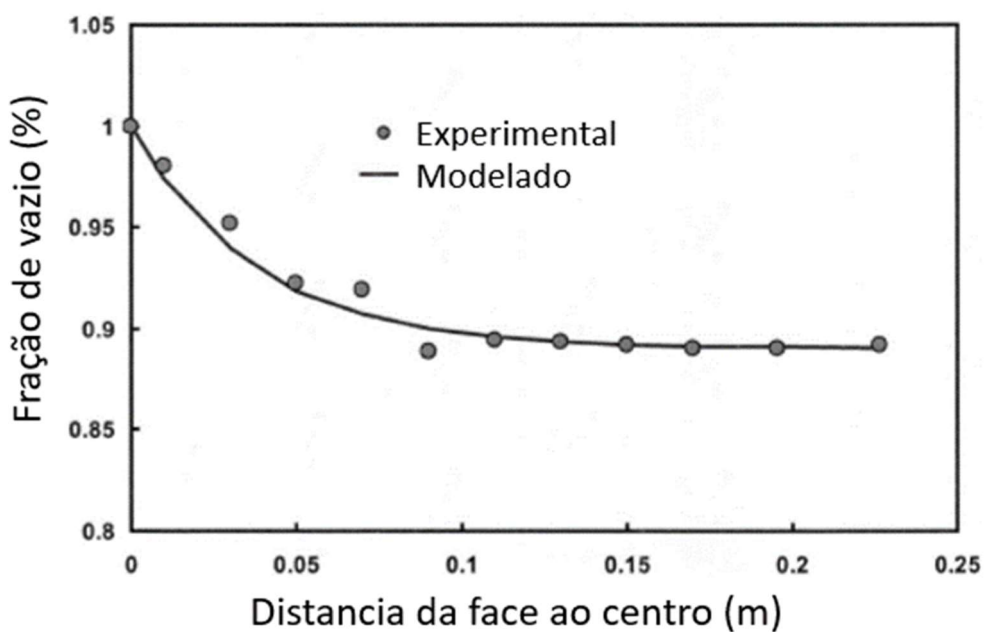


Figura 9 – Fração de vazio em grandes pacotes de sucata
Fonte: Mandal (2010)

Com a alteração da fração de vazio com relação a distância da face ao centro do pacote de sucata, Mandal (2010) correlacionou a fração de vazio com a permeabilidade e o diâmetro das partículas. A Figura 10 mostra que a permeabilidade aumenta com a fração de vazio e o diâmetro da partícula:

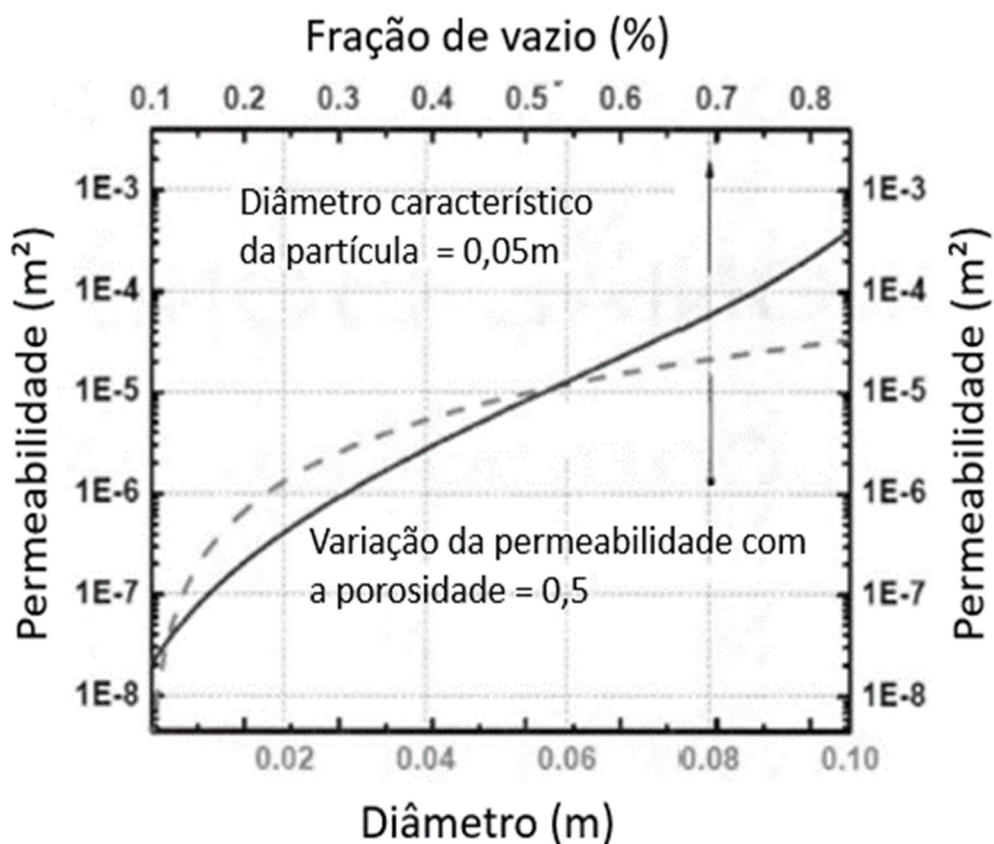


Figura 10 – Variação da permeabilidade com relação a fração de vazio e o diâmetro das partículas
Fonte: Adaptado de Mandal (2010)

Na pesquisa de referência, Mandal (2010) ressalta que não existem estudos sobre a relação da permeabilidade com as partículas de geometrias irregulares. No desenvolvimento ele utilizou o termo laminar da equação de Ergun para realização dos cálculos dado que o regime de escoamento dos gases no interior do forno é laminar.

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150 (1-\varepsilon)^2} \quad (3.1)$$

K = Permeabilidade (Darcy);

ε = Fração de vazio;

d_p = diâmetro das partículas (m).

Para estimativa de um diâmetro equivalente de partículas, Mandal (2010) utilizou a alternativa no cálculo sugerido por Ergun, onde d_c é o diâmetro médio dos poros da estrutura:

$$d_p = 1,5 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} d_c \quad (3.2)$$

Após a obtenção do diâmetro de partícula, Mandal (2010) utiliza as equações abaixo para o coeficiente de transferência de calor do fluido para o sólido h_{fs} e o coeficiente de transferência de calor volumétrico h_v , utilizado quando se tem temperaturas acima de 1100°C:

$$h_{fs} = K_f \frac{(2+1,1Pr^{\frac{1}{3}}Re^{0,6})}{d_p} \quad (3.3)$$

$$h_v = h_{fs}A_s = \frac{Af(\omega)V^{0,9}T^{0,3}}{d_p^{0,75}} \quad (3.4)$$

Onde:

h_{fs} = Transferência de calor fluido-sólido (W/m².K);

h_v = Transferência de calor volumétrico (W/m².K);

K_f = Condutividade térmica efetiva do fluido (W/m.K);

Pr = Número de Prandtl;

Re = Número de Reynolds;

A_s = Área superficial (m²);

A = Coeficiente dependente das propriedades da face (80 para material processado);

$f(\omega)$ = Função da fração vazia;

V = Velocidade superficial do gás (m/s);

T = Temperatura (C°).

Na literatura, observamos diferentes modelos para cálculos de escoamento em meio poroso, as características de escoamento são relacionadas ao número de Reynolds para meios porosos e foi estudada por vários autores e validada mais recentemente nos estudos de Mandal (2010). Para solução do número de Reynolds em meio poroso é utilizado a velocidade Darcy V_d , o diâmetro do poro d_p e V_f viscosidade do fluido gasoso:

$$Re_p = \frac{V_d \cdot d_p}{V_f} \quad (3.5)$$

Darcy observou o gradiente de pressão e a velocidade do fluido através de filtros de areia e descobriu que a queda de pressão é tipicamente proporcional à velocidade do fluido. Pela lei de Darcy, as velocidades para fluxos multidimensionais podem ser apresentadas como:

$$\vec{V}_d = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (3.6)$$

Onde k é a permeabilidade do meio, isto é, a capacidade de um fluido passar através de um meio ou matéria, μ é a viscosidade do fluido e P é o gradiente de pressão. Uma das vantagens da utilização da lei de Darcy, é que ela lineariza as equações de quantidade de movimento, removendo assim uma quantidade considerável da dificuldade de resolução das equações que governam.

3.4 Painéis Refrigerados

A estrutura do forno, acima do cadinho, é totalmente composta por painéis refrigerados por água, os quais trocam calor com os gases no interior do forno. Para

modelagem matemática do pré-aquecimento da sucata é fundamental avaliar as perdas térmicas dos gases com os painéis refrigerados. O forno possui 127 painéis refrigerados em toda sua extensão e tem um consumo de água na ordem de 1700 m³/h aproximadamente.

Os painéis refrigerados são estruturas formadas por tubos de aço carbono e recebem, através de convecção e radiação, um fluxo de calor o qual é totalmente transferido para a água de refrigeração do mesmo. Desta forma a estrutura de tubos com refrigeração de água, e em alguns locais com uma camada de escória solidificada, absorvem todo o fluxo de calor incidente no painel.

De acordo com a qualidade da água de refrigeração do painel, pode-se formar um depósito de cálcio na parte interna do tubo, o que influencia diretamente na transferência de calor do forno para a água. Nos painéis próximos ao banho de aço líquido, forma-se também um depósito de escória de aço proveniente do processo de produção. A Figura 11, representa a estrutura do tubo e o fluxo de calor do forno para o painel.

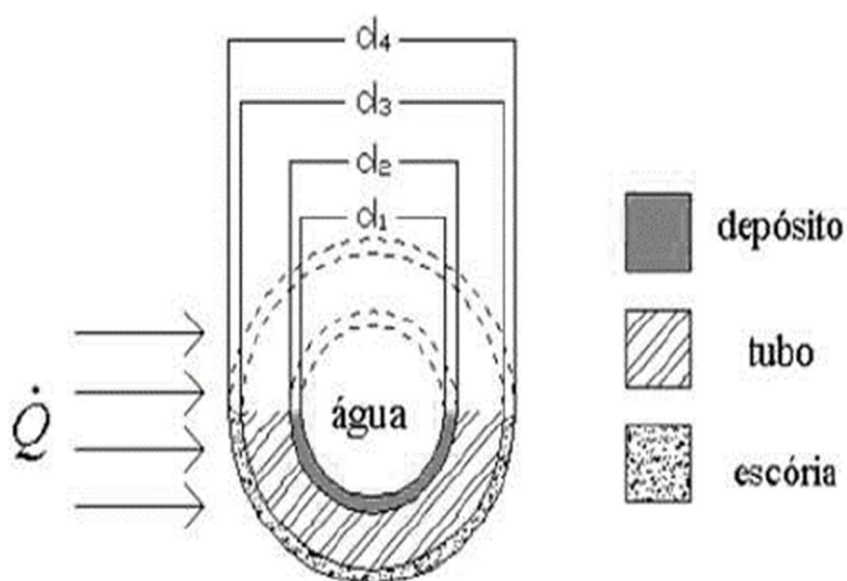


Figura 11 - Vista interna do tubo de refrigeração do painel refrigerado
Fonte: Silva (2014)

A tabela 1 especifica as faixas de qualidade da água ideais para a refrigeração dos painéis, visando maior durabilidade dos painéis e menor depósito de minerais no interior dos mesmos.

Tabela 1 - Características da água de refrigeração

Índice	Unidade	Água Indireta ou Sem Contato
pH (20°C)	pH	7,5 – 9,5
Dureza Calcio	mg/l CaCO_3	30 – 200
Dureza Magnésio	mg/l CaCO_3	0 – 70
Alcalinidade	mg/l CaCO_3	50 – 200
Cloretos	mg/l Cl	Máx. 200
Sulfatos	mg/l SO_4	Máx. 200
Fluoretos	mg/l F	0
Conteúdo total de Fe	mg/l Fe	Máx. 1
Íon Solúvel de Fe^{2+}	mg/l Fe^{2+}	Máx. 0,2
Cobre	mg/l Cu	Máx. 0,05
Sílica	mg/l SiO_2	Máx. 30
Resíduos fixos à 180°C	mg/l	Máx. 800
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	Máx. 1500
Sólidos suspensos totais	mg/l	Máx. 10
Tamanho máximo SST	μm	Máx. 100
Óleos e graxas	mg/l	0
Contagem bactérias totais	-	$< 10^4$
Tipo	-	B

Fonte: Silva (2014)

Na Figura 12 pode-se observar a estrutura do painel refrigerado de um forno.

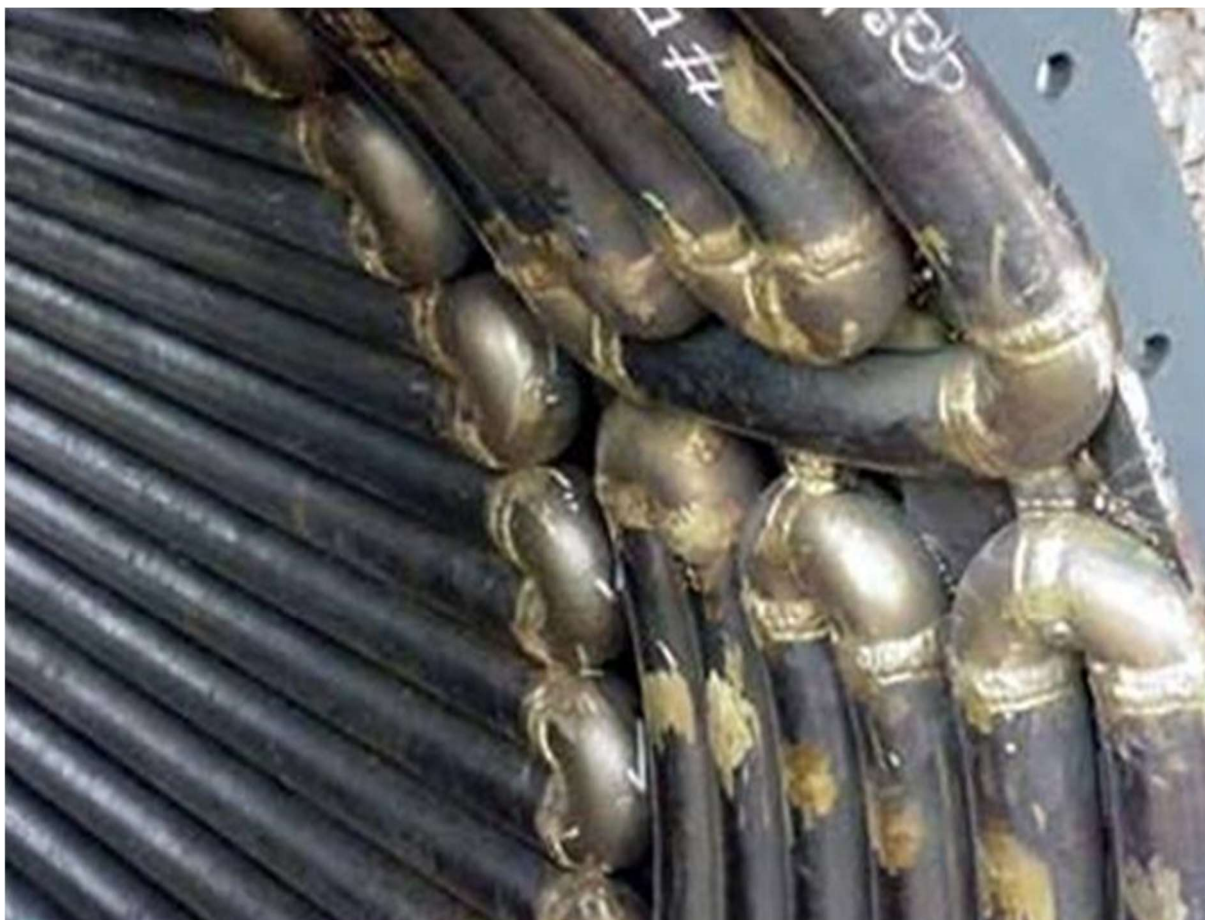


Figura 12 - Exemplo de painel refrigerado
Fonte: Próprio autor

De acordo com Incropera (1990), a equação 3.7 descreve a distribuição da temperatura e as perdas de calor na superfície dos painéis refrigerados.

$$q = \frac{T_{ar} - T_{\text{água}}}{\frac{1}{h_i \cdot 2\pi r_i L} + \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi L k_p} + \frac{1}{h_o \cdot 2\pi r_o L}} \quad (3.7)$$

Onde:

q = Taxa de calor (W/m^2);

T_{ar} = Temperatura do gás no forno (K);

$T_{\text{água}}$ = Temperatura da água no painel (K);

r_i = raio interno do tubo (m);

r_o = raio externo do tubo (m);

h_i = Coeficiente de transferência de calor por convecção interno (W/m².K);

h_o = Coeficiente de transferência de calor por convecção externo (W/m².K);

k = Condutividade térmica do tubo (W.m⁻¹.K⁻¹);

L = Comprimento do tubo (m).

Para realização dos cálculos de transferência de calor nos tubos de secção circular refrigerados internamente, a relação do fluxo de calor da parede externa é diferente do fluxo de calor para água com relação a sua área:

$$\frac{q_1}{A_e} \neq \frac{q_w}{A_i} \quad (3.8)$$

Sendo que área externa (A_e) é maior que área interna (A_i) a uma razão R_A para corrigir os fluxos segundo Silva 2014. Essa correção varia com relação a bitola e espessura da chapa do tubo.

$$R_A = \frac{q_1}{A_e} \quad (3.9)$$

A Figura 13 representa o esquema de um tubo de painel refrigerado com os fluxos de calor e as variáveis estudadas:

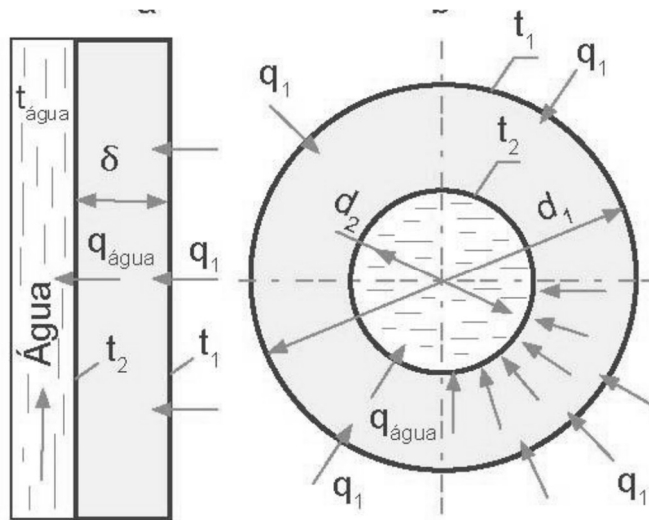


Figura 13 - Representação esquemática de um tubo de painel refrigerado

Fonte: Silva (2014)

Onde:

d = Diâmetro (m)

q = Fluxo de calor (W/m^2)

T = Temperatura (K)

δ = Espessura da parede (m)

Desta forma o fluxo de calor em um tubo refrigerado pode ser encontrado por:

$$\frac{q_1}{A_e} = \frac{k}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.10)$$

A convecção com a água “h” a partir da área interna do tubo “ A_i ”;

$$\frac{q_w}{A_i} = h \cdot (T_2 - T_w) \quad (3.11)$$

Com a equação 3.12 é possível calcular a temperatura na face interna do tubo em contato com a água:

$$T_2 = T_w + \frac{q_w}{A_e \cdot R_A} \cdot \frac{1}{h} \quad (3.12)$$

Para tanto, é necessário saber o coeficiente de transferência de calor por convecção “h”. O qual pode ser estimado de acordo com a equação 3.13.

$$h = \frac{k_w}{D_H} Nu \quad (3.13)$$

A correlação de Dittus-Boelter (Nu), pode ser encontrada por:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \quad (3.14)$$

Onde n é uma constante de 0,4 para parede mais quente que o fluido e 0,33 para parede mais fria que o fluido.

As equações de Reynolds e Prandtl são descritas abaixo em 3.15 e 3.16 respectivamente:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.15)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.16)$$

Onde:

ρ = Massa específica do fluido (kg/m³);

v = Velocidade média do fluido (m/s);

D = Diâmetro (m);

μ = Viscosidade do fluido (Pa/s);

C_p = Calor específico (J/Kg.K).

Com conhecimento das demais variáveis, enfim a equação para solucionar a temperatura da face em contato com a atmosfera interna do forno:

$$T_1 = T_2 + \frac{\delta}{k} \cdot \frac{q_1}{A_e} \quad (3.17)$$

3.5 Modelagem Matemática

Os métodos tradicionais utilizados para solução de equações diferenciais são os Métodos de Volumes Finitos (MVF), Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). O MVF busca obter uma equação aproximada através de um balanço de conservação das propriedades de cada volume elementar. A equação expressa o princípio da conservação de uma grandeza para o volume de controle infinitesimal (MALISKA 2004). Os métodos MDF e MEF trabalham com pontos de malha no lugar do volume de controle e como consequência não são conservativos em nível discreto. O MVF é a técnica mais utilizada para solução de problemas gerais e integração das equações de transporte e escoamento de fluidos em todo o volume de controle de um domínio (REIS, 2013). Estudos semelhantes que envolvem a análise do escoamento dos gases no interior de fornos de refino e as trocas térmicas dos gases no interior dos mesmo, foram discutidos por Sartim (2012), Arinka (2016), Zerwas (2017), Garajau (2018), Maia (2020), Schubert (2021) e deram base para o desenvolvimento deste trabalho. Para a simulação do aquecimento de sucata metálica no interior do forno foi encontrado apenas os estudos de Mandal (2010) que detalham os critérios utilizados para configuração da simulação de aquecimento da sucata com a utilização do domínio poroso.

3.5.1 Equações Governantes

Conforme Neves (2012), as equações do escoamento turbulento incorporam as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e conservação de energia para os parâmetros de turbulência. A equação de continuidade pode ser expressa por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.18)$$

Onde:

ρ = densidade do fluido (kg/m³);

u = velocidade na direção x (m/s);

v = velocidade na direção y (m/s);

w = velocidade na direção z (m/s);

t = tempo (s).

O primeiro termo da equação (3.18) representa a taxa de acumulação de massa por unidade de volume, os demais termos representam as taxas de transporte de massa por unidade de volume através do movimento nas direções x, y e x.

Pereira (2004) sugere que a equação de conservação de quantidade de movimento na direção x pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \beta_T (T - T_{ref}) + \sum_j \rho g_x \beta_c (C_j - \\ & C_{ref,j}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Onde:

μ_{eff} = viscosidade efetiva (kg/m.s);

P = pressão (Pa)

g_x = aceleração da gravidade na direção x (m/s²);

β_T = coeficiente volumétrico de expansão térmica (K⁻¹);

T = temperatura (K);

T_{ref} = temperatura de referência para a aproximação de Boussinesq (K);

β_C = coeficiente de expansão volumétrica devido a variação de concentração (m³/kg);

C_j = concentração do componente j (kg/m³);

$C_{\text{ref},j}$ = concentração de referência do componente j para a aproximação de

Boussinesq (mol/m³).

O primeiro termo da equação (3.19) representa a taxa de acúmulo de quantidade de movimento por unidade de volume e os demais termos do lado esquerdo da equação representam as taxas de transporte de movimento por unidade de volume através do movimento nas direções x , y e z . Os três primeiros termos do lado direito da equação representam as taxas de transporte de quantidade de movimento por unidade de volume por difusão nas direções x , y e z , os demais termos do lado direito representam a força por unidade de volume atuando devido a pressão e o efeito da gravidade associado ao fenômeno de convecção natural.

A equação de conservação de energia é representada pela expressão (3.20).

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho H v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho H w)}{\partial z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right]
\end{aligned}
\tag{3.20}$$

Onde:

H = entalpia (J/kg);

μ_t = componente turbulenta da viscosidade (kg/m.s);

μ_l = componente laminar da viscosidade (kg/m.s);

Pr_t = número de Prandtl turbulento;

Pr_l = número de Prandtl laminar.

Na equação (3.20) o primeiro termo representa a taxa de acumulação de energia por unidade de volume e os termos restantes no lado esquerdo da expressão representam a taxa de transferência de energia devido ao movimento nas direções x, y e z. Os termos a direita da expressão representam a taxa de transferência de calor por unidade de volume por difusão nas direções x, y e z.

Por fim, o equacionamento da conservação das espécies químicas pode ser expresso pela equação (3.21):

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C w)}{\partial z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial z} \right]
\end{aligned}
\tag{3.21}$$

A relação $\mu_{\text{eff}} / \sigma_c$ é chamada de difusividade efetiva, sendo que alguns autores denominam a difusividade como D_{eff} .

3.5.2 Malhas Numéricas

Segundo Gonçalves (2007), as equações em um método CFD são calculadas em pontos definidos pelas malhas numéricas, que são uma representação de um domínio geométrico no qual se deseja resolver o problema. A malha divide o domínio em um número finito de subdomínios. As malhas podem ser agrupadas do seguinte modo:

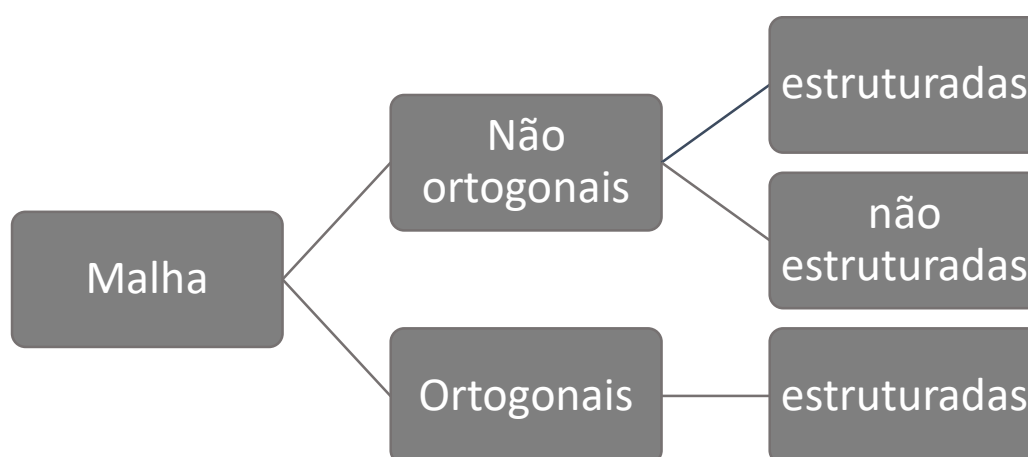


Figura 14 - Fluxograma de definição da estrutura de malhas

O sistema de malhas ortogonais segue o sistema de coordenadas cartesianos, onde representações cilíndricas podem ser um problema devido a limitação deste método. As geometrias dos problemas reais, frequentemente são complexas e de forma irregular, podendo ser mapeadas de acordo com a Figura 15. Outra desvantagem da utilização de malhas em sistema ortogonal se dá no desperdício de recursos de armazenamento, pois a introdução deste sistema gera um refino de malha igual para uma região de alto e baixo interesse no volume de controle.

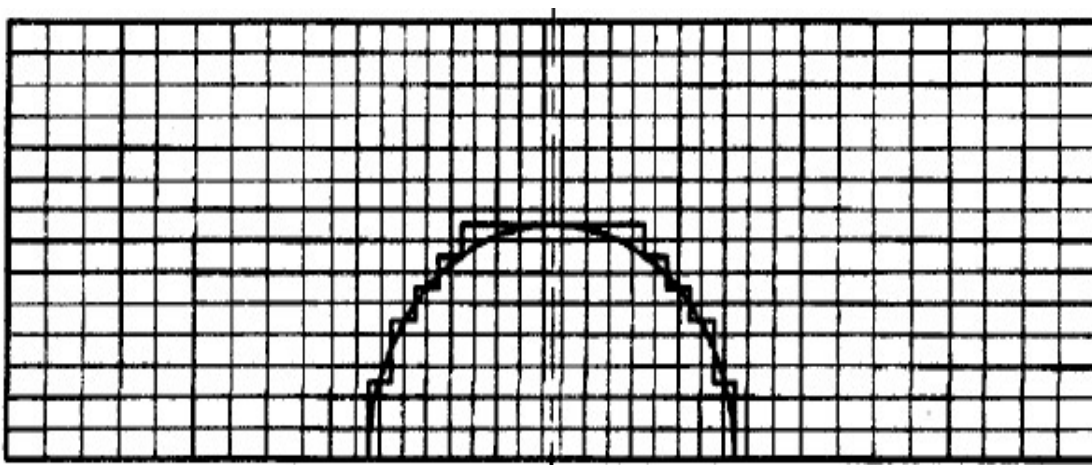


Figura 15 - Exemplo de malha ortogonal
Fonte: GONÇALVES (2007)

Para uma melhor representação dos problemas reais de complexidade geométrica, as malhas não ortogonais são capazes de representar melhor o volume de controle e desta forma obter maior precisão na solução das equações. As malhas não ortogonais estruturadas apresentam os elementos dispostos em famílias de linhas, em que uma linha de elementos não se cruza com outra linha. Neste sistema cada ponto tem 4 vizinhos mais próximos em um sistema 2D e 6 vizinhos em um sistema 3D. A Figura 16 demonstra um sistema não ortogonal estruturado.

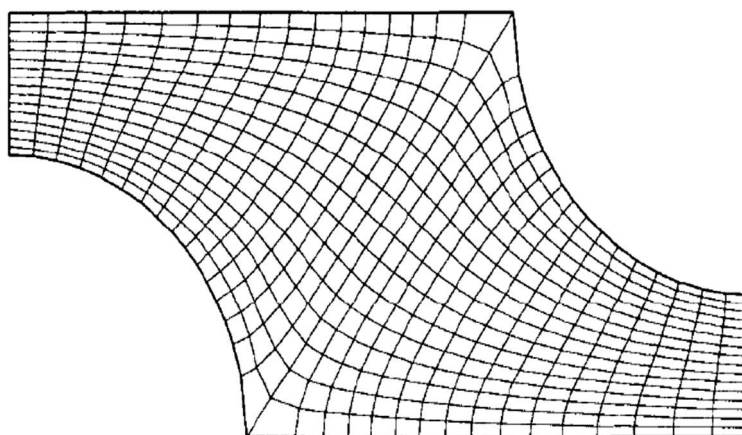


Figura 16 - Exemplo de malha não ortogonal estruturada
Fonte: Gonçalves (2007)

Ainda segundo Gonçalves (2007) este sistema de conectividade entre as células, simplifica a programação e a matriz do sistema de equações algébricas apresenta uma estrutura regular. As desvantagens da malha estruturada é que só se pode ser

utilizada em sistemas de média complexidade e nele pode ser difícil a distribuição dos pontos da malha.

Para as geometrias de grande complexidade, o tipo de malha que permite maior flexibilidade e consegue melhor se adaptar as fronteiras do domínio de controle são as malhas não estruturadas, conforme representado na Figura 17.

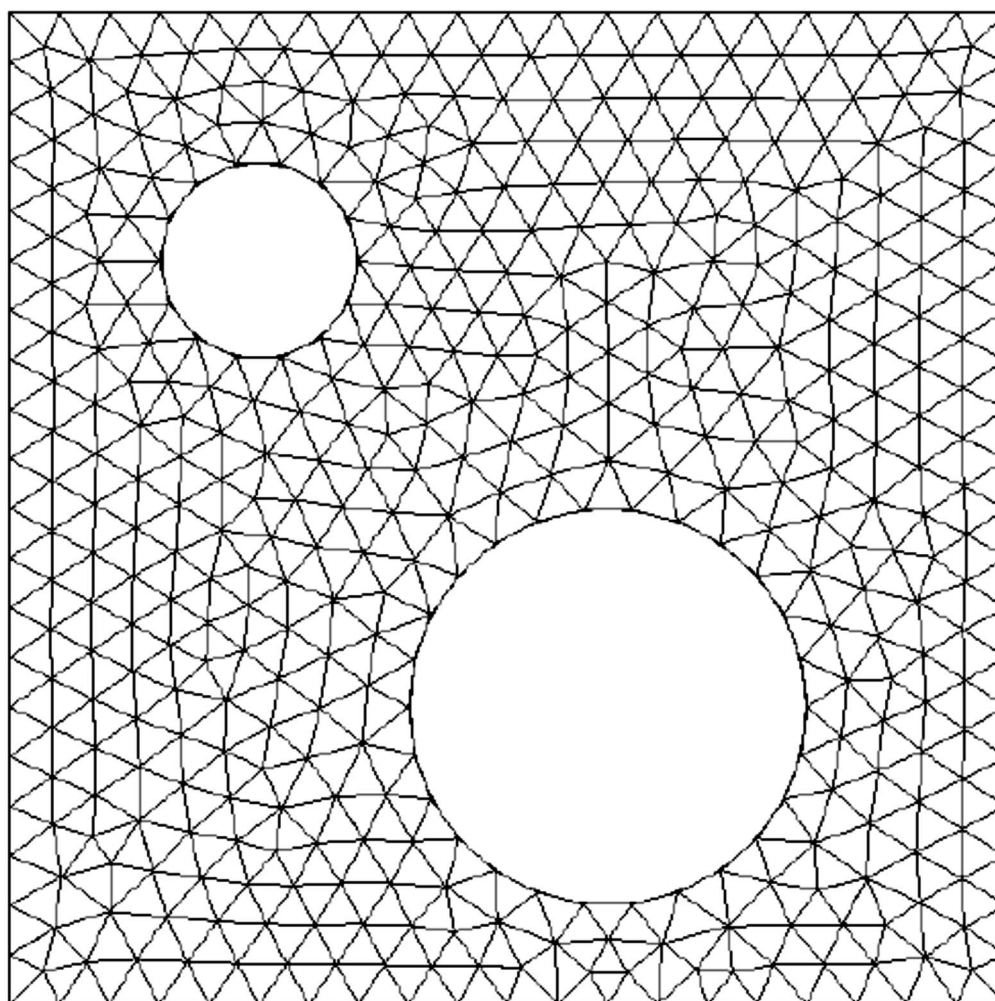


Figura 17 - Exemplo de malha não estruturada
Fonte: Gonçalves (2007)

3.5.3 Modelos De Turbulência

Segundo White (1991), os fluxos turbulentos são e continuam sendo objetivo de pesquisas durante anos. Por esse motivo a utilização de modelagem matemática se

faz necessária para estudos que requerem extrema precisão nos resultados, com baixo custo e minimizando o risco operacional de ensaios no processo real.

Conforme descrito por Malalasekera (2007), os fluxos de movimento caóticos e aleatórios se desenvolvem à medida que a velocidade e pressão mudam com o tempo em regiões substanciais do fluxo. Os fluxos turbulentos complexos podem ser calculados com a técnica de CFD de volumes finitos.

Os métodos numéricos para o desenvolvimento e modelagem de escoamentos turbulentos segundo Pires (2009), podem ser divididos em três categorias:

- Simulação Numérica Direta (DNS): Simula o escoamento turbulento a partir das equações governantes;
- Simulações de Grande Escala (LES): Simula diretamente o escoamento de grande escala e modela os de pequena escala;
- Equações Médias de Reynolds (RANS): Resolve o escoamento laminar médio e modela a turbulência como um desvio desta média.

Segundo Malalasekera (2007), na maioria dos estudos de engenharia é desnecessário desenvolver detalhadamente as flutuações da turbulência, e a natureza randômica do escoamento, inviabiliza economicamente a descrição do movimento de todas as partículas do fluido estudado.

O método RANS expressa qualquer variável “ φ ”, que seja uma função do tempo e espaço, como a soma da média e da componente de flutuação. Este conceito é descrito matematicamente pela equação:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (3.22)$$

A variação da velocidade em relação ao tempo de um escoamento pode ser verificada no exemplo da Figura 18.

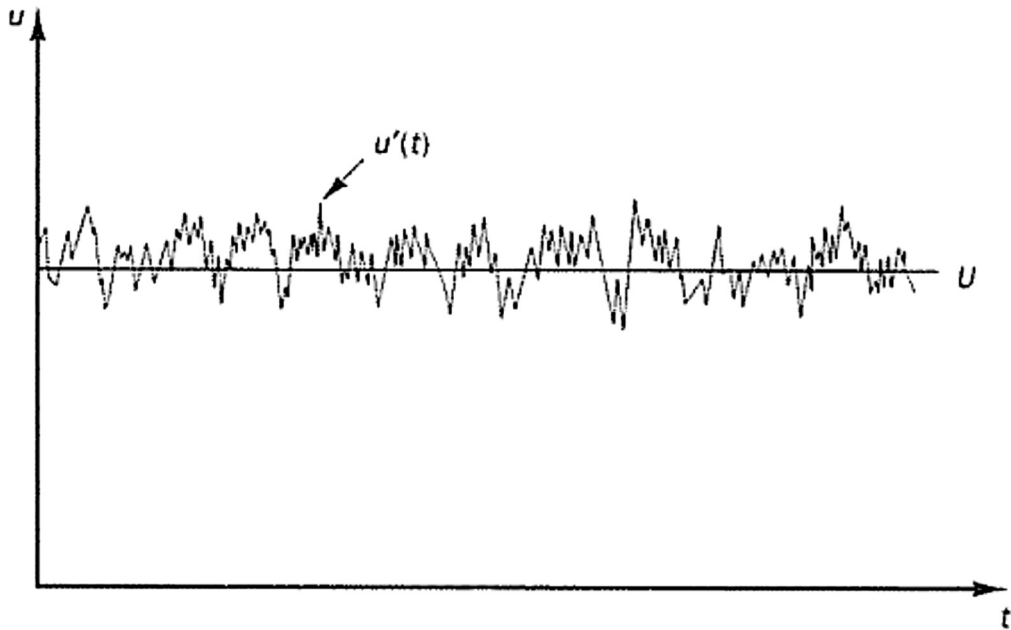


Figura 18 - Variação de velocidade pontual típica em um escoamento turbulento
Fonte: Malalasekera e Versteeg (2007)

Segundo Malalasekera (2007) as equações para o método RANS são:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{U}) = 0 \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{U})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{U} \tilde{U}) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } \tilde{U}) + \left[-\frac{\partial(\bar{\rho} u'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{\rho} u' v')}{\partial y} - \right. \\ & \left. \frac{\partial(\bar{\rho} u' w')}{\partial z} \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{V})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{V} \tilde{U}) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } \tilde{V}) + \left[-\frac{\partial(\bar{\rho} u' v')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{\rho} v'^2)}{\partial y} - \right. \\ & \left. \frac{\partial(\bar{\rho} v' w')}{\partial z} \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{W})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{W} \tilde{U}) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } \tilde{W}) + \left[-\frac{\partial(\bar{\rho} u' w')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{\rho} v' w')}{\partial y} - \right. \\ & \left. \frac{\partial(\bar{\rho} w'^2)}{\partial z} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Os modelos matemáticos de turbulência para os métodos RANS são classificados de acordo com o número de equações diferenciais a serem desenvolvidas juntamente com as equações de escoamento RANS. A tabela 2 traz uma relação do modelo de turbulência com os números de equações.

Tabela 2 - Modelos de turbulência - Método RANS

Número de equações extras de transporte	Modelo de turbulência
Zero	Modelo de comprimento de mistura (Mixing length model)
Uma	Modelo Spalart-Allmaras
Duas	Modelo k- ϵ Modelo k- ω Modelo de tensões algébrico (Algebraic stress model)
Sete	Modelo de tensões Reynolds (Reynolds stress model - RSM)

Fonte: Malalasekera (2007)

O modelo K- ϵ é o modelo mais utilizado para aplicações de engenharia segundo Reis (2013), e foi proposto pela primeira vez por Launder (1972). É um modelo semi-empírico, pois para derivar as equações foram utilizadas considerações empíricas e fenomenológicas. O modelo de turbulência K- ϵ também foi utilizado e validado nos estudos de escoamento de gases em um forno de refino por Sartim (2012) e Zerwas (2017).

4. METODOLOGIA

A análise do aproveitamento térmico da sucata metálica pelos gases do forno EOF é bastante complexa, pois várias alterações são provocadas pelas variáveis de processo, como o tipo de sucata, processamento da sucata, vazão de oxigênio, tempo de residência da sucata, velocidade dos gases, perdas térmicas com a atmosfera do forno e perdas térmicas com os painéis refrigerados. Atualmente existem poucos trabalhos que exploram as variáveis relacionadas a sucata e as trocas térmicas da sucata durante o aquecimento. A simulação da sucata através de domínio poroso e a validação dos resultados serão realizados com medições realizadas no processo real e comparados com os resultados de simulação e projeto do forno.

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi baseada na caracterização e levantamento de dados do sistema, utilização de ferramenta computacional para modelagem do sistema sem sucata e com sucata para entender os efeitos das modificações realizadas no período de utilização do forno. A validação dos resultados será realizada com dados de medição de termopares instalados no forno e medição de temperatura da superfície da sucata realizada com câmera térmica da Fluke modelo Ti400 após o pré-aquecimento.

4.1 Visão Geral do Forno EOF

Como já dito anteriormente o forno EOF já passou por mudanças em seu projeto e algumas de suas variáveis de processo foram modificadas. Na condição atual, o forno opera com 2 ventaneiras para agitação do banho e 5 injetores supersônicos para oxidação do banho, injetando na faixa de $150\text{Nm}^3/\text{min}$. Como matéria-prima na produção, usualmente é utilizado 80% de gusa líquido e 20% de carga sólida, sendo uma mescla de gusa sólido e sucata de aço mista. O tempo médio entre corridas é de 30 minutos para um vazamento de 40t de aço.

Para compreender o equipamento desta unidade é necessário compreender a operação básica. O ferro gusa líquido é produzido nos altos-fornos da unidade e

transportado por placas refratárias em carretas preparadas para esse transporte. Das placas, o ferro gusa vai para um misturador de gusa, onde é realizada a homogeneização das cargas de ferro gusa líquido e mantida a sua temperatura de 1400°C. A sucata metálica é preparada no pátio de sucata e transportada para o forno EOF em um cestão para ser inserida no forno. O forno está equipado com um conjunto de garfos que forma o pré-aquecedor de sucata, onde a sucata é descarregada para que seja aquecida durante o processo para ser utilizada na próxima corrida. Na Figura 19 pode-se verificar a vista frontal do forno na plataforma de operação e na Figura 20 é representado o desenho do *layout* de projeto forno EOF.

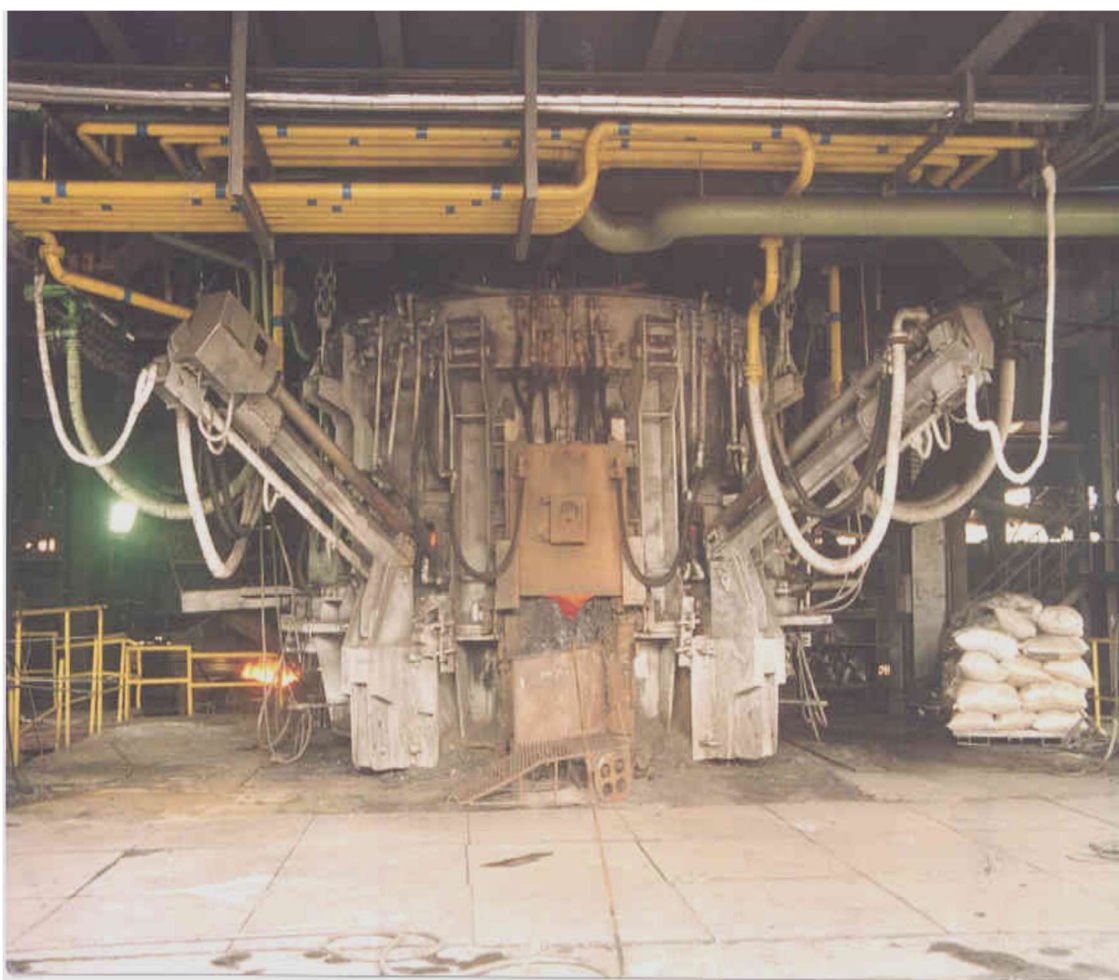


Figura 19 - Visão frontal do forno EOF
Fonte: Silva (2004)

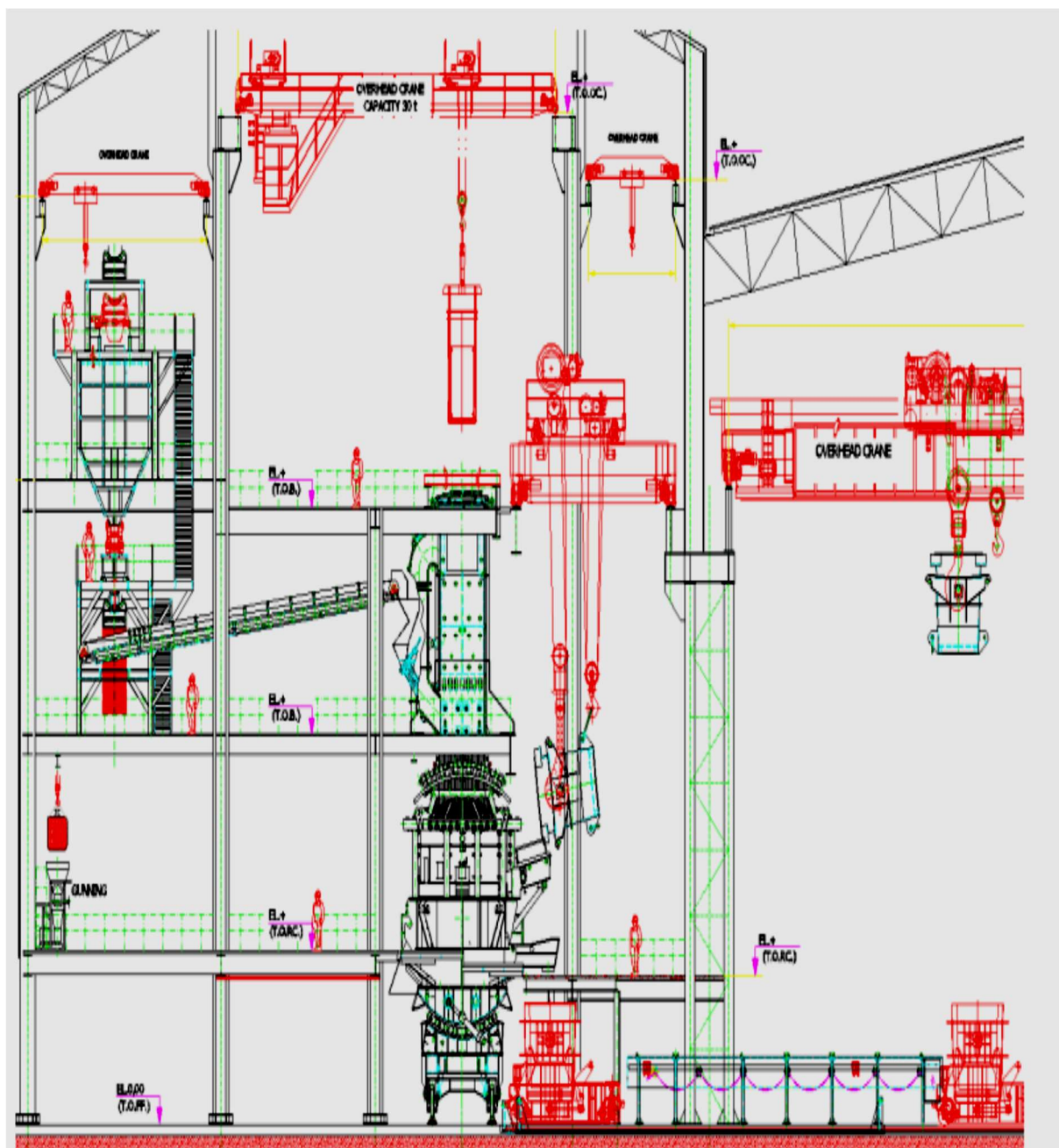


Figura 20 - Desenho da nave do forno EOF
Fonte: Pfeifer (2009)

O forno conta com um resfriamento da sua estrutura por painéis refrigerados e tem um consumo de água na ordem de $1700\text{m}^3/\text{h}$, a qual é resfriada por um sistema de torres de resfriamento. A água é recirculada e tratada na unidade, onde são controlados todos os parâmetros de qualidade da mesma. Todos os painéis do forno EOF são em tubos de aço, não sendo utilizados painéis de cobre para esse forno. A região de pré-aquecimento da sucata e os painéis refrigerados no interior do forno EOF podem ser observados na Figura 21.



Figura 21 - Painéis no interior do forno EOF
Fonte – Próprio autor

O sistema de tratamento dos gases e controle ambiental é feito por sistema de despoejamento úmido com poder de sucção de $135.000\text{m}^3/\text{h}$. A pressão e velocidade dos gases no interior do forno são controladas por um supervisor do sistema de

lavagem de gases e despoeiramento. O material particulado do interior do forno é retirado do gás por um sistema venturi e o gás limpo é liberado na atmosfera. Para o prédio onde está instalado o EOF um segundo despoeiramento com filtro de mangas realiza a retirada do material particulado deixando limpa a atmosfera.

4.2 Levantamento de Dados para Análise do Sistema

Dentre as variáveis presentes no processo de produção no forno EOF, os principais para o desenvolvimento deste trabalho estão divididas em 3 grupos: Variáveis relacionadas aos gases do forno (temperatura, vazão, pressão, composição química), variáveis relacionadas com as perdas térmicas pelos painéis refrigerados (coeficiente global de transferência de calor dos painéis refrigerados) e as variáveis relacionadas a sucata metálica (coeficiente de transferência de calor, fração de vazão, densidade). Estas variáveis serão estudadas e descritas neste capítulo do trabalho e serão utilizadas na modelagem matemática do forno EOF.

4.2.1 Levantamento de dados dos gases

O forno EOF em operação já passou por várias modificações a fim de se obter melhorias em sua performance de trabalho, por esse motivo algumas das variáveis com relação aos gases do forno foram obtidas *in loco* para evitar erros provenientes de modificações realizadas. A composição dos gases que entram em contato com a sucata e a vazão de gases foi obtida na saída da chaminé do forno através de medições no local. A construção do forno e forma de operação do mesmo permite que durante a operação e refino do aço, uma quantidade considerável de ar atmosférico seja arrastada para o interior do forno com a pressão negativa gerada pelo despoeiramento e fluxo dos gases no forno. Pode-se observar na Figura 22 que as principais entradas de ar atmosférico no interior do forno estão localizadas na porta de saída de escória e o conjunto de transição do forno, onde se tem a junção da parte fixa (pré-aquecimento) e da parte móvel (abóboda do forno) que faz o movimento de basculamento para vazamento do aço e escoria.

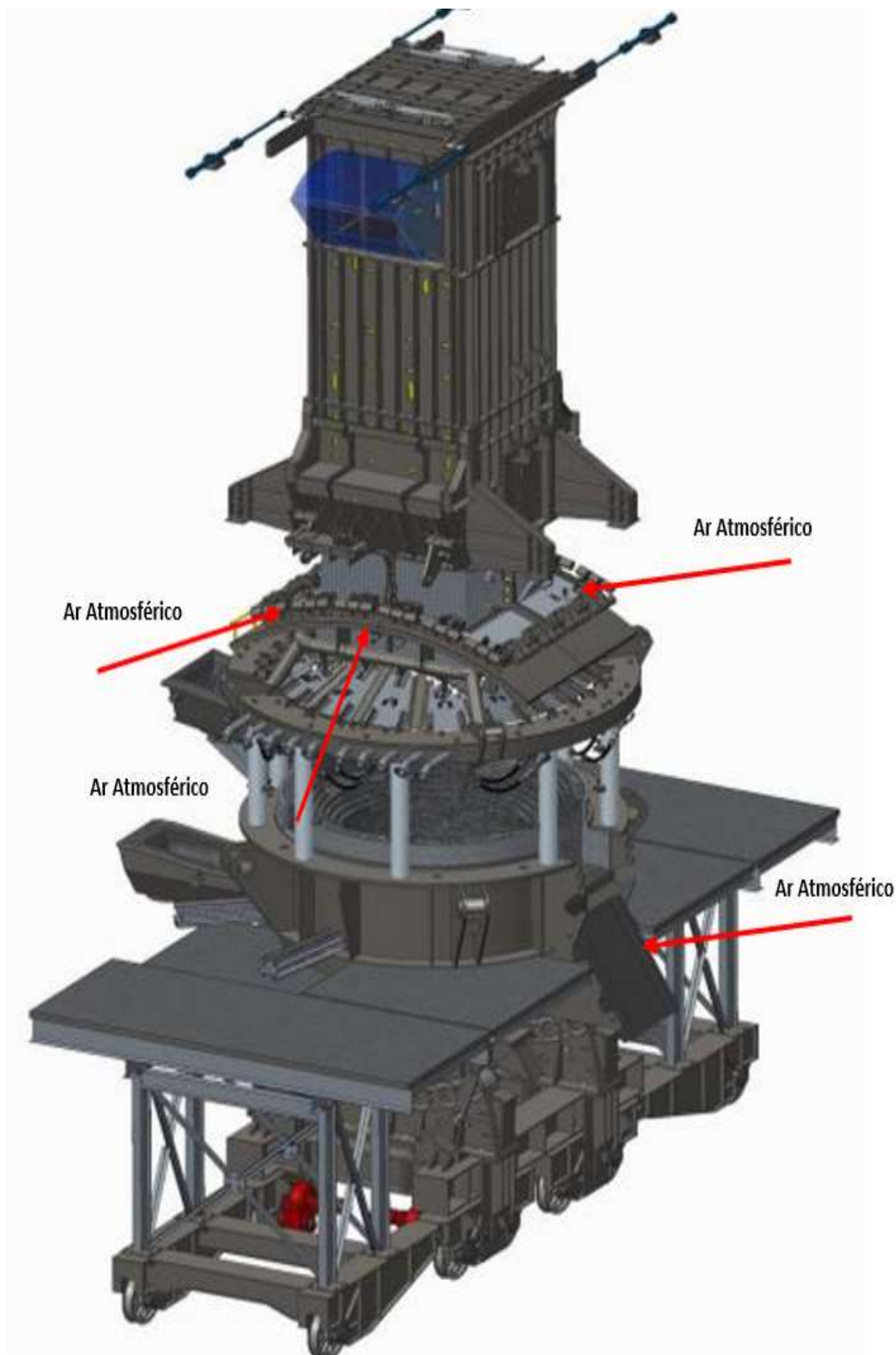


Figura 22 - Desenho do forno EOF
Fonte: Pfeifer (2009)

Através da análise dos gases pelo método ORSAT, obtivemos a composição química dos gases de saída do forno e podemos observar uma grande presença de nitrogênio.

A densidade dos gases é muito semelhante à da atmosfera mostrando grande quantidade de ar atmosférico entrando no forno. Segundo Carvalho (2017) a análise através do analisador de ORSAT, apresentado pela primeira vez por Louis Hengist Orsat em 1875, é amplamente utilizada em plantas de potência e permite a separação dos constituintes de combustão dos gases de exaustão por absorção em um reagente.

O método tem o objetivo de analisar os componentes da combustão dos gases, que são o CO_2 , CO , SO_2 e NO_x , também é resultado da análise a massa molar do composto de gases. Na tabela 3 pode-se observar o resultado obtido pelo ORSAT durante medição na chaminé do EOF em operação e a vazão de gases no momento da análise.

Tabela 3 - Análise dos gases pelo método de ORSAT

Item	Valor	Unidade
CO_2	8	%
O_2	13	%
CO	0,5	%
N_2	78,5	%
Massa molar	29,8	g/mol
Vazão	47000	Nm^3/h

Com os dados de vazão medidos na saída da chaminé, sabendo que a injeção média é de $150 \text{ Nm}^3/\text{min}$ de oxigênio no forno e a temperatura dos gases medida após saída do banho está na ordem de 1150°C , como o gás se comporta como um gás ideal, através da equação de Clapeyron obtém-se os dados faltantes para modelagem do gás no interior do forno.

A tabela 4 apresenta os dados utilizados para modelagem matemática do fluxo de gases.

Tabela 4 - Dados dos gases do sistema

	Valor	Unidade
Gases de exaustão (65°C)	783	m ³ /min
Injeção de O ₂ pelas ventaneiras (25°C)	150	m ³ /min
Ar atmosférico (25°C) 21% O ₂ 79% N ₂	540	m ³ /min
Total gás de entrada do sistema a 1150°C	917	m ³ /min
Pressão negativa chaminé	-140	kPa
Massa molar por Orsat	29,8	g/gmol
Massa de gás de entrada	15,30	kg/s

4.2.2 Levantamento de dados da transferência de calor dos painéis refrigerados

O forno EOF é composto por painéis tubulares (Figura 23) e tipo caixa (Figura 24) em material de aço carbono A36 e A515. Os painéis formam a estrutura da abóboda, pré-aquecedor e *by pass* (tubulações de passagem livre dos gases no interior do forno).



Figura 23 - Parede com painel tubular
Fonte: Silva (2014)

Os painéis tipo tubular, que são os mais comuns no forno EOF, são fabricados com tubos de diâmetro 63,5mm.

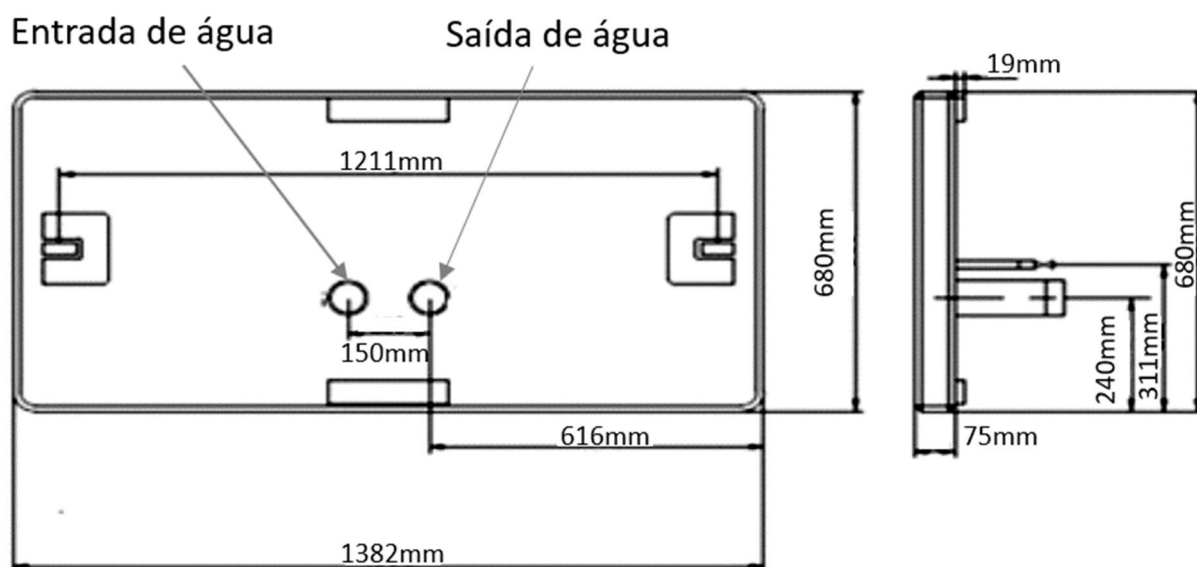


Figura 24 - Imagem ilustrativa de um painel caixa
Fonte: Adaptado de Silva (2014)

A ligação de água nos painéis é feita paralelamente através de ramais de água para garantir os parâmetros ideais de velocidade, temperatura e pressão da água. Os painéis são formados por uma serpentina de tubos e possuem uma conexão de entrada e saída de água.

Os parâmetros que devem ser levados em conta e monitorados, durante a operação do forno, nos painéis refrigerados são tipicamente conforme abaixo:

Tabela 5 - Parâmetro típicos de água nos painéis refrigerados

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade da água	2 a 3	m/s
Perda de pressão	2	bar
Vazão específica de água por metro quadrado de painel refrigerado	8 a 15	m ³ /h/m ²
Temperatura de entrada de água	≈ 35	°C
Temperatura de saída de água	< 60	°C

A medição de temperatura da água nos painéis é feita na saída de água individualmente. Sendo realizado por termopares com 3 possíveis posições de montagem, sendo:

- a) Em seções anguladas, contra sentido do fluxo.
- b) Em tubos menores, voltados contra a sentido do fluxo
- c) Perpendicular à direção do fluxo

Na Figura 26 pode-se observar uma montagem de painel refrigerado com a indicação do local de medição de temperatura pelo termopar.

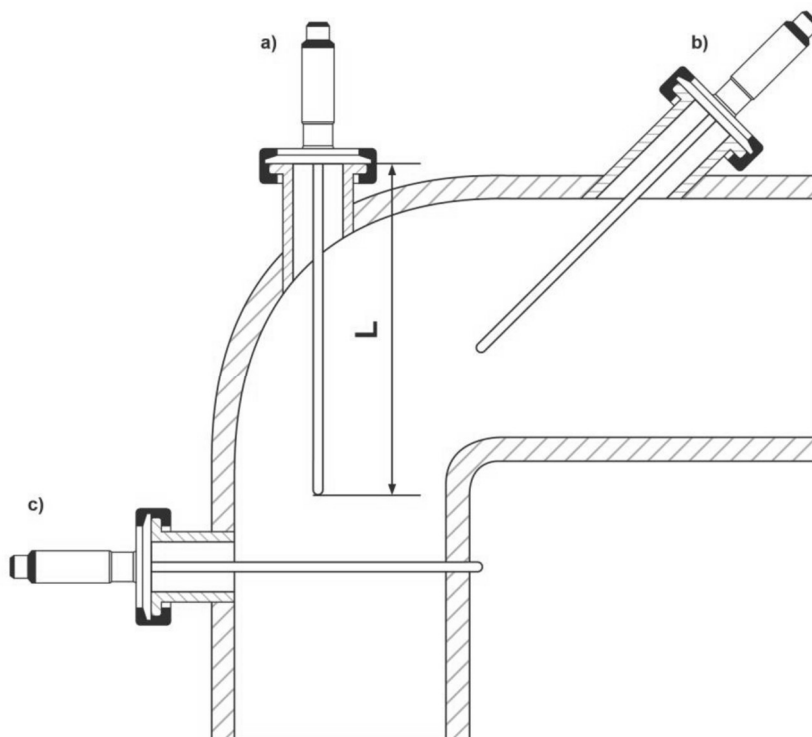


Figura 25 - Esquema de montagem de termopares nos painéis refrigerados
Fonte: Próprio autor



Figura 26 - Montagem de um painel refrigerado
Fonte: Próprio autor

Com base nestes conceitos aqui apresentados e com posse dos modelos matemáticos contidos no capítulo 3.5 deste trabalho, se tem as variáveis contidas na tabela 6 que irão alimentar o modelo matemático.

Tabela 6 - Variáveis de trabalho da transferência de calor da água

Variável	Valor	Unidade
d^1	0,073	m
d^2	0,054	m
δ	0,00952	m
$k_{aço}$	60,5	W/m.K
q^1	900	W/m ²
h	8,55	W/m ² .K
a	2,74	-
v	2	m/s
T^1	334,4	K
T^2	334,3	K
$q_{\text{água}}$	139,2	W/m ²
$T_{\text{água}}$	318	K
Pot	139,2	kJ/s
$Q_{\text{água}}$	8	m ³ /h
$C_p \text{ água}$	1,16	Wh/(kg.°C)
$\Delta T_{\text{água}}$	15	K
R_a	0,3	-
U	5,963	W/m ² .K

4.2.3 Levantamento de dados da transferência de calor para sucata metálica

O fenômeno de fluxo de transferência de calor por fluidos através de meio poroso, tem sido extensivamente investigado devido suas aplicações de engenharia. Neste trabalho é analisado o fluxo de gases no interior do forno EOF que saem do banho de aço a uma temperatura de 1150°C e trocam calor aquecendo a sucata metálica no pré-aquecedor do forno para posteriormente ser utilizada para produção do aço líquido otimizando o gasto energético no processo. Esta transferência de calor ocorre por convecção e radiação dos produtos de combustão e condução dentro do pacote de sucata. A sucata utilizada na produção pelo forno EOF é predominantemente heterogênea e com partículas de formato irregular.

No estudo a sucata foi representada como domínio de sistema poroso, com fração de vazio de 0,8 e 0,85 conforme representado nos estudos de Mandal (2010). O domínio poroso que representa a sucata metálica no interior do forno EOF foi configurado com os valores de transferência de calor calculados através das equações citadas no capítulo 3.4 deste trabalho e o material sólido do domínio é o aço. As características da sucata e do processamento em pátio de sucata que alimentam o EOF, como a fração de vazio, densidade dos pacotes, tipo de sucata e forma de processamento são compatíveis com as citadas no estudo de Mandal (2010), desta forma neste trabalho é utilizado o diâmetro de partícula de 0,03m para cálculo da permeabilidade do sistema poroso. A sucata metálica no interior do forno foi considerada como isotérmica devido suas características e o coeficiente de calor entre o fluido e o a sucata.

Na tabela 7 podemos ver os parâmetros e valores ou equações utilizadas na modelagem da sucata metálica através do domínio poroso.

Tabela 7 - Parâmetros e equações para simulação do domínio poroso

Parâmetros	Valores / Equações
Fração de vazio	0,8 (modelo 1); 0,85 (modelo 2)
Permeabilidade, k	$k = \frac{\varepsilon^3 \cdot d_p^2}{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2}$
Fator geométrico	$F = \frac{1,75}{\sqrt{150} \cdot \varepsilon^{3/2}}$
Condutividade térmica	$k_{solid} = (1 - \varepsilon) \cdot k_s + k_r$ $K_{fluid} = \phi K_f$
Coeficiente de transferência de calor	$h_{fs} = K_f \cdot \frac{(2 + 1,1 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,6})}{d_p}$ $h_v = h_{fs} A_s = \frac{Af(\omega) V_g^{0,9} \cdot T^{0,3}}{d_p^{0,75}}$
Diâmetro de partícula	$D_p = 0,03 \text{ m}$

4.3 Elaboração e Desenvolvimento do Modelo Geométrico

Para elaboração do modelo geométrico do forno, foram utilizados os desenhos disponíveis do forno e seus componentes internos que influenciam no fluxo gasoso. O modelo simplificou alguns detalhes de quinas e geometrias que não interferem no fluxo internos dos gases.

A representação da sucata metálica foi feita através da criação de um domínio poroso que representa o volume de sucata carregada no forno. Como a sucata no interior do forno fica sobre os garfos refrigerados de formas variadas e imprevisíveis, o domínio poroso foi feito na forma de um cubo.

A Figura 27 abaixo representa o modelo geométrico do forno utilizado para as simulações deste trabalho.

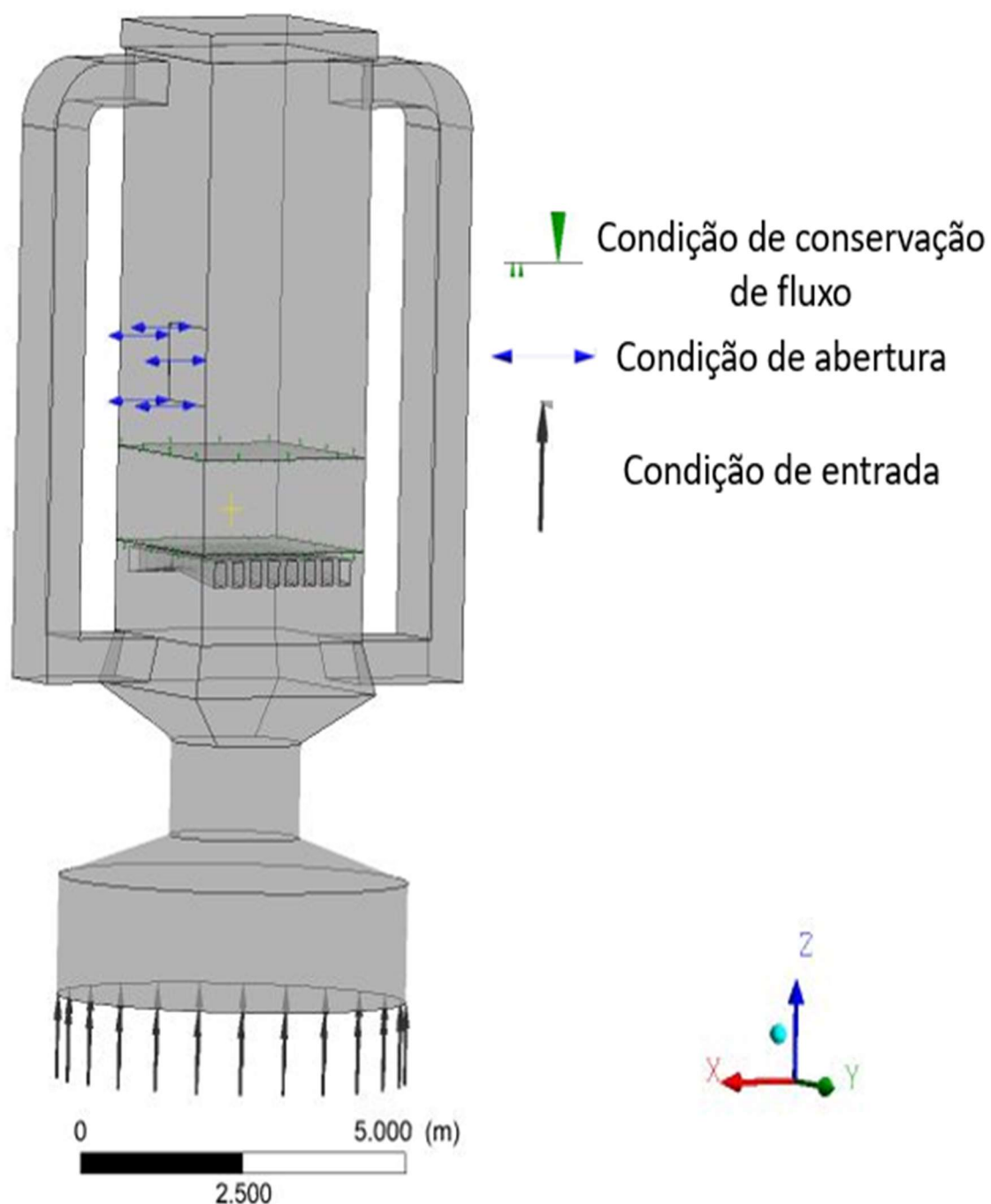


Figura 27 - Modelo geométrico forno EOF

As simulações foram realizadas em escala 1:1, a utilização de simetria para possibilitar otimização do tempo de cálculos não foi possível devido à complexidade da forma do forno e falta de simetria entre os “by pass” e a saída de gases para o lavador de gases.

Foram consideradas as seguintes condições de contorno do forno EOF instrial e do seu modelo físico:

- Paredes: Nas paredes foi assumida a condição de escorregamento livre (*free slip*) para os gases de processo.
- Duto de despoeiramento: Na superfície do duto de despoeiramento foi adotado a condição de contorno de abertura. Isso significa que através desta superfície os gases podem escoar livremente.
- Superfície interação domínio poroso: Na superfície de interação do domínio poroso com o domínio do forno foi adotado a condição de conservação de fluxo, permitindo fluxo livre dos gases entre os dois domínios.
- Superfície de injeção de gases: Na superfície do forno de saída dos gases do banho de aço líquido, foi considerado a condição de entrada para gases. A vazão mássica de entrada foi de 15Kg/s.

4.4 Malha Numérica

A malha utilizada para resolução do problema foi criada pelo método de malha tetraédrica, sendo que nas regiões de contorno ou paredes foram criados elementos tipo *prism layers*, que permitem um refinamento da malha nestes pontos.

Para obter maior confiabilidade nos resultados apresentados, foi realizado um estudo de independência de malhas através de simulações, onde foram monitoradas as variáveis de pressão (P) e temperatura (T) em 5 pontos distintos do modelo afim de obter o refino ideal da malha do modelo. O estudo se iniciou com um tamanho de elemento de 0,15 metros e sistema de *advecção UpWind*. Abaixo na tabela pode-se observar os resultados desse estudo, o qual demonstrou que para tamanhos de elementos menores que 0,09 metros obtém-se os mesmos resultados para as variáveis. O sistema de advecção em *high resolution* obteve os mesmos resultados para tamanho de elementos menores que 0,09 metros porem com tempo de simulação maior.

Tabela 8 - Independência de malha

Tamanho elemento (m)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5	
	P (Pa)	T (°C)	P (Pa)	T (°C)	P (Pa)	T (°C)	P (Pa)	T (°C)	P (Pa)	T (°C)
0,15	604	1.150	582	1.139	184	1.126	593	888	599	919
0,13	625	1.150	598	1.140	187	1.116	606	917	616	952
0,12	635	1.150	603	1.144	202	1.136	612	875	623	931
0,1	631	1.150	603	1.144	198	1.133	612	925	623	900
0,09	628	1.150	599	1.144	201	1.136	610	907	620	901
0,08	628	1.150	599	1.144	201	1.136	610	907	620	901
0,07	628	1.150	599	1.144	201	1.136	610	907	620	901

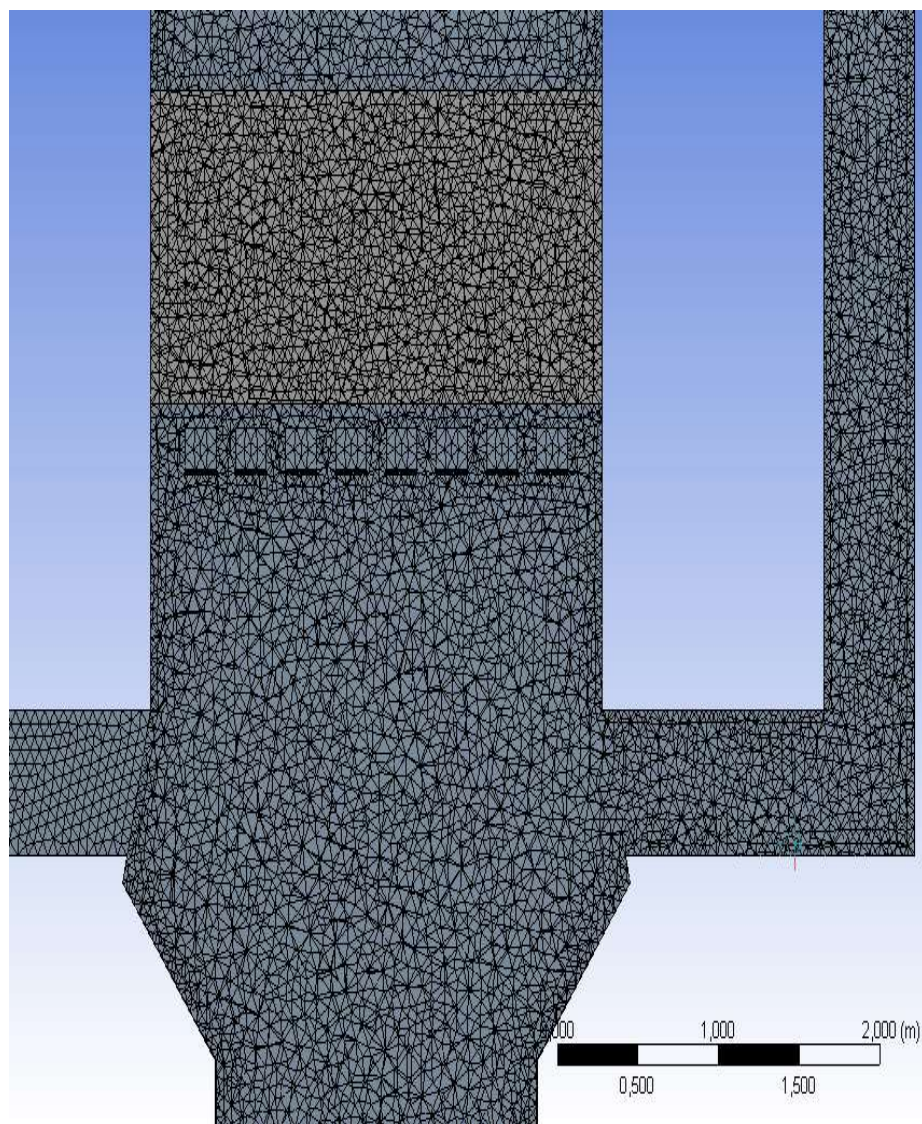


Figura 28 - Representação em corte da malha numérica

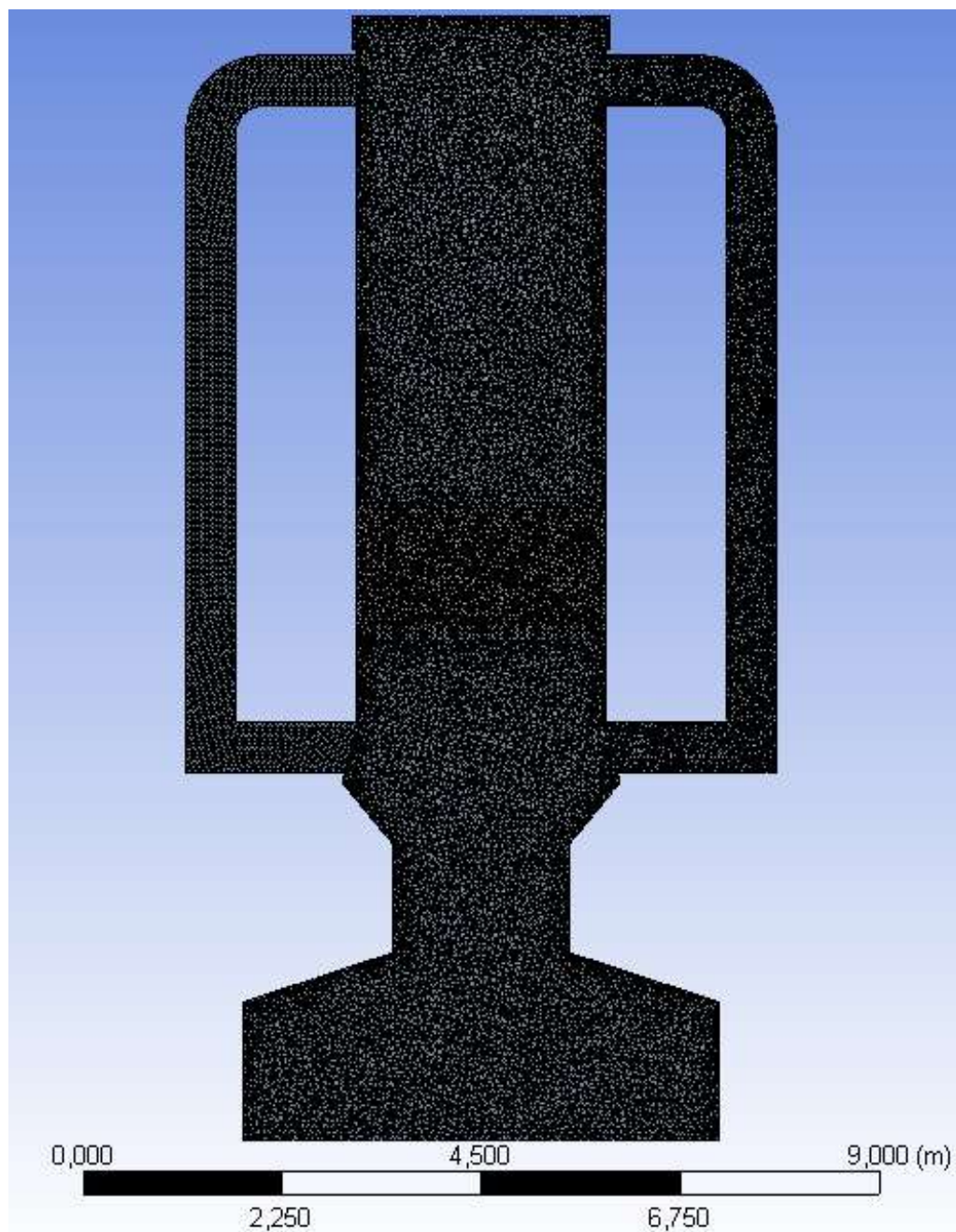


Figura 29 - Representação da malha numérica

A partir da definição do elemento de malha, foi possível dividir o domínio do problema em estudo. O tamanho base dos elementos após o refino da malha foi de 90 mm, com tamanho mínimo de 21 mm, com exceção da região onde a sucata entra em contato com os garfos refrigerados. Na região entre a sucata e os garfos, foi necessário elementos com 12,5 mm. O modelo apresentou um total de 1.401.441 elementos e 260.872 nós. Nas figuras 28 e 29 se tem a representação da malha numérica no modelo geométrico.

4.5 Descrição do Modelo

Para modelagem da fase gasosa, foi utilizado o composto de gases CO, CO₂, N₂ e O₂, conforme amostrado na análise dos gases de saída do forno. O gás foi considerado como um gás ideal e representado em fase continua de escoamento. A temperatura dos gases na saída do banho foi medida através de termopar inserido especificamente para estudo e constatado um valor aproximado 1150°C. O volume de gás de entrada foi considerado de 15kg/s conforme calculado pela análise dos gases, este volume representa a soma dos gases de combustão com a entrada de ar atmosférico no interior do forno. A pressão inicial do interior do forno foi considerada como sendo a pressão de uma atmosfera.

As paredes do domínio foram parametrizadas para simular o efeito dos painéis refrigerados no interior do forno, assim os parâmetros que envolvem a transferência de calor entre os gases e a parede foram todos levados em consideração na solução do problema.

Para simulação da sucata, conforme mencionado anteriormente, foi utilizado um domínio poroso com fração de vazio de 0,8 e 0,85 e área interfacial de 283m⁻¹ e 212m⁻¹ respectivamente. A permeabilidade foi calculada utilizando a equação 3.1 com diâmetro da partícula de 0,03 metros.

Como o forno opera em ciclos e a sucata aquece apenas durante um ciclo de operação, as simulações foram realizadas em regime transiente considerando 12 minutos de operação do forno com um passo tempo de 2 segundos.

Os modelos foram simulados através do Ansys em CFX na unidade do CEFET-MG utilizado o modelo de turbulência K-epsilon e as simulações foram feitas no sistema de advecção upwind com dupla precisão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foram realizadas simulações com o domínio poroso desativado em regime estacionário para verificar o comportamento dos gases, a troca térmica com os painéis refrigerados e a temperatura dos gases no interior do forno. Para verificação da temperatura foi adicionado um termopar na região do *by pass* e medido a temperatura por 10 ciclos de produção sem sucata e depois o mesmo procedimento com o pré-aquecimento de sucata. Após analisar e validar o modelo geométrico e gasoso, foi habilitado o domínio poroso e alterado para regime transiente a fim de obter o ganho de temperatura da sucata no pré-aquecedor durante um ciclo de produção da aciaria. Os valores de temperatura calculados pelo modelo serão comparados para validação com as medições realizadas na área.

5.1 Análise do Modelo com Domínio Poroso Desligado

As simulações com o domínio poroso desligado foram realizadas seguindo os valores das variáveis coletadas no processo e em regime estacionário pelo fato das variáveis que influenciam nessa etapa entrarem em equilíbrio após o início do ciclo de produção. Para esta etapa foi considerado a mistura de gases conforme análise realizada na chaminé no momento de vazão do sopro de 15kg/s de O₂. O coeficiente de transferência de calor dos elementos refrigerados das paredes do forno de 6W/m².°C e temperatura dos gases no início do processo de 1150°C. Na Figura 30 é possível verificar o fluxo dos gases no interior do forno e a velocidade dos mesmos dentro do domínio do forno. A velocidade é maior na região de transição para o pré-aquecedor de sucata devido à redução da secção do forno e também na saída de gases para o duto de despoeiramento, onde há pressão negativa para fazer a sucção dos gases e particulados provenientes do processo, a velocidade dos gases varia entre 15m/s a 40m/s nessas regiões. As regiões de menor velocidade dos gases são os *by pass* e acima do nível do duto de despoeiramento, onde encontramos valores entre 0,5m/s a 3m/s.

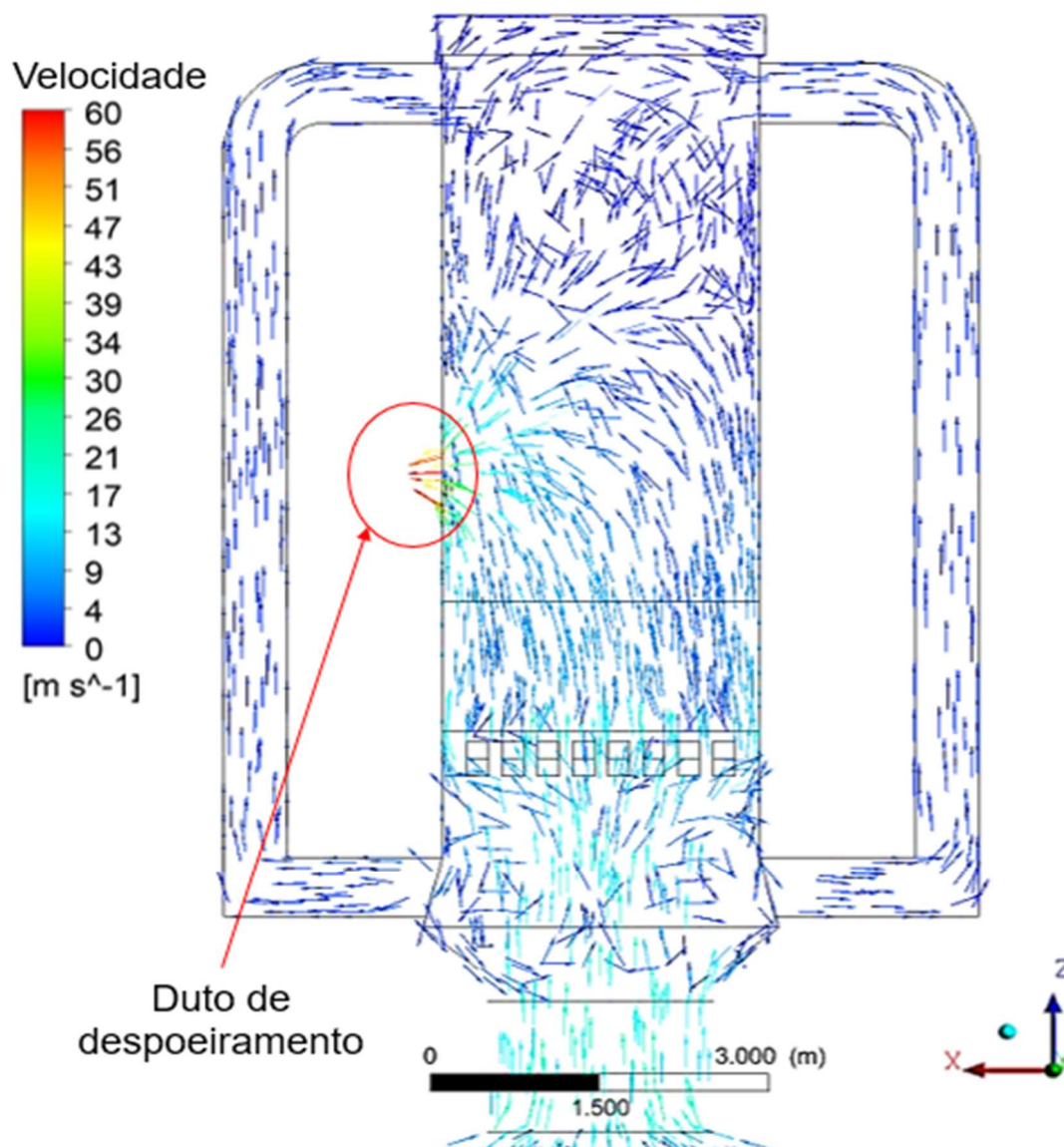


Figura 30 - Vetores de velocidade dos gases em domínio sem meio poroso ativo

É possível analisar o fluxo gasoso no interior do forno pela Figura 31. O fluxo principal de gases passa direto pela região de pré-aquecimento e segue em direção ao duto de despoeiramento. Um menor fluxo de gases, principalmente sem a presença de sucata metálica, muda a direção ao colidir com a estrutura dos garfos refrigerados formando vórtex na região após o funil do forno e acima da região de pré-aquecimento, redirecionando uma parte do fluxo para os *by pass*. Nas simulações sem a representação da sucata metálica um fluxo baixo de gases segue pelo os *by pass* do forno, mantendo o fluxo preferencial de menor distância para o duto de despoeiramento.

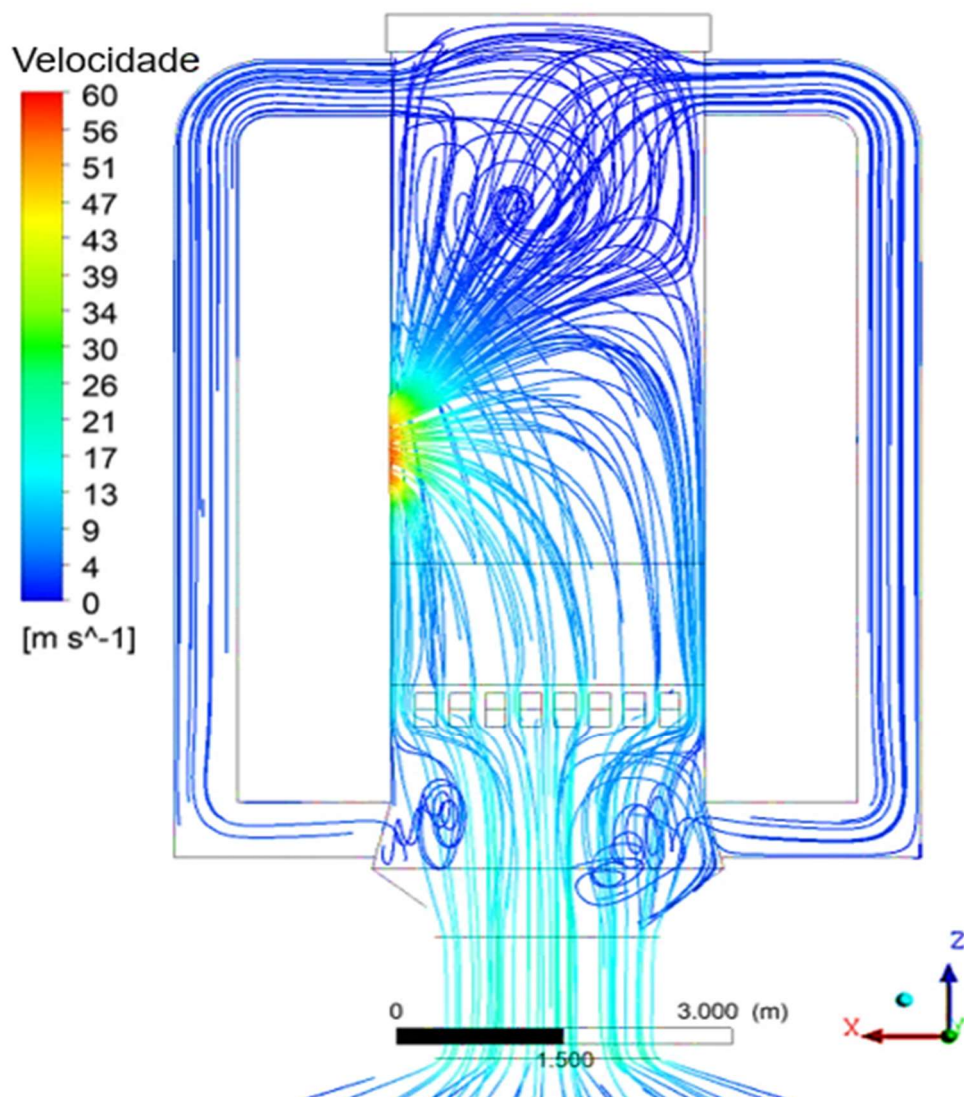


Figura 31 - Linhas de representação do fluxo gasoso sem meio poroso ativo

Na Figura 32 pode-se observar em planos de corte, a variação da temperatura dos gases ao longo do forno. Sendo o plano A, B, C e D a altura no eixo Z de 3m, 6m, 8m e 11m respectivamente. Observa-se que o efeito de troca de calor nas extremidades, próximo aos painéis refrigerados, é pequeno devida a alta velocidade dos gases no forno. A grande diferença no padrão de temperatura se dá na entrada dos *by pass* e acima da região dos garfos refrigerados.

Para verificação e validação do modelo, nesta etapa foi inserido um termopar no *by pass*, no local sinalizado na Figura 32 como sendo o ponto 5. As medições realizadas neste ponto com o termopar inserido no forno tiveram resultados entre 900°C a 950°C

durante 10 ciclos de corridas no forno sendo a médias dos valores de 915°C. No modelo matemático foi obtido a medição de temperatura no ponto 5 da simulação de 905°C, muito próxima da média obtido na indústria, tornando válido o modelo do escoamento dos gases e as trocas térmicas com as paredes do forno.

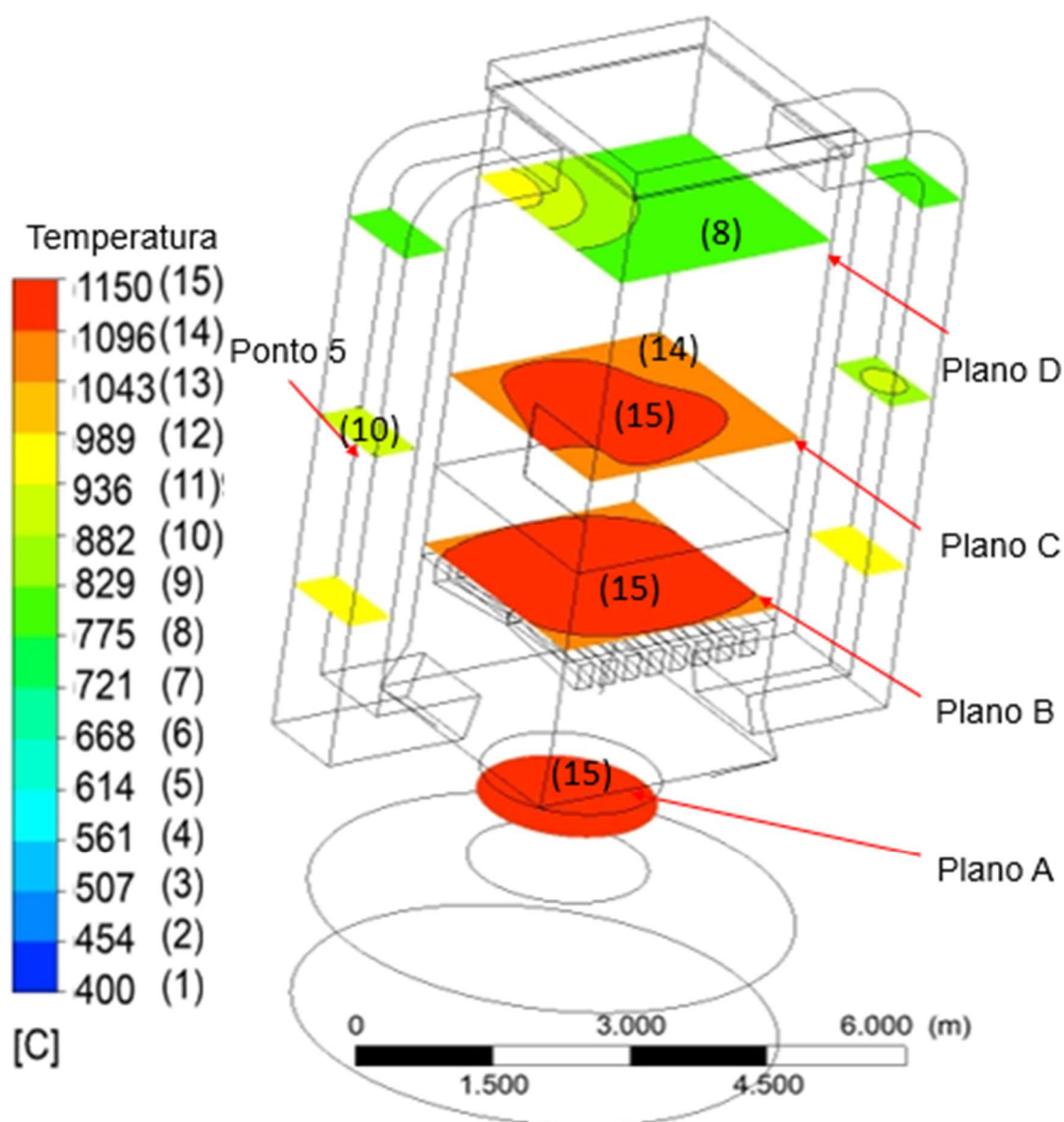


Figura 32 - Perfil de temperatura dos gases no interior do forno

Na Figura 33 observa-se que o gás quente chega até a região de pré-aquecimento de sucata a uma temperatura de 1096°C a 1150°C no modelo com o meio poroso desativado. O ar quente segue diretamente para o duto do despoeiramento e acima da altura do duto de despoeiramento se tem o gás a uma temperatura

consideravelmente menor, devido a menor velocidade dos gases e maior contato com os elementos refrigerados no by pass.

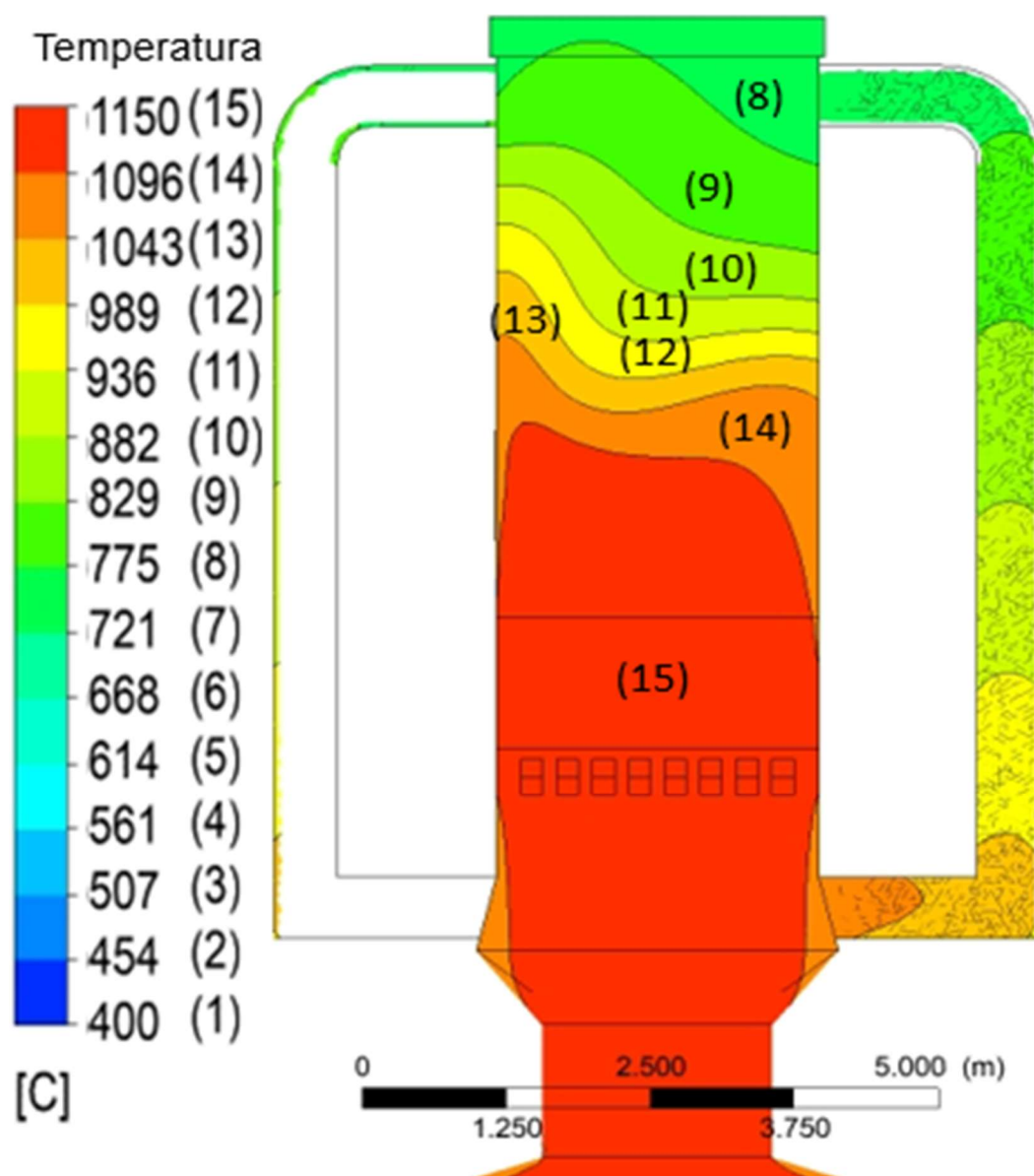


Figura 33 - Perfil de temperatura dos gases no interior do forno

Nesta primeira etapa de simulações sem a representação da sucata metálica representada pelo domínio poroso, é possível observar os comportamentos dos gases e validá-los com o forno em operação. Os valores de entrada e saída de gases foram utilizados conforme medições na área mencionados anteriormente e a temperatura dos gases foi validada pelas medições no local representado como ponto 5 do modelo,

tornando valido os valores do modelo com domínio poroso desativado podendo seguir com as simulações do domínio poroso ativo.

5.2 Análise do Modelo com Domínio Poroso Ativado

Nesta etapa serão apresentados os resultados das simulações com o domínio poroso ativo representando a sucata metálica no interior do forno. Foram realizadas simulações com base nos parâmetros de sucata utilizados e controlados no pátio de processamento de sucata da unidade onde a aciaria está operando, sendo a fração de vazio entre 0,8 a 0,85. Para cálculo da permeabilidade e área interfacial do modelo de sucata, foi utilizado o valor de diâmetro de partícula de 0,03m referenciados e validados nos estudos de Mandal (2010), no qual também foi utilizado pacotes de sucata com as mesmas características deste estudo.

Na tabela abaixo se tem os parâmetros inseridos no domínio poroso para a representação da sucata metálica nas duas situações de processo.

Tabela 9 - Parâmetros domínio poroso

Variável	Fração de vazio 0,8	Fração de vazio 0,85
Permeabilidade	0,00008m ²	0,000018m ²
Diâmetro da partícula	0,03m	
Coefficiente de transferência de calor fluido – sólido	16 W/m ² .K	
Densidade de área interfacial	283m ⁻¹	212m ⁻¹

Nos resultados das simulações com o domínio poroso ativado é esperado observar uma dificuldade de fluxo dos gases através domínio poroso. Esta dificuldade é causada pela restrição de passagem dos gases pelos poros da sucata metálica, desta forma quanto menor a fração de vazio, maior será a restrição de passagem dos gases.

Na Figura 34 é possível observar esse comportamento dos gases para as duas situações estudadas, sendo (a) 0,8 de fração de vazio e (b) 0,85 de fração de vazio.

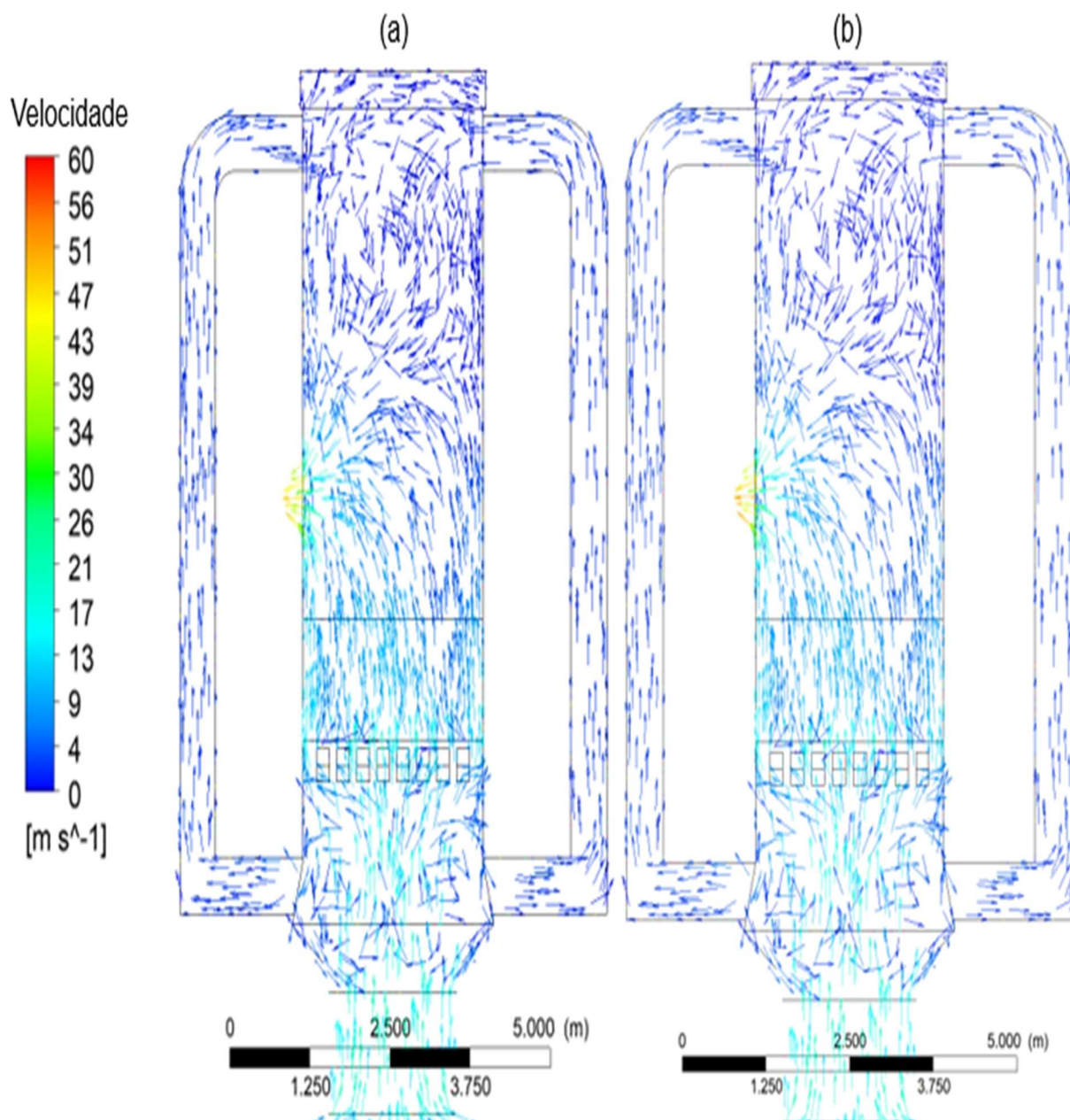


Figura 34 - Vetores de velocidade dos gases no interior domínio com meio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.

A análise do fluxo dos gases no interior do forno se faz importante para determinar o aquecimento da carga de sucata metálica uma vez que a velocidade e fluxo dos gases é proporcional ao coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a carga sólida. Quanto maior for a restrição de passagem dos gases na carga de sucata metálica,

maior será o fluxo de gases pelos *by pass* e menos homogênea será a temperatura da carga de sucata, o que acarretará em perda de energia no processo.

Com a passagem dos gases pela sucata metálica, o gás transfere temperatura para a sucata e fica a uma temperatura menor para saída no duto de despoeiramento. Na figura 35 no plano “C” é possível verificar que a temperatura dos gases próximos ao duto de despoeiramento está na ordem de 750°C, sendo que nas simulações sem o domínio poroso ativado a temperatura chega a 1000°C. A sucata metálica que é carregada no forno em temperatura ambiente, ganha temperatura durante o período de sopro do forno ultrapassando 400°C e chegando a 860°C no ponto mais quente que está em contato com os garfos refrigerados, sendo este valor próximo do referenciado no projeto do forno. Ainda na figura 35 pode-se verificar a mudança de temperatura ao longo do forno e a temperatura da sucata metálica após os 12 minutos de sopro do EOF que é o tempo padrão para refino do aço. Os planos de corte com a indicação de temperatura na figura 35 estão à altura de 3m, 6m, 7m, 8m e 11m para plano A, plano B, plano S, plano C e plano D respectivamente.

Com as frações de vazio de 0,8 e 0,85 é possível verificar principalmente uma homogeneidade de temperatura maior para 0,85 de fração de vazio. A escala de temperatura, entre máximas e mínimas são semelhantes, sendo que quanto menor a fração de vazio, menos gases passa na parte superior do pacote de sucata lado oposto ao duto de despoeiramento, formando uma região de baixa temperatura.

Na Figura 36 está representado o perfil de temperatura das superfícies dos pacotes de sucata para os dois modelos no plano de corte “S”, o qual é localizado na mesma superfície de medição de temperatura na indústria. Observa-se maiores temperaturas no domínio com 0,85 de fração de vazio e melhor equilíbrio térmico no pacote de sucata.

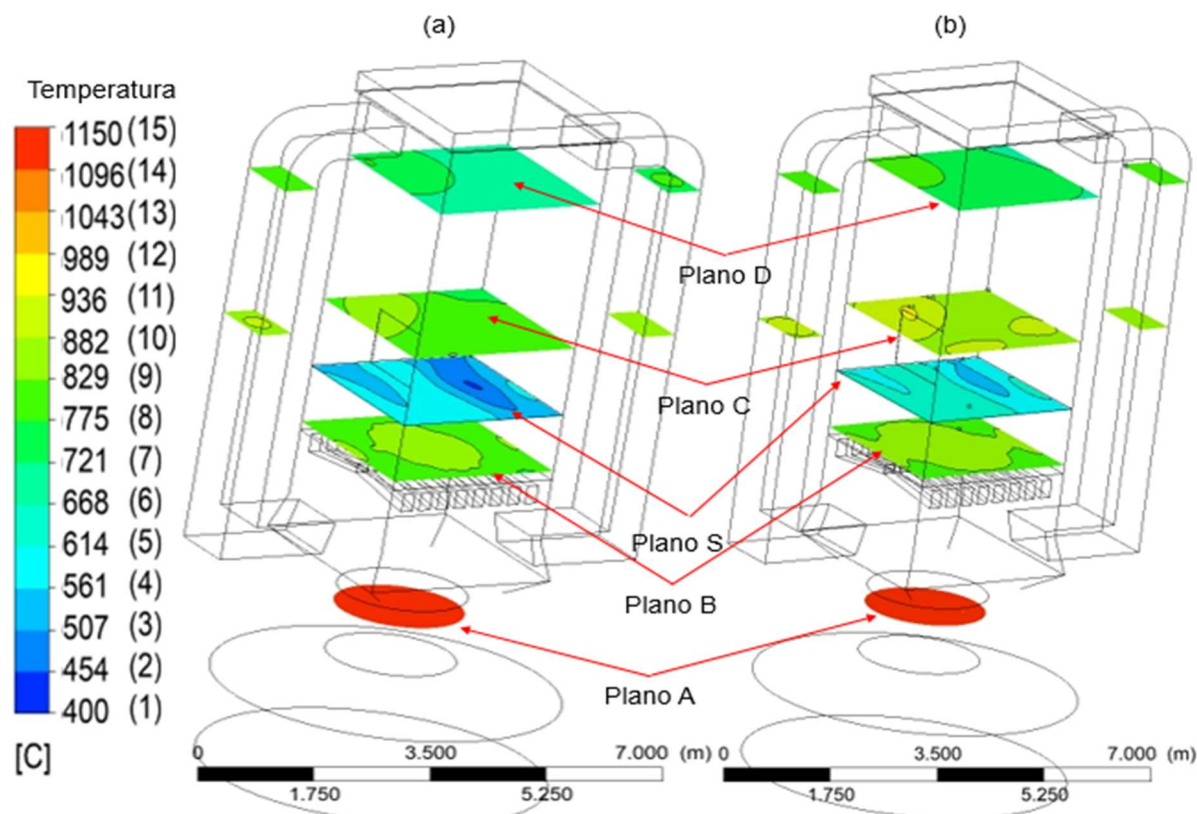


Figura 35 - Planos de temperatura no interior do forno com domínio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.

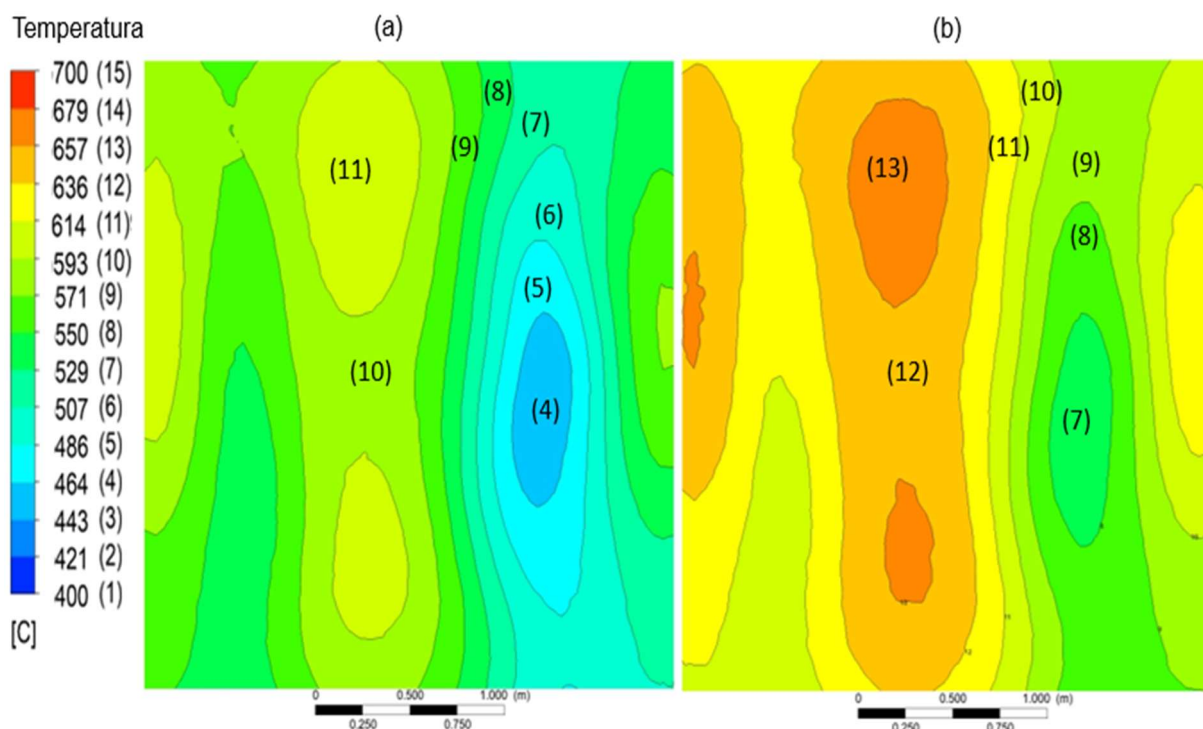


Figura 36 - Perfil de temperatura superfície do domínio poroso sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.

Foram realizadas medições durante o processo para validar o modelo de temperatura. As medições ocorreram pela parte superior do forno, onde é posicionado o cestão de sucata, utilizando uma câmera térmica da Fluke modelo Ti400 que realiza as medições médias das temperaturas em área, de forma semelhante a representada na figura 36. Nas 10 medições realizadas após o ciclo completo de corrida da aciaria, foi obtido como valor médio na parte superior da sucata aquecida de 580°C com desvio padrão de $\pm 156^\circ\text{C}$. Sendo o menor valor encontrado na superfície é de 390°C e o maior valor em 820°C. Medições pela parte inferior não são possíveis devido a geometria do forno e questões de segurança.

Na tabela 10, pode-se comparar as temperaturas da superfície dos pacotes de sucata dos dois modelos simulados com as medições industriais realizadas na aciaria.

Tabela 10 - Resultados de temperatura na superfície da sucata

Fração de vazio	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)
0,8	464	580	635
0,85	529	640	678
Medições <i>in loco</i>	390	580	820

No processo de carregamento do forno com a sucata metálica, a mesma é despejada no interior do forno pelo cestão de sucata e assenta de forma não uniforme na região de pré-aquecimento de sucata. Devido a não uniformidade na distribuição de sucata no processo, é observado extremos de temperaturas em uma mesma corrida.

Para demonstrar a não homogeneidade de temperatura no pacote de sucata, na figura 37 é possível verificar a distribuição da temperatura da sucata na superfície dos pacotes de sucata para 0,8 (a) e 0,85 (b) de fração de vazio.

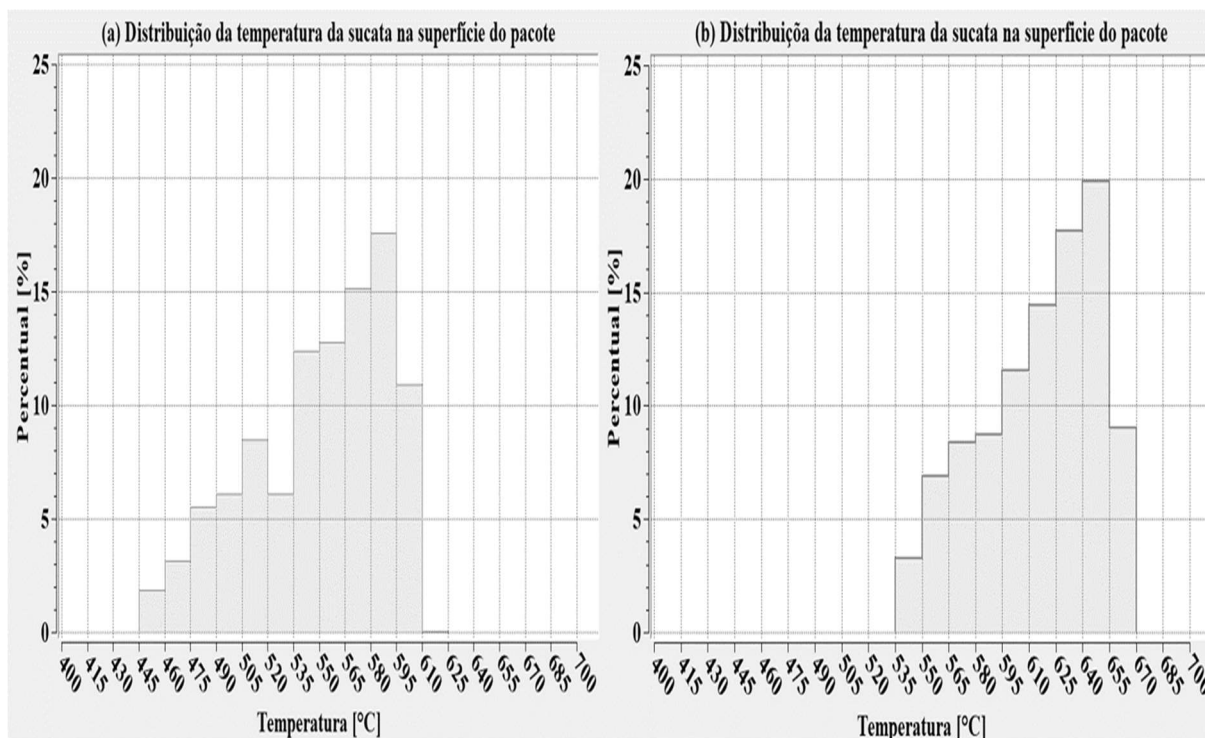


Figura 37 - Distribuição da temperatura da sucata na superfície dos pacotes sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.

Diferentemente da análise do corte transversal do pacote de sucata, representado pelo plano “S” da figura 35, a figura 38 representa um corte em plano vertical do perfil de temperatura da sucata no pré-aquecedor, sendo (a) para 0,8 de fração de vazio e (b) para 0,85.

A parte inferior do pacote de sucata recebe o gás em maior temperatura e consequentemente tem maior troca térmica. À medida que os gases vão subindo no interior do pacote de sucata, a troca térmica diminui com a redução da variação de temperatura entre fluido e sólido. Observa-se que para ambos os modelos, grande parte do volume de sucata encontra-se entre 650°C e 800°C.

A fim de entender o comportamento do aquecimento da sucata na região de pré-aquecimento foram realizadas simulações com mais 3 frações de vazio adicionais, uma vez que no processo real de processamento de sucata existem variações. Na tabela 9 podemos verificar os resultados de temperatura para todas as simulações realizadas. Os resultados da tabela 11 compreendem medições de temperatura em

todo o pacote de sucata, uma vez que as medições da superfície foram suficientes para validar o modelo matemático.

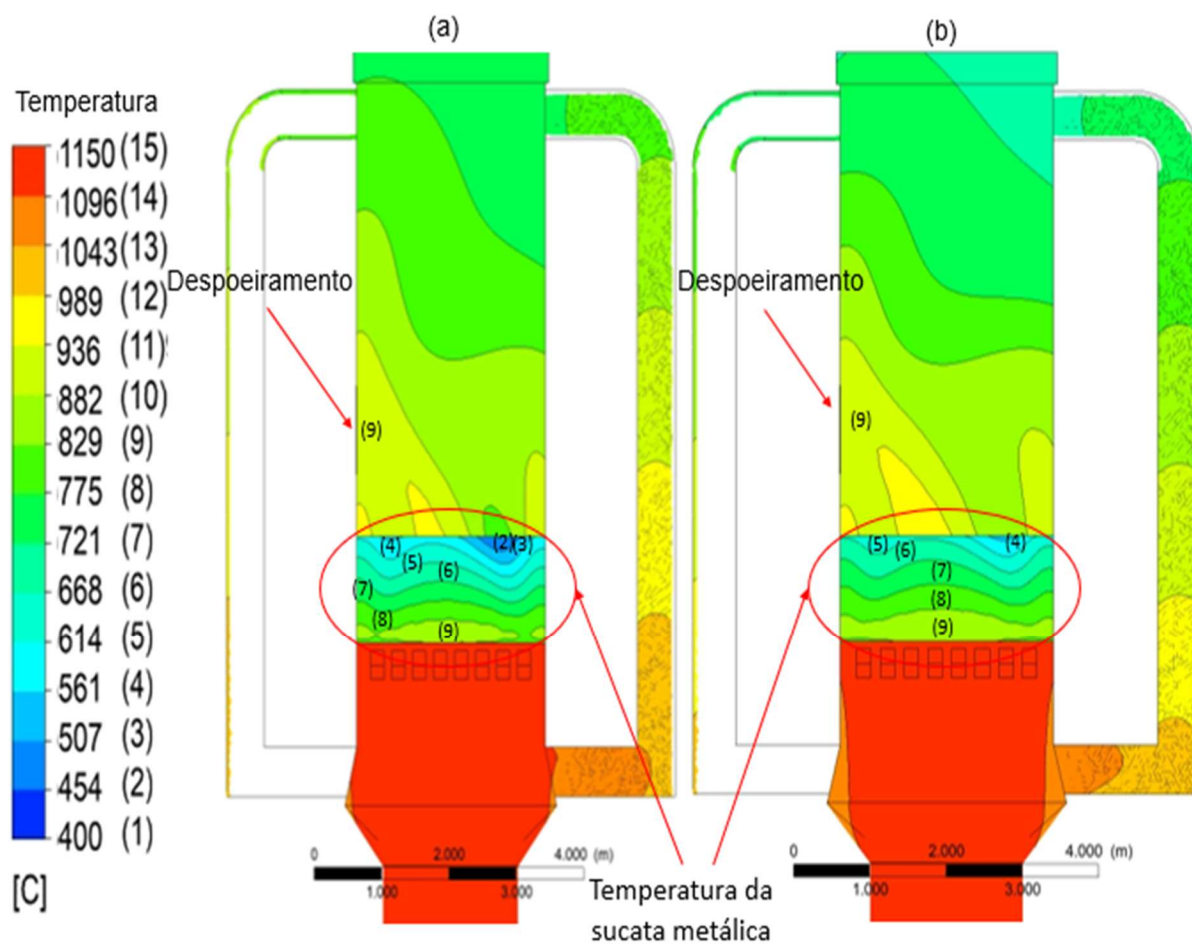


Figura 38 - Perfil de temperatura no interior do forno com domínio poroso ativo sendo para (a) fração de vazio de 0,8; e para (b) fração de vazio de 0,85.

Tabela 11 - Resultados das simulações de aquecimento de sucata

Fração de vazio	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)
0,65	240	540	830
0,7	300	570	835
0,75	370	610	850
0,8	450	700	860
0,85	535	750	870

Com os resultados das simulações em diferentes frações de vazio, observa-se que os valores medidos no processo estão entre os resultados encontrados em 0,75 e 0,8 de fração de vazio dos modelos calculados. Isso possivelmente ocorre devido a sucata de obsolescência ser de diversas origens e dimensões diferente e na unidade não passar por um triturador, homogeneizando o tamanho dos cortes antes de compactar na prensa de sucata.

Para analisar o ganho de temperatura dos pacotes de sucata ao durante o período de aquecimento do forno, foi inserido um monitor de temperatura no domínio poroso na região que recebe maior calor dos gases. A Figura 39 mostra a posição do termopar que se encontra a 0,2 metros acima dos garfos refrigerados e 6 metros acima banho de aço líquido.

Os resultados do monitor de temperatura da sucata nos modelos com diferentes frações de vazio, podem ser observados na Figura 40. A troca térmica entre os gases e a sucata metálica é proporcional a fração de vazio.

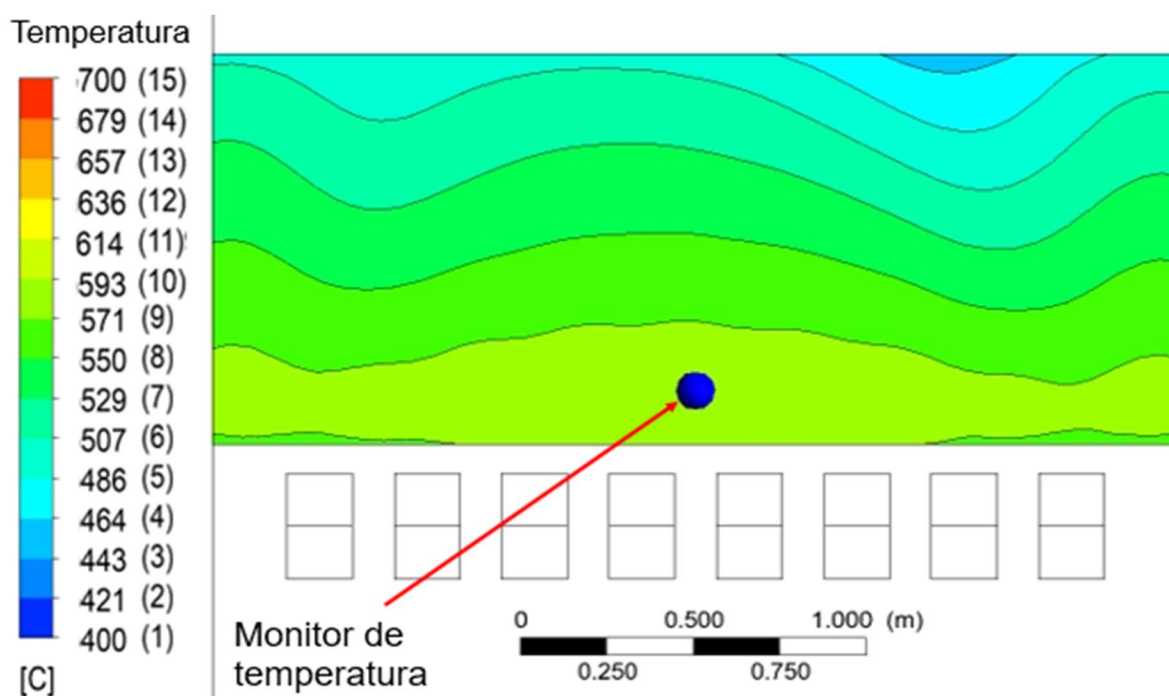


Figura 39 - Monitor de temperatura

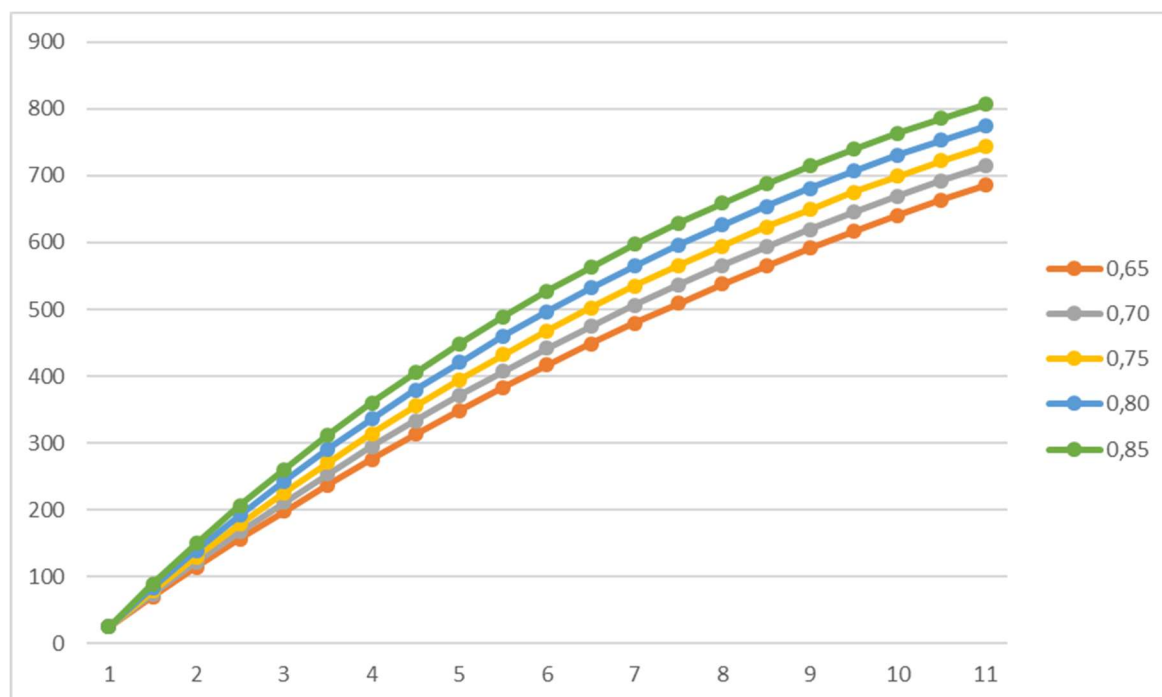


Figura 40 - Ganho de temperatura (°C) com o tempo (min)

O modelo é validado com base nos resultados obtidos através das simulações e comparados com as medições de temperatura *in loco*. As temperaturas medidas na aciaria no termopar do *by pass* (medição industrial de 915°C, medição do modelo matemático de 905°C) e medição da temperatura da sucata pré-aquecida estão dentro da faixa de valores do perfil térmico calculado no domínio poroso (medição industrial na superfície de 580°C, medição no modelo matemático na superfície de 580°C), observando que variações na temperatura são aceitáveis uma vez que a sucata é processada internamente e obtida de diferentes fontes como sucata de obsolescência, sucata de gusa e sucata de retorno de processo, como perdas metálicas na laminação.

Com a simulação matemática do modelo com o domínio poroso desativado, foi possível validar a modelagem do escoamento dos gases e trocas térmicas com a estrutura do forno e atmosfera inicial em temperatura ambiente. A validação se fez com a inserção do termopar no ponto 5 mencionado neste capítulo na figura 32 que retornou a temperatura de 915°C na simulação computacional e 905°C nas medições realizadas na aciaria no mesmo ponto.

Com a modelagem matemática do escoamento fluidodinâmico dos gases no interior do forno EOF e a modelagem matemática do aquecimento da sucata no forno utilizando a representação em domínio poroso, foi observado que o fluxo dos gases no interior do forno sofre alterações com a mudança da fração de vazio dos pacotes de sucata. Essa alteração é explicada devido a variação da permeabilidade da sucata que ocasiona a restrição (para menor fração de vazio) ou facilita (maior fração de vazio) a passagem dos gases do processo através da sucata. Durante o processo do interior do forno foi medido a temperatura média da superfície da sucata após o ciclo de sopro em 580°C com desvio padrão de $\pm 156^\circ\text{C}$. As medições realizadas no forno EOF validam o modelo matemático que demonstrou temperatura média de 580°C para 0,8 de fração de vazio da sucata e 640°C para 0,85 de fração de vazio.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo a fim de comparar e validar o aproveitamento energético da sucata metálica pelos gases de processo em um forno de refino primário tipo EOF. Dos resultados encontrados, as seguintes conclusões foram obtidas:

Os resultados de temperatura da sucata através da modelagem matemática utilizando a configuração do domínio poroso se mostraram válidas neste trabalho. Utilizando os dados de processo de injeção de oxigênio, temperatura dos gases na saída do banho de aço, volume de gases de saída do sistema de exaustão é possível calcular o escoamento fluidodinâmico dos gases através das equações de conservação no interior do sistema de exaustão e pré-aquecimento da sucata do forno EOF. Com a utilização da fração de vazio e o diâmetro de partículas dos pacotes de sucata é possível calcular e configurar o domínio poroso para simulação da sucata no interior do forno, tomando como base um modelo proposto por Mandal (2010).

As medições realizadas no EOF estudado mostraram uma média de temperatura na superfície dos pacotes de sucata de 580°C com desvio padrão de $\pm 156^{\circ}\text{C}$, já nas simulações através da modelagem matemática foram encontrados a média de 580°C para 0,8 de fração de vazio e 640°C para 0,85 de fração de vazio. A troca térmica que acontece no forno atual está compatível com a proposta do projeto do forno que são temperaturas de 800°C . É possível concluir que quanto maior a fração de vazio, maior a troca térmica entre os gases e a sucata metálica, podendo desta forma otimizar o ganho energético do processo com um melhor processamento da carga de sucata metálica. Porém, quanto maior a fração de vazio, maior o volume interno necessário para alocação da sucata no forno fazendo com que a superfície se aproxime do duto de exaustão do sistema. Desta forma propõe-se em novos estudos uma maneira de se encontrar um volume ótimo para alocação dessa sucata de forma a melhorar a transferência de calor e maior ganho energético.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar análises comparativas para os diferentes tipos de sucatas metálicas utilizadas no processo e realizar as simulações com a configuração do domínio poroso de acordo com as variáveis de cada tipo de sucata.

Realizar estudo para compreender o motivo de haver fusão de parte da carga metálica no pré-aquecedor durante a corrida de aciaria e minimizar esse efeito.

Testar cenários de corrida do forno com menor entrada de ar atmosférico e verificar no modelo físico o ganho de temperatura da carga de sucata metálica.

Realizar simulações que permitem a pós combustão dos gases no interior do forno, uma vez que através da análise dos gases é observado que há um número considerável de combustão incompleta dos gases e no projeto do forno prevê a pós combustão acima da região de pré-aquecimento.

8. BIBLIOGRAFIA

ARINKA, T.; HASSAN, M. I. Metal scrap preheating using flue gas waste heat, The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016.

BARÃO, C. D. Automação do eof. Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 50, 2019.

BORGES, R. A. A. Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço (convertedores ld) minimizando o custo, 2016.

CARNEIRO, C. A. R.; ALVES, H. A.; ATHAYDE, J. D. G. Desenvolvimento do controle dinâmico dos convertedores da aciaria 1 utilizando a análise dos gases. Aciaria Steelmaking, 2014.

CARVALHO, C. M. et al. Análise dos gases de exaustão de chaminés com o uso do aparelhos de ORSAT, 2017.

CONFEDERAÇÃO Nacional da Indústria. Instituto Aço Brasil. Brasília: CNI, 2012.

ELHALWAGY, M. M. M. Dynamics of the Phase Coupling for Flow, Heat and Mass Transfer in Conjugate Fluid/Porous Domains, 2018.

EOF- Energy Optimising Furnace: an updated and competitive oxygen steelmaking process, n. Vol. 30, Ed. 8, 2006.

FERREIRA, A. S. B. et al. Simulação computacional da carcaça metálica inferior do forno elétrico a arco da siderúrgica Sinobras S.A, 2017.

FREITAS, H. L. Análise numérica da eficiência de separação gás-líquido do lavador de gás da Arcelormittal Monlevade, 2012.

GARAJAU, B. S. Análise de falha e reengenharia dos dutos móvel e inclinado da aciaria eaf, n. 49º Seminário de Aciaria, ABM Week, 2018.

GONÇALVES, N. D. F. Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas, 2007.

GUPTA, N.; CHANDRA, S. Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature, 2004.

HSU, C. T.; CHENG, P. Thermal Dispersion in a Porous Medium, 1990.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 3a edição, 1990.

LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. [S.l.]: J. Fluid. Mech, 1975.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. Mathematical Models of Turbulence. Londres: Academic Press, 1972.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Londres: Academic Press, 1974.

LI, J.; BROOKS, G. A.; PROVATAS, N. Phase-Field Modeling of Steel Scrap Melting in a Liquid Steel Bath, 2004.

LTDA., M. –. M. Eof – energy optimizing furnace.

MAIA, B. T.; SANTOS, B. O. D. A.; GARAJAU, F. S. Modelagem numérica do escoamento no interior do sistema de despoejamento primário do convertedor da arcelor mittal João Monlevade, 3º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

MALALASEKERA, W.; VERSTEEG, H. K. An Introduction to Computational, 2007.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.

MANDAL, K. Modeling of scrap heating by burners, 2010.

MARQUES, A. C. Desenvolvimento de modelo numérico utilizando o método dos volumes finitos em malhas não estruturadas, 2005.

MIRANDA, A. M. Monitoramento dos elementos residuais menos comuns no fornecimento de sucata para aciaria FEA, 2019.

NEVES, L. Modelamento matemático do escoamento multifásico no desgaseificador rh no distribuidor de lingotamento contínuo. Tese de Doutorado, 2012.

PEDRAS, M. H. J.; LEMOS, M. J. S. Análise dos Modelos de Escoamento em Meios Porosos Via Média Espacial das Equações de Navier-Stokes, Rio de Janeiro, 1998.

PEREIRA, R. O. S. Modelamento Matemático do Escoamento Turbulento da Transferência de Calor e da Solidificação no Distribuidor e na Máquina de Lingotamento Contínuo. Tese de Doutorado, CPGEM-UFMG, 2004.

PETRUCCELL, A. C. et al. EOF cold model – study of mixing time, n. 45º Seminário de Aciaria Internacional, 2014.

PFEIFER, H. C. . S. S. W. G. EOF - energy optimizing furnace minitec, Divinópolis, Brasil, 2009.

PIRES, F. C. Simulação do escoamento na coifa de despoeiramento primário do convertedor da aciaria da ARCELORMITTAL tubarão utilizando CFD (computational fluid dynamics), 2009.

REIS, L. C. Análise do escoamento turbulento por um queimador industrial a gás utilizando dinâmica dos fluidos, 2013.

ROSSI, D. Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco, 2014.

SALLES JR., S. Estudo de viabilidade técnica e econômica do refino primário para uma mini-aciaria de 150.000 toneladas, n. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, 2016.

SARTIM, R. Simulação computacional dos gases de exaustão dos sistemas de despoejamento primário dos convertedores BOF da ArcelorMittal Tubarão, Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 9, n. 2, p. 148-154, abr.-jun. 2012.

SCHUBERT, C. et al. Development of a Fast Modeling Approach for the Prediction of Scrap Preheating in Continuously Charged Metallurgical Recycling Processes, n. 11, 2021.

SILVA, J. N. A. Estudo teórico e experimental do efeito do ciclo térmico no painel refrigerado de forno elétrico a arco, 2014.

SOUZA, J. F. A. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem, 2011.

WHITE, F. M. Viscous Fluid Flow. New York: McGraw-Hill, 1991.

ZERWAS, A. A. Modelagem e simulação do escoamento em um sistema de lavagem de gases por técnicas de fluidodinâmica computacional, 2017.