

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO AUGUSTO BATISTA RIBEIRO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE VAZAMENTO DE
AÇO LÍQUIDO DA PANELA DE DE AÇO PARA DISTRIBUIDORES NO PROCESSO
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.**

Belo Horizonte

2014

BRUNO AUGUSTO BATISTA RIBEIRO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE VAZAMENTO DE
AÇO LÍQUIDO DA PANELA DE DE AÇO PARA DISTRIBUIDORES NO PROCESSO
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais,
como requisito à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Soares Oliveira

Belo Horizonte

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO AUGUSTO BATISTA RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 24/11/2014

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira

Orientador

Prof. Dr. Roberto Parreiras Tavares
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Rudolf Huebner
Universidade Federal de Minas Gerais

“It’s about how hard you can get hit and keep moving forward.”

Rocky Balboa (2006)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por criar os fenômenos naturais e, por permitir, que façamos deles nosso meio de vida.

Aos meus Pais pelo exemplo, carinho e apoio.

À Magnesita pelo incentivo durante essa jornada.

Aos meus amigos que não me deixaram desistir.

RESUMO

Ribeiro, B. A. B. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise do Processo de Vazamento de Aço Líquido da Panela de Aço para o Distribuidor no Processo de Lingotamento Contínuo**. Belo Horizonte, 2014. 63p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

A indústria siderúrgica está sempre em busca de aprimorar a qualidade de seus produtos e de reduzir o custo de seus processos. Para isso é essencial que sejam adotadas as melhores práticas operacionais. A utilização racional de matérias primas, energia e insumos levam a um processo de produção eficiente do aço. Para tanto, a redução do desperdício durante o processo produtivo é fundamental. Durante o processo de fabricação do aço uma camada de escória, que nada mais é que uma solução de alguns óxidos como óxido de cálcio, óxido de alumínio, óxido de magnésio entre outros, é utilizada para proteger o aço líquido do ar atmosférico e para isolar termicamente o processo. Esses óxidos quando chegam ao produto final se aglomeram em inclusões que vão levar a defeitos no produto final. Então, um bom controle do processo produtivo inclui a redução da passagem de escória para o produto final. Para o processo de fabricação do aço ser eficiente, o processo deve atingir níveis altos de rendimento, ou seja, a maior quantidade possível de aço líquido deve ser solidificada nos moldes na forma do produto final do processo. Durante o processo do lingotamento contínuo, no qual o aço líquido tratado é transportado da panela de aço para o distribuidor para, em seguida, ser transportado ao molde de solidificação, a relação entre o rendimento do processo e a retenção de escória na panela de aço é analisada. Para evitar a passagem de escória da panela de aço para o distribuidor, é comum no meio siderúrgico, que uma grande quantidade de aço líquido seja deixada na panela de aço. Esse trabalho se propõe a estudar o vazamento do aço líquido da panela de aço para o distribuidor a fim de propor uma metodologia de análise desse processo pela técnica da fluidodinâmica computacional que permita o entendimento e otimização desse processo, tanto por parte dos siderurgistas, por meio da adoção de melhores práticas operacionais, quanto dos fornecedores de refratários na pesquisa e desenvolvimento de novas configurações refratárias para a panela de aço. O modelo desenvolvido foi capaz de reproduzir os resultados obtidos em laboratório com precisão, como, por exemplo, a formação do sumidouro sobre a válvula de saída quando a interface água/querosene chegou a 3 cm do fundo da panela.

ABSTRACT

The steelmaking industry is constantly searching for better production practices that will lead to improved qualities of the final product and an enhanced yield, so better operational practices are constantly been implemented. The rational use of raw materials, energy and the avoidance of waste in the industrial process lead to an effective production process. Minimization of product leftover is quite a relevant point. In the continuous casting process, large amounts of molten steel are left in the ladle during teeming as an established practice to avoid slag carry over to the Tundish, in the end of the teeming process. In the ladle a thin layer slag that is made of calcium, aluminum and magnesium oxides is used to protect the molten steel from the atmospheric air and to provide thermal insulation for the molten bath. If these oxides reach the final product they will cluster in inclusions that will cause a series of defects on the finished product. So an effective teeming process is that one that reduces the amount of slag carry over to the tundish. In order to have an cost effective process steelmakers need to transfer the largest amount of molten steel to the tundish without allowing slag carryover. Thus, the objective of this work was to experimentally and numerically analyze the flow behavior of molten steel during the ladle teeming process and the formation of any vortex like structure during the process. The numerical model obtained from this work was able to reproduce the tests that were carried out in the laboratory. The experiments showed that for an isothermal situation a drain sink would form above the nozzle when the water/kerosene was at 3 cm above the ladle bottom. This behavior was reproduced by the numerical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de duas rotas de processo para a produção do aço.....	8
Figura 2 - Desenho esquemático de um alto forno padrão	10
Figura 3 – Sinterizador	11
Figura 4 - Processo de pelotização	11
Figura 5 – Bateria de fornos em uma coqueria dentro de uma Usina Integrada	12
Figura 6 – Canal de Gusa em operação.	14
Figura 7 – Desenho esquemático do carregamento de um carro torpedo.....	14
Figura 8 – Dessulfuração do Gusa dentro do carro torpedo.....	15
Figura 9 – Desenho esquemático de um conversor LD.....	16
Figura 10 – Desenho esquemático de um FEA	16
Figura 11 – Carregamento de um conversor LD em uma aciaria.....	18
Figura 12 – Etapas do processo LD.....	18
Figura 13 - Desenho esquemático do carregamento de sucata em um FEA.	20
Figura 14 – Etapas do processo dentro de um FEA.	20
Figura 15 – Painel de aço. Detalhes da carcaça e do revestimento refratário.....	22
Figura 16 - Operação de um Forno Painel.....	23
Figura 17 - Desenho esquemático do processo de desgaseificação RH.....	25
Figura 18 – Detalhes dos refratários responsáveis pelo controle do fluxo de aço líquido da painel de aço para o distribuidor.	26
Figura 19 – Detalhes do mecanismo de válvula gaveta responsável pelo controle do fluxo de aço na painel de aço.	26
Figura 20 – Representação do vazamento do aço líquido da painel de aço para o distribuidor durante o lingotamento contínuo.	27
Figura 21– Desenho esquemático do processo de lingotamento contínuo.....	29
Figura 22– Exemplo de uma geometria em 3 dimensões.....	31
Figura 23 – Exemplo de uma malha hexaédrica.	32
Figura 24 – Exemplo de uma malha tetraédrica.....	32
Figura 25 – Tela do programa CFX® utilizado para resolver as equações de continuidade e do movimento.	33
Figura 26 – Distribuição das fases ar, escória e aço líquido dentro da painel de aço durante o processo de vazamento do aço líquido no lingotamento contínuo.	34
Figura 27 - Dimensões dos modelos experimental e numérico(em mm) da painel de aço.	38

Figura 28 - Modelo em três dimensões utilizado na simulação da primeira etapa.....	40
Figura 29 - Malha hexaédrica utilizada na validação dos experimentos realizados em laboratório.....	40
Figura 30 - Malha computacional para a segunda etapa.	41
Figura 31 - Instante inicial de arraste de querosene para dentro da válvula de saída.....	45
Figura 32 - Arraste de uma grande porção de querosene para a válvula de saída.	45
Figura 33 - Momento da formação do sorvedouro.....	46
Figura 34 - Interface água/querosene a 5cm do fundo da panela.	47
Figura 35 - Interface água/querosene defletida pelo escoamento a 4,5 cm de altura em relação à válvula de saída.....	47
Figura 36 - Instante em que ocorre a formação do sorvedouro. Interface água/querosene a 3 cm de altura em relação à válvula de saída.....	48
Figura 37 - Disposição dos pontos de referência no modelo numérico.	49
Figura 38 - Evolução das velocidades verticais nos pontos de referência.....	50
Figura 39 - Corte transversal à válvula.....	50
Figura 40 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela.....	51
Figura 41 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela. Vista superior.....	52
Figura 42 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela. Detalhe da vista superior.	52
Figura 43 - Gradiente térmico na panela de aço após um tempo de repouso de 15 min.....	53
Figura 44 - Correntes convectivas decorrentes do processo de resfriamento do aço dentro da Panela.....	54
Figura 45 - (a) Plano pelo centro da válvula de saída. Altura do banho metálico em 0,35 m. (b) Detalhe do escoamento no plano pelo centro da válvula de saída.....	55
Figura 46 - Movimento rotacional do banho metálico em diferentes alturas e nível do banho metálico em 1,5 m. (a) posição do furo de vazamento (b) altura do fundo da panela: 0,8 m; (c) altura do fundo da panela: 0,4 m; (d) altura do fundo da panela: 0,2	56
Figura 47 - Início da formação do vórtice. Altura da interface metal/escória em 0,35 m do fundo da panela.....	57
Figura 48 - Plano a 0,25m de altura e banho a 0,35m.....	57
Figura 49 - Plano a 0,22m de altura /banho a 0,35m.....	58

Figura 50 - Plano a 0,2m de altura /banho a 0,35m.....	58
Figura 51 - Plano a 0,18m de altura /banho a 0,35m.....	59
Figura 52 - Plano a 0,16m de altura /banho a 0,35m.....	59
Figura 53 - Formação do vórtice. Interface metal/escória em 0,2 m do fundo da panela.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades dos fluidos utilizados na primeira etapa. Dados encontrados em Davila et al. [2].....	41
Tabela 2- Propriedades dos fluidos utilizados na segunda etapa. Dados encontrados em Davila et al. [2].....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

m – metros, unidade de medida do Sistema Internacional

mm – milímetros, unidade de medida do Sistema Internacional

t – tonelada, unidade de medida do Sistema Internacional

m³ – metro cúbico, unidade de medida do Sistema Internacional

N – Newton, unidade de medida do Sistema Internacional

kg – quilograma, unidade de medida do Sistema Internacional

ppm – partes por milhão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....	5
	3.2 Redução.....	9
	3.3 Refino Primário.....	15
	3.4 Aciarias Integradas – Processo Via Conversor Ld.....	17
	3.5 Aciarias Elétricas – Processo via Forno Elétrico.....	19
	3.6 Refino Secundário.....	21
	3.7 Lingotamento Contínuo.....	28
	3.8 Modelagem Numérica Do Processo Industrial.....	29
	3.9 Construção da Geometria.....	30
	3.10 Malha.....	31
	3.11 Condições De Contorno.....	33
	3.12 Solução das Equações.....	33
	3.13 Resultados.....	33
	3.14 - Modelagem do Esvaziamento da Panela de Aço.....	35
4	METODOLOGIA.....	37
	4.1 O Modelo Físico.....	38
	4.2 O Modelo Numérico.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
	5.1 Resultados do Modelo Físico.....	44
	5.2 - Resultados do Modelo Numérico da Primeira Etapa.....	46
	5.3 Resultados do Modelo Numérico da Segunda Etapa.....	53
6	CONCLUSÕES.....	61
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Na indústria siderúrgica, um alto rendimento assegura um processo com eficiência e baixo custo. Para atingir o alto rendimento, os siderurgistas devem ter um controle preciso do processo de fabricação do aço para garantir a qualidade de seus produtos. Uma fase crítica desse processo é o lingotamento contínuo, processo no qual o aço líquido é transportado da panela de aço para os moldes de solidificação passando pelo distribuidor. Durante esse processo, não há tratamento algum do aço líquido. Todos os processos que dão ao aço produzido suas características químicas e físicas já ocorrem em etapas anteriores, e, portanto, o transporte desse aço até o molde no qual ocorrerá a solidificação deverá acontecer da forma mais controlada possível. A camada de escória que protege o aço líquido do ar atmosférico na panela não deve ser transferida para o distribuidor, pois, como a escória é formada por uma solução de óxidos de magnésio, cálcio e alumínio dentre outros, sua presença no produto final é indesejada. Estes óxidos se acumulam no aço na forma de inclusões exógenas (inclusões compostas de materiais que não fazem parte da composição do aço) e causam defeitos no produto final. A presença de escória no distribuidor de aço, além de causar inclusões exógenas no produto final, contribui para acelerar o ataque químico ao revestimento refratário do distribuidor.

Ao final do vazamento da panela, a passagem de escória para o distribuidor deve ser evitada. Há dois mecanismos conhecidos que levam à transferência da escória da panela de aço para o distribuidor: a formação do sumidouro; e a formação de um vórtice.

Segundo Kojola [1], o sumidouro é uma estrutura em formato de funil que se forma logo acima da válvula de saída da panela de aço, pois, nesse estágio do processo, o fluxo de massa horizontal não consegue suprir a quantidade de aço suportada pela válvula. Isso leva a um aumento na velocidade vertical no fluxo e a superfície do banho líquido colapsa dentro da válvula.

A estrutura do vórtice se forma quando velocidades tangenciais residuais e o aumento das velocidades verticais do escoamento se combinam na região acima da válvula. Em um mecanismo similar ao anterior, a superfície do banho líquido é sugada para dentro da válvula e as velocidades tangenciais são responsáveis por fazer os fluidos girarem formando assim o vórtice, conforme descrevem Davila et al. [2].

Para evitar a passagem de escória para o distribuidor, uma prática comum na indústria siderúrgica, é fechar a válvula da panela de aço quando ainda há uma quantidade considerável de aço na panela. As alturas mais comuns da coluna de aço líquido deixadas nas panelas variam entre 3 a 4 vezes o diâmetro da válvula de saída. Para exemplificar o volume de aço líquido que é deixado em uma panela de aço nessa situação, pode-se fazer a seguinte estimativa: uma panela de aço com diâmetro de 2,77 m, com uma válvula de saída de 57 mm de diâmetro, pode ter seu vazamento interrompido com uma altura de aço que varia entre 171 e 228 mm, o que representa de 7,2 a 9,6 toneladas de aço líquido de alta qualidade que são encaminhados para reciclagem, diminuindo assim o rendimento do processo.

A necessidade do desenvolvimento e implantação de práticas operacionais que maximizem os resultados de produção no processo siderúrgico levou ao grande incentivo à pesquisa dos mesmos. Uma importante ferramenta utilizada no aprimoramento e entendimento do processo siderúrgico é a criação de modelos simplificados desses processos. Esses modelos foram desenvolvidos, primeiro em escala e utilizando a água como fluido de estudo, e, mais recentemente, com o advento dos computadores de alto desempenho, eles foram desenvolvidos utilizando modelos matemáticos. Ambos os modelos fornecem informações relevantes sobre o processo analisado em questão.

Modelos em escala, usando água como fluido de estudo, são utilizados para simular processos siderúrgicos há mais de 30 anos. Os modelos em água constituem uma forma de baixo custo e confiável de se obter informações sobre os processos siderúrgicos. No entanto, pequenas alterações na geometria do problema podem tornar esse processo lento e de custos mais elevados. A validade da análise de processos siderúrgicos em modelos de água, de acordo com Chaudhary et al. [3] é mantida se forem observadas diferenças entre as propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade, tensão superficial), diferenças no processo e diferenças na escala dos equipamentos. A questão de fluidos diferentes neste caso é resolvida utilizando as similaridades de Reynolds e de Froude, considerando que a viscosidade cinemática de ambos os fluidos é similar.

Com o advento de computadores de alto desempenho e com o seu aumento da capacidade de processamento dobrando a cada 18 meses de acordo com a Lei de Moore [4], foi possível a criação de softwares comerciais baseados nas equações de Navier-Stokes, dentre outros modelos, que se prestam a simular sistemas fluidos. A simulação numérica de um processo industrial pela técnica da fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês "Computational Fluid Dynamics") permite a avaliação de vários casos com pequenas alterações geométricas ou em diferentes condições de processo com mais rapidez e com uma

menor variação nos experimentos. É necessário, porém, que os modelos numéricos sejam verificados para garantir que, quando uma nova condição geométrica ou de processo for testada, seus resultados sejam válidos. Essa validação se dá quando se reproduz numericamente um experimento e compara-se os resultados. Quando o modelo numérico estiver reproduzindo com precisão o resultado experimental, pode-se considerar o modelo numérico validado, e, a partir daí, utilizá-lo para simular outras condições de processo.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para análise numérica do processo de vazamento de uma panela de aço que permita uma melhor compreensão do processo e, conseqüentemente, a proposição de procedimentos para o estabelecimento de práticas operacionais com melhores desempenhos. Essa metodologia incluirá a modelagem e simulação do processo industrial pela técnica da fluidodinâmica computacional e permitirá que engenheiros estabeleçam melhores práticas operacionais para seus processos e auxiliará na pesquisa e desenvolvimento de novas configurações refratárias para a panela de aço que permitam retardar o processo de drenagem de escória para o distribuidor.

O desenvolvimento dessa metodologia inclui a realização de experimentos em modelos em escala que utilizam água e óleo como fluidos para calibrar a simulação numérica. A verificação do modelo numérico inclui a reprodução em modelo numérico dos resultados dos experimentos por meio da fluidodinâmica computacional. Uma vez que os resultados experimentais estiverem sendo reproduzidos corretamente, o mesmo modelo numérico poderá ser utilizado para avaliar outros processos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1 Processo De Fabricação Do Aço

A fabricação do aço é um dos processos que se inclui na área da Siderurgia, que é o ramo de atividade humana dedicada à obtenção de ferro e suas ligas a partir de fontes primárias (minérios) ou secundárias (sucatas de ferro). Segundo Ohashi [5], a fabricação do aço é um processo industrial desenvolvido no século 19 que entra no século 21, como exemplo de modernidade em práticas industriais devido à 40 anos de inovação.

O fato de o ferro ser um dos elementos mais abundantes em nosso planeta, e suas aplicações serem as mais diversas possíveis, o torna um objeto de grande interesse e estudo. Na natureza, por causa de sua extrema reatividade, o ferro é encontrado preferencialmente na forma de óxidos como a hematita (Fe_2O_3), e a magnetita (Fe_3O_4).

Para obter-se o ferro a partir de fontes primárias, é necessário separar quimicamente o ferro do oxigênio. Essa etapa ocorre dentro de um reator (alto-forno) e é denominada redução. Segundo a Steel University [6], a rota de obtenção do ferro gusa em alto forno é a rota dominante em toda a siderurgia. Durante a etapa de redução, outros óxidos de silício e alumínio que também se encontram no minério são separados. O produto da etapa de redução é ferro líquido rico em carbono (teor $> 4\%$), denominado ferro gusa. Para a produção do aço, o teor de carbono do produto final deve ser inferior a 2% .

O ferro gusa sai da casa de redução e é transportado em carros torpedo até a Aciaria. Na Aciaria, o gusa é transformado em aço, recebe as ligas que conferirão as respectivas características químicas e é solidificado em moldes, que gerarão um produto semi-acabado. De acordo com Zhang et al. [7], para a produção de um aço limpo e de qualidade, os teores de enxofre, fósforo, hidrogênio, nitrogênio e carbono devem ser controlados.

Na Aciaria o ferro gusa passará primeiro pelo processo de dessulfuração, para a retirada do enxofre proveniente do minério e do coque. Logo após, o gusa é encaminhado ao Conversor LD, aonde será transformado em aço. O gusa é transferido para o conversor no qual é injetado oxigênio com velocidades de gás chegando a valores supersônicos. Essa oxidação controlada permite retirar do gusa componentes como carbono, silício, manganês e essa queima fornece energia suficiente para elevar a temperatura do metal líquido a valores próximos a 1600°C , possibilitando também a utilização de sucatas como fonte de metal. Após o processo LD, o metal fica com teores de carbono abaixo de 2% , o que o caracteriza como

aço de acordo com o AISI [8] e [9]. Essa parte do processo, na qual ocorre a transformação do ferro gusa em aço, é denominada de Refino Primário.

O processo de obtenção do aço a partir de sucatas não conta com a etapa de redução, a obtenção do metal líquido se dá pelo fornecimento de altas quantidades de energia à sucata, fundindo-a. Nessa etapa, segundo Jones[10], há vários tipos de sucata: reciclada que é obtida de carros sucateados, prédios demolidos, maquinário descartado e objetos domésticos; sucata industrial que é gerada por indústrias que utilizam aço em seus processos produtivos; sucata revertida que é gerada no próprio processo de produção do aço (rebarbas de cortes, perdas metálicas ao longo do processo, como cascão em um distribuidor) são cautelosamente empilhados em um forno elétrico juntamente com fundentes, no qual geralmente há um residual de aço líquido que tem a função de melhorar a condutividade elétrica e aumentar a temperatura da carga do forno. Durante o processo de fusão da carga, a potência utilizada varia de 25 a 75 MW em um período que pode durar até 50 minutos. Nesse processo, é comum a injeção de um gás inerte para promover a homogeneização do metal fundido, bem como auxiliar a fusão da carga com a distribuição mais homogênea da temperatura.

O Refino Secundário, segundo Christ [11], é a parte do processo em que o aço recebe suas características químicas, tem sua temperatura ajustada para o lingotamento contínuo, aumentando assim a produtividade do processo e reduzindo custos. Após o término do sopro de oxigênio no conversor LD, o aço é vazado em reator chamado Panela de Aço. Dentro desse reator, o aço líquido é transportado ao longo da usina para as diversas estações de tratamento. Dentre os tratamentos mais comuns, estão o ajuste do teor de carbono em um desgaseificador RH (podendo chegar a teores de ppm's de carbono após o processo), a adição direta e homogeneização de ligas metálicas no aço para a realização do ajuste químico do produto final e o ajuste da temperatura de operação no forno panela. Após o final do tratamento, o aço está pronto para ser solidificado, essa etapa se dá, na maioria dos casos, no lingotamento contínuo.

Segundo Thomas [12], o lingotamento contínuo é o processo mais eficiente para transformar grandes volumes de metal líquido em sólidos de forma simples para uma posterior transformação. Esse processo também permite transformar o processo de fabricação de aço de um processo em batelada para um processo contínuo. Nessa etapa, o aço é vazado em um equipamento denominado distribuidor. O distribuidor funciona como um reservatório de aço para o processo, sendo que ele também tem a função de distribuir o aço líquido nos moldes para solidificação. Uma vez que o aço foi transferido ao molde, o mesmo irá adquirir

o mesmo formato do molde. Uma vez solidificado, o aço passa por processos de conformação mecânica para adquirir sua forma final.

O processo de fabricação do aço evoluiu muito através dos séculos, tornando-se um processo rápido, flexível, de baixo custo e com alta produtividade o que tornou o aço um produto abundantemente utilizado no dia-a-dia. Na Figura 1, é mostrado um desenho esquemático das duas rotas de produção do aço.

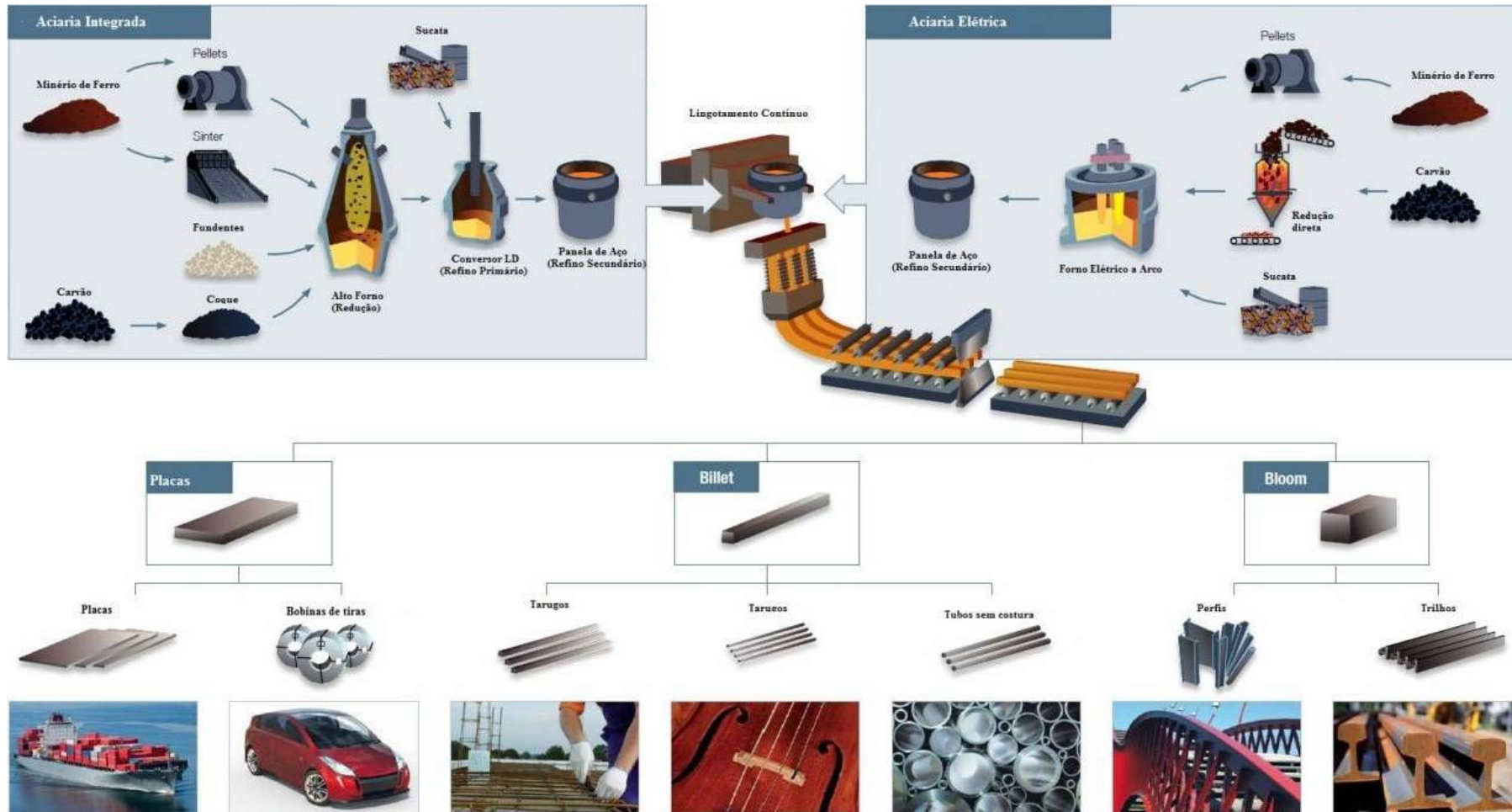


Figura 1 - Desenho esquemático de duas rotas de processo para a produção do aço.

3.2 Redução

O ferro é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, e devido à sua alta reatividade (principalmente em relação ao oxigênio), ele não é encontrado na sua forma pura, e sim na forma de óxidos, sulfetos, silicatos, etc [13]. Para conseguirmos extrair o ferro, precisamos reduzi-lo em um ambiente com baixo oxigênio livre, conforme as reações:



O alto forno é o equipamento mais utilizado para a realização do processo de redução do ferro e produção de ferro gusa. A alta produtividade e a capacidade de produzir o gusa a uma temperatura acima de 1530°C, o torna bastante competitivo com os outros processos de redução do minério de ferro. Devido aos avanços na tecnologia dos refratários utilizados nos altos fornos, a vida útil desses equipamentos é extremamente longa, sendo que a média da vida é de doze anos. A média da produtividade de um alto forno brasileiro está entre 1,80 e 2,70 t/dia/m³ (a medida de produtividade de um alto forno é a razão entre a produção média diária e o volume interno do equipamento). O baixo custo do combustível também contribui para a performance do forno. Nos fornos brasileiros, o combustível mais utilizado é o coque metalúrgico e o carvão pulverizado.

O processo de redução começa com a preparação da matéria prima. O alto forno é alimentado com a carga metálica (sinter, pelotas, minério granulado), com o combustível sólido (coque ou carvão vegetal) e também com fundentes. As cargas são cuidadosamente preparadas antes de serem alimentadas no forno. Na Figura 2, mostra-se o desenho esquemático de um alto forno padrão.

A carga metálica, proveniente do minério de ferro, é processada antes em um processo de aglomeração para formar o sinter ou a pelota.

Durante o processo de sinterização finos de minério de ferro, juntamente com finos de coque ou carvão vegetal, fluxantes (sais ou óxidos adicionados para reduzir a viscosidade da escória formada no processo) e fundentes são aglomerados [14]. Dentro do sinterizador, ocorre a ignição do combustível sólido, e ar é forçado a permear a carga, fornecendo assim oxigênio para a queima do combustível e regulando a temperatura da carga. Com a queima do coque ou carvão, ocorre uma fusão parcial da carga o que faz com que os finos de minério,

fundentes e fluxantes se aglomerem adquirindo um tamanho ideal para ser alimentado ao forno. Na Figura 3, ilustra-se um sinterizador.

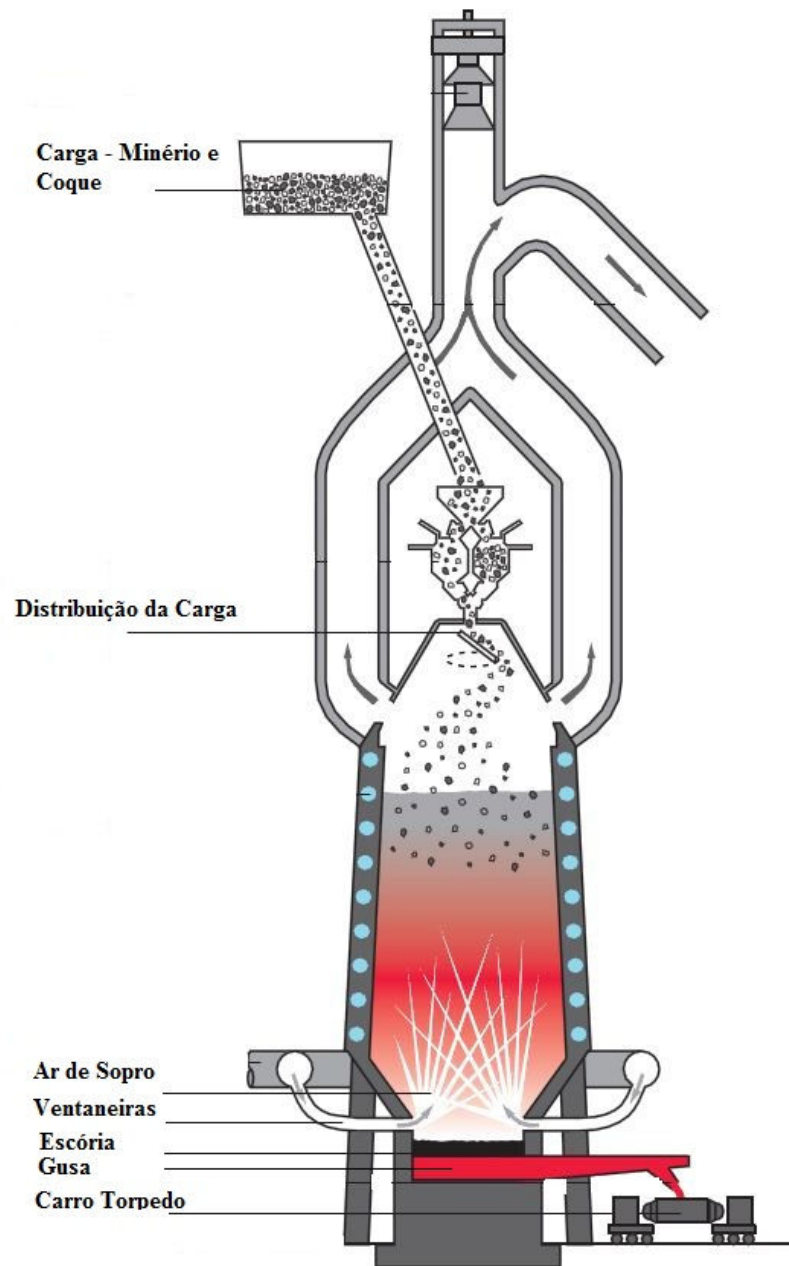


Figura 2 - Desenho esquemático de um alto forno padrão

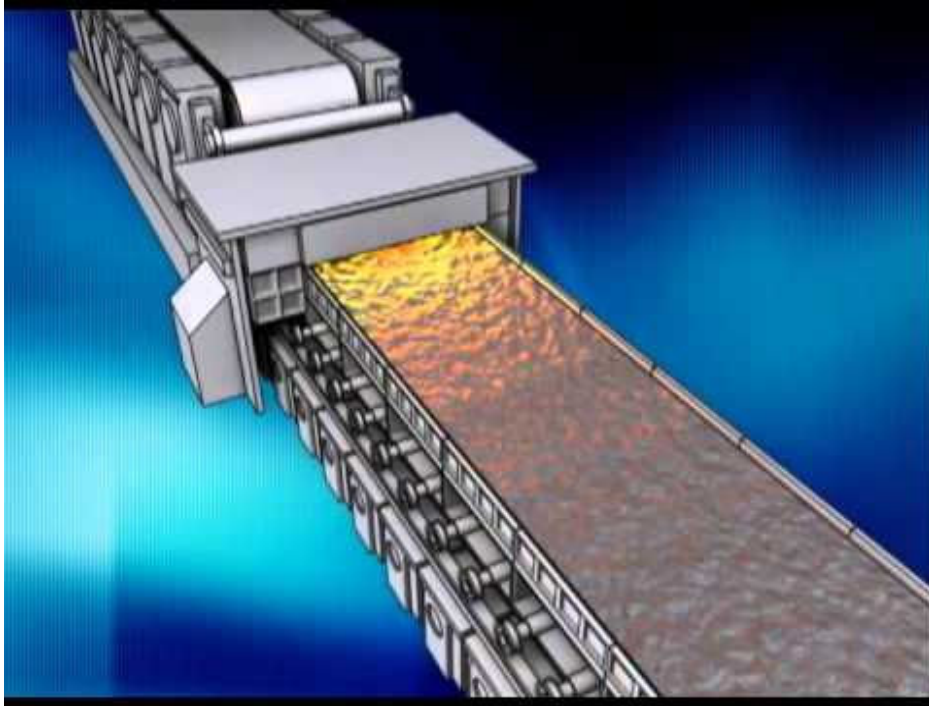


Figura 3 – Sinterizador

O processo de pelotização também é um processo de aglomeração, porém nesse caso os finos de minério são alimentados em discos ou tambores rotativos e a esse processo é adicionada água [15]. A força capilar é a responsável por unir os finos de minério. Por causa da capilaridade ser a força que liga os finos, materiais hidrofílicos são aglomerados mais facilmente que materiais hidrofóbicos. Por causa disso, cal é adicionada à pelota, tornando-a autofundente. Essas pelotas tem como ponto negativo baixa resistência mecânica, então uma etapa de sinterização é necessária para fazer com que as pelotas saiam de uma resistência mecânica de 100 N/pelota para 3000 N/pelota. Na Figura 4, mostra-se o processo de pelotização.



Figura 4 - Processo de pelotização

O carvão mineral passa por um processo de coqueificação, para adquirir resistência mecânica e suportar a carga dentro do forno sem perder a permeabilidade [16]. Nessa etapa, o carvão é carregado nos fornos da coqueria, passa por um tratamento térmico sem a presença de oxigênio. Dessa maneira, o carvão aglomera, ganha resistência mecânica e perde voláteis (hidrocarbonetos, enxofre). Após o tratamento térmico, o coque é retirado da coqueria e colocado em vagões para o transporte. Nesse momento, ele é resfriado com água para evitar que entre em combustão uma vez que foi exposto à atmosfera. Na Figura 5, mostra-se uma bateria de fornos em uma coqueria em uma Usina Integrada.



Figura 5 – Bateria de fornos em uma coqueria dentro de uma Usina Integrada

Os fundentes e fluxantes são partes importantes do processo. Eles têm como função ajudar na formação de escória, retirar impurezas, reduzir o ponto de fusão do minério, facilitar as reações de redução e garantir a operação do forno.

Com as matérias primas preparadas, o carregamento do alto forno é feito continuamente intercalando-se as camadas de minério e de coque [17]. O carregamento é feito pela goela do forno, que é a parte cilíndrica superior do alto forno. Os equipamentos de carregamento são configurados de forma a deixar o nível da carga do forno cerca de 1 metro abaixo da borda do equipamento. Logo abaixo temos a cuba, que é a parte com o maior volume no equipamento. Na cuba, começa o aquecimento da carga e o início das reações de redução do minério. Mais abaixo, temos o ventre que liga a cuba ao ventre e por causa da grande variação de temperatura nessa região ela é uma das mais solicitadas. A rampa é uma

região que tem o formato tronco-cônico com o diâmetro menor na parte inferior o que ajuda na sustentação da carga e no gotejamento do gusa para o cadinho. Finalmente, o cadinho é a região que compõe a parte inferior do forno e cuja função é acumular o gusa e a escória até que eles possam ser extraídos do equipamento.

Internamente, à medida que o processo de redução ocorre, têm-se algumas zonas bem definidas nas quais as transformações ocorrem em estágios. A primeira região é a zona granular. Nesta, as matérias-primas ainda mantêm a separação entre coque e minério de acordo com o carregamento realizado. Como só há gases e sólidos nessa zona, as reações de redução ocorrem apenas no estado sólido. Após a zona granular, temos a zona coesiva, na qual tem-se camadas de coque intercaladas com camadas coesivas, que são formadas por minério semi fundido. Em seguida tem-se a zona de gotejamento. Nessa região, o gusa e a escória começam a gotejar pelos interstícios do coque. A seguir, tem-se a zona de combustão, na qual as partículas sólidas de coque ou carvão vegetal são queimadas, produzindo gases redutores e energia. A última região é o cadinho, no qual o gusa e a escória se depositam, sendo separados pela diferença de densidade. Com o ferro na fase líquida, reações importantes como a dessulfuração do gusa ocorrem no cadinho.

O vazamento do gusa começa com a perfuração da parede do alto forno por uma broca. Quando esta atinge o banho líquido o gusa líquido sai de dentro do cadinho e é vertido no canal de corrida. Nesse momento, saem gusa e escória de alto forno. Na Figura 06 mostra-se o canal de gusa em operação. No canal de corrida, ocorre a separação de gusa e escória. A escória é separada e enviada para uma estação de tratamento, na qual vai ser preparada para ser vendida como insumo para a fabricação de cimento. O gusa é então vertido no carro torpedo para ser transportado para a Aciaria. Na Figura 7, ilustra-se um desenho esquemático do carregamento de um carro torpedo. Antes de ser enviado ao refino primário, o gusa passa por um tratamento químico que pode tanto ser feito dentro do carro torpedo como pode ser feito dentro da panela de gusa. Esse tratamento visa a retirada de enxofre do gusa. Na Figura 8, mostra-se o processo de dessulfuração ocorrendo no carro torpedo.



Figura 6 – Canal de Gusa em operação.

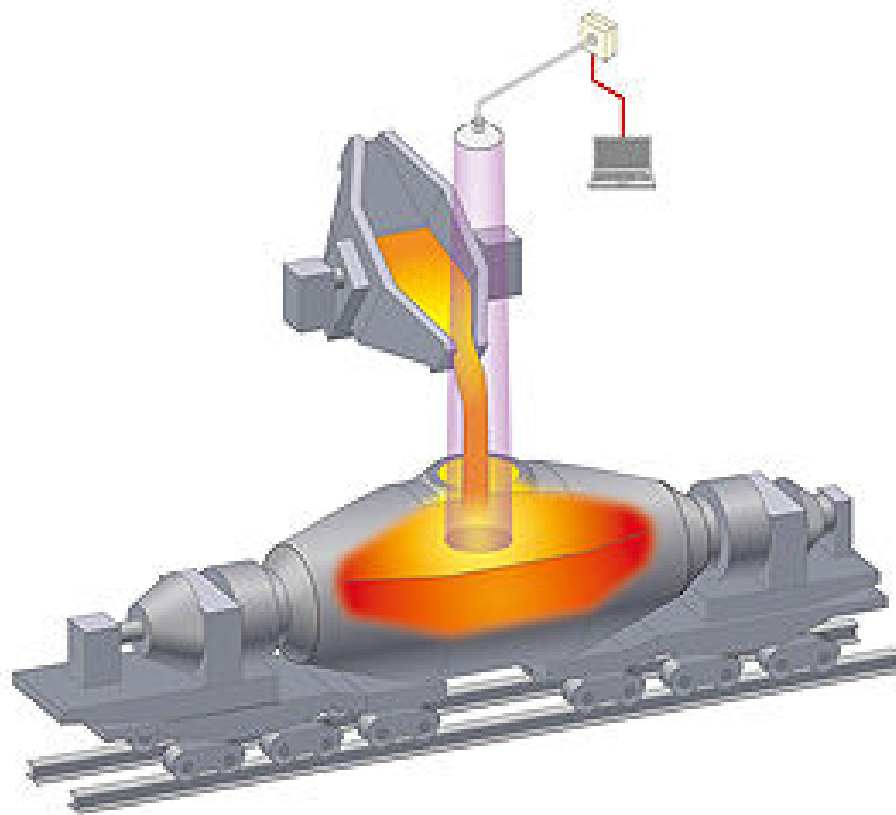


Figura 7 – Desenho esquemático do carregamento de um carro torpedo.



Figura 8 – Dessulfuração do Gusa dentro do carro torpedo.

3.3 Refino Primário

Em siderurgia, há dois modos de se obter o aço, usualmente chamados no meio siderúrgico de rotas de produção: primeira rota utiliza o minério de ferro como matéria-prima e a outra rota utiliza sucata de aço como matéria-prima. Ambas as rotas podem produzir o mesmo produto acabado, porém, na etapa do refino primário, as rotas são bastante diferentes. As usinas que utilizam o minério de ferro são chamadas de Aciarias Integradas e as que utilizam a sucata são chamadas de Aciarias Elétricas. Na Figura 9, mostra-se um desenho esquemático de um conversor LD que é utilizado em Aciarias Integradas. Já na Figura 10, mostra-se um desenho esquemático de um Forno Elétrico a Arco (FEA) que é o reator utilizado em Aciarias Elétricas.

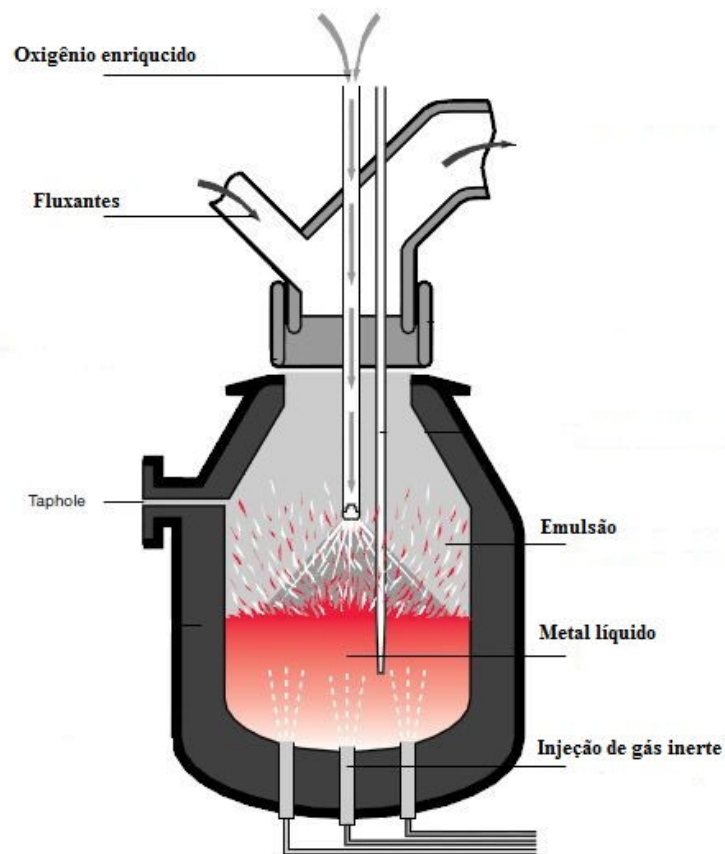


Figura 9 – Desenho esquemático de um conversor LD.

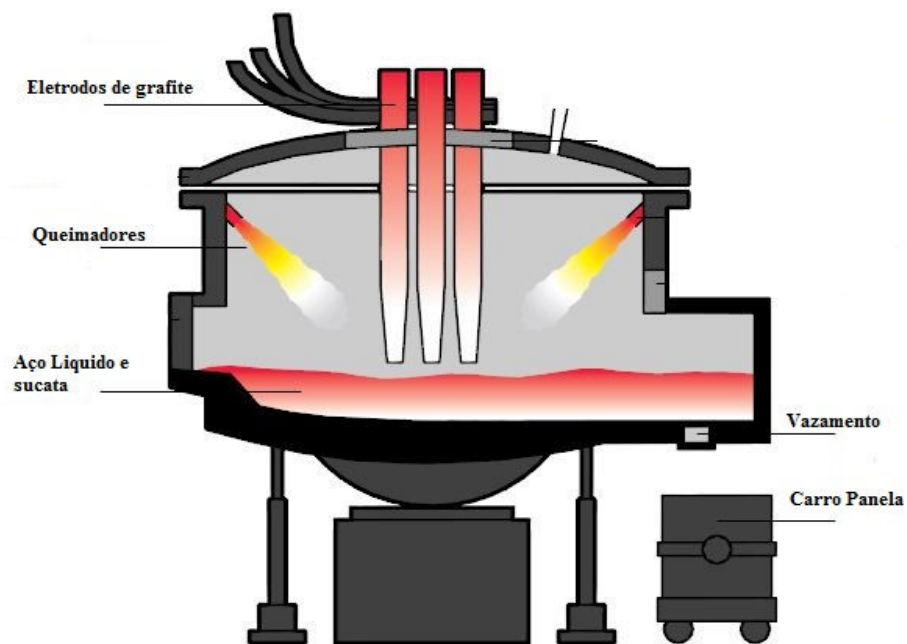


Figura 10 – Desenho esquemático de um FEA

3.4 Aciarias Integradas – Processo Via Conversor Ld

Segundo Miller et al. [18] e Stubbles [19], o processo de fabricação do aço via processo LD responde por 60% de todo aço bruto produzido no mundo. O propósito desse processo é reduzir o teor de carbono do metal líquido de aproximadamente 4% para um valor inferior a 1%, reduzir ou controlar os teores de enxofre e fósforo e, finalmente, aumentar a temperatura do banho metálico para aproximadamente 1635°C. Uma configuração típica de um conversor LD produz cerca de 220 toneladas por corrida que dura de 30 a 50 minutos em média.

O processo LD se diferencia do processo via um forno EAF por ser auto-suficiente em energia. As principais matérias-primas para esse processo são 70-80% em ferro gusa líquido, e sucata suficiente para balancear termicamente o processo. Uma vez que são conhecidas a temperatura e a composição química do ferro gusa vindo do alto forno, um modelo numérico estipula quais as quantidades exatas de sucata, ferro gusa, fluxantes serão adicionados. Esse modelo também determina os parâmetros para o sopro de oxigênio, como altura da lança em relação ao banho metálico e tempo de sopro.

O processo LD é essencialmente um processo em batelada. Nas usinas, cada uma dessas bateladas é denominada corrida. No início de cada corrida, o forno, que tem um formato cilíndrico e é aberto na parte superior (detalhes da geometria do Conversor LD podem ser vistos na Figura 9), é inclinado 45°. Uma cesta contendo todo o tipo de sucata (a sucata adicionada é especificada de forma a otimizar o balanço térmico do processo) é despejada dentro do forno. Imediatamente, o ferro gusa é vertido de uma panela de transferência, conforme visto na Figura 11. O conversor é então retornado à sua posição vertical e são adicionados cal/dolomita no processo. Uma lança metálica coberta com material refratário é então descida até alguns centímetros do banho metálico. O sopro supersônico de oxigênio de alta pureza (> 99,5 %) se inicia e é o responsável por oxidar o carbono e o silício contidos no ferro gusa, liberando grandes quantidades de calor que fundem a sucata adicionada. Dessa maneira, utilizando o calor das reações químicas do processo para fundir a carga de escória, o processo não deixa com que o aço líquido atinja temperaturas superiores a 1700°C, que reduziriam drasticamente a vida do revestimento refratário do forno. Entre 1590 e 1650°C, o aço líquido deve ser analisado, e para isso, o forno é novamente basculado até que amostras possam ser retiradas. Essa amostragem vai ditar o caminho final que o aço irá percorrer no refino secundário.

Uma vez que o aço está pronto para ser encaminhado para a próxima etapa de refino, uma panela de aço pré-aquecida é posicionada abaixo do forno. O vaso é inclinado permitindo

que o aço líquido saia pelo canal de saída (“taphole”). Ao final do vazamento, o canal é fechado para evitar a passagem de escória para a panela de aço. Parte da escória restante do processo é vazada em um "pote de escória". O restante é utilizado para revestir o refratário do conversor, protegendo assim o revestimento.

Na Figura 12, é mostrado um esquema com as etapas principais da operação do Conversor LD.



Figura 11 – Carregamento de um conversor LD em uma aciaria.

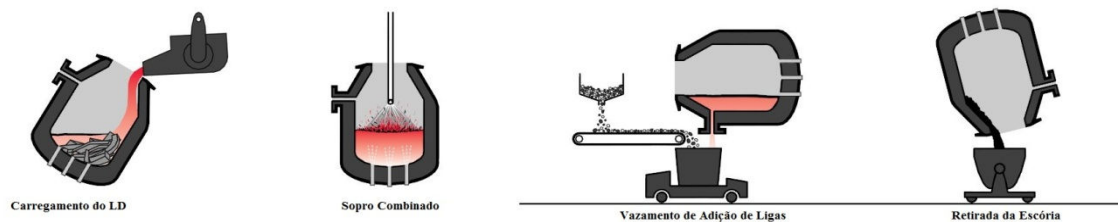


Figura 12 – Etapas do processo LD.

3.5 Aciarias Elétricas – Processo via Forno Elétrico

Nos últimos 35 anos, o uso da rota de produção de aço via um Forno Elétrico a Arco (EAF) cresceu consideravelmente. Os motivos para esse crescimento têm a ver com razões econômicas e avanços na tecnologia de produção do aço. Segundo Jones [20], o custo por tonelada anual instalada em uma aciaria elétrica varia de 14 a 20 % do custo de uma aciaria integrada do mesmo porte. Por isso, a utilização dos EAF, vêm se popularizando cada vez mais. Segundo Stubbles [19], só nos USA, a rota via EAF corresponde a 46 % do total de aço produzido e esse número vem crescendo.

A utilização dos Fornos Elétricos ou EAF (“Electric Arc Furnace”) possibilita que uma grande quantidade de sucata seja utilizada como matéria-prima, tornando assim o aço um produto sustentável, uma vez que ele pode ser reaproveitado indefinidamente. Com a necessidade cada vez mais crescente de utilizar a sucata como matéria-prima tanto para reduzir os custos de processo como para preservar os recursos minerais do planeta, esse processo é cada vez mais utilizado e para vários tipos de aplicações.

O aço é produzido no EAF em regime de bateladas. Cada batelada é conhecida como corrida. Segundo Jones [20], o primeiro passo de qualquer corrida é estabelecer qual a composição do aço a ser produzido. Com esta informação é possível definir a composição do cesto de sucata que será carregado no forno. O carregamento de sucata define não só a composição química do aço, mas também assegura uma boa condição para a fundição da carga. A sucata é carregada no cesto de acordo com tamanho e densidade, para promover uma rápida fusão e formação da poça líquida de aço, mas também oferece proteção do arco elétrico ao refratário. A carga pode incluir cal e carbono, ou esses elementos serão adicionados ao longo do processo. O teto do forno é aberto e a sucata é despejada dentro do forno. Na Figura 13, mostra-se o carregamento de sucata em um FEA. O forno é projetado para receber o mínimo de cestos possível por corrida, uma vez que o tempo de carregamento do forno (Power Off) é um tempo em que o forno não está produzindo. A otimização da carga também permite que as perdas térmicas no forno sejam reduzidas uma vez que cerca de 10 a 20 kWh/t são perdidos a cada abertura do forno.

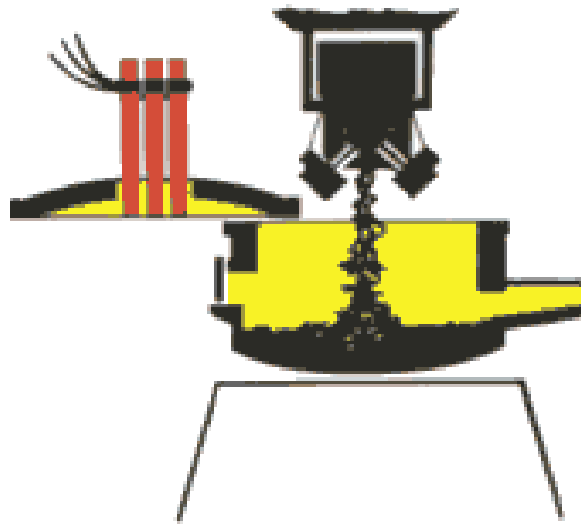


Figura 13 - Desenho esquemático do carregamento de sucata em um FEA.

A fusão da carga é a principal função do FEA. A fusão é atingida fornecendo energia à sucata por meio de eletrodos de grafite. Inicialmente uma tensão menor é aplicada à carga com o intuito de fundir a carga menos densa. Aproximadamente 15% da carga é fundida nessa fase inicial. Após alguns minutos, com a carga inicial fundida, os eletrodos podem afundar um pouco mais na carga e um arco maior e mais forte (maior tensão) inicia a fusão da carga mais densa. Energia química pode ser adicionada ao processo por meio de queimadores e lanças de oxigênio. Após a fusão da maior parte da primeira carga, uma segunda carga de sucata pode ser adicionada, repetindo o processo. Quando toda a carga programada de sucata foi fundida, amostras para análise são retiradas. Essas amostras definirão os próximos passos do refino, como ajuste de temperatura e ajuste químico.

Ao final do processo, o forno é tombado para que seja retirada a escória do mesmo. Após esse processo, o forno é retornado à sua posição original e, em seguida, tombado no sentido contrário para o vazamento do aço. Na Figura 14, é mostrado um esquema com as etapas do processo de funcionamento de um EAF.

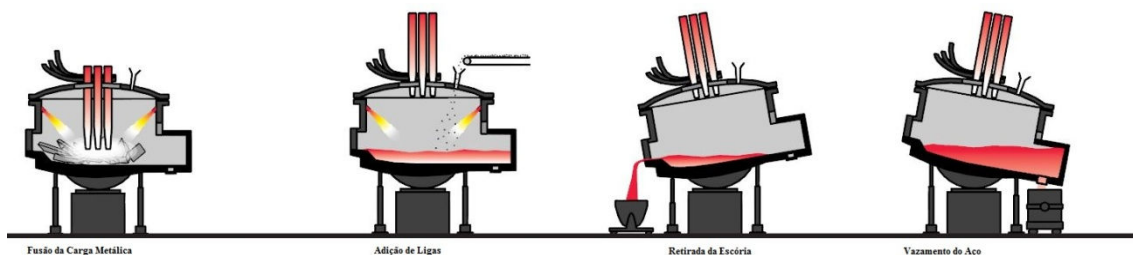


Figura 14 – Etapas do processo dentro de um FEA.

3.6 Refino Secundário

Há algumas décadas atrás, o processo de fabricação do aço se restringia virtualmente à unidade de refino primário. Nesse tempo, a panela de aço era utilizada apenas para transportar o aço até a unidade de lingotamento. Apenas algumas operações como adição de ligas, desoxidação e possivelmente dessulfuração eram realizadas [21]. O avanço tecnológico recente estipulou novos padrões de qualidade para o aço produzido e, com isso, fez-se necessário avanços no refino do aço.

Um fator importante e necessário para o permanente aumento na qualidade do aço são os ajustes químicos feitos durante o vazamento do aço do forno para a panela e o tratamento dado a ele durante o refino secundário.

O refino secundário inclui a homogeneização térmica e química do aço, modificação de sua composição química, modificação de sua temperatura e operações à vácuo. O aumento de demanda por uma variedade de aços com características específicas e com restritos padrões de qualidade contribuem cada vez mais para o desenvolvimento de novas tecnologias, otimização e automação do processo de produção do aço.

Como o lingotamento contínuo se estabeleceu como a principal rota de solidificação do aço, para a sua estável operação, um controle de temperatura adequado durante o refino secundário faz-se necessário.

Panela de Aço

O foco deste trabalho é no processo de vazamento do aço líquido da panela de aço para o distribuidor.

A Panela de Aço é o equipamento responsável pela metalurgia secundária, em que ocorre a correção química, de temperatura e de limpeza do aço líquido [21]. O revestimento refratário deve atender às demandas específicas de cada processo, de acordo com a qualidade de aço produzido, e aos processos metalúrgicos necessários.

A panela de aço moderna é utilizada de uma maneira muito mais complexa do que quando simplesmente transportava aço para as lingoteiras [22]. Apesar da principal função da panela de aço ainda ser fornecer aço ao lingotamento, o processamento do aço entre o forno/conversor e o lingotamento ocorre em uma complexa combinação de tratamentos do aço e escória. Esses processos incluem a retirada da escória do forno e a introdução de uma nova escória artificial, adição de ligas e respectiva homogeneização via agitação (via injeção

de gás ou por um agitador eletromagnético), reaquecimento do aço via arco elétrico e desgaseificação. Esses processos devem ser realizados sem um desgaste excessivo do refratário que protege a carcaça da panela.

O revestimento refratário da panela de aço é projetado para resistir quimicamente ao aço produzido. Na Figura 15 mostra-se um esquema do revestimento refratário utilizado em uma panela de aço típica, na qual são usados refratários de alto teor de alumina ou refratários dolomíticos. O revestimento refratário tem um papel importante na conservação do calor da corrida, durante o transporte entre estações e durante os vários processos sofridos pelo aço. Um grande esforço é feito para reutilizar as panelas de aço sem perdas significativas de calor, porém, há a necessidade de fazer reparos a cada corrida (remover a escória da panela, limpar o canal de saída do aço, inspecionar da válvula gaveta e colocar a areia de vedação).

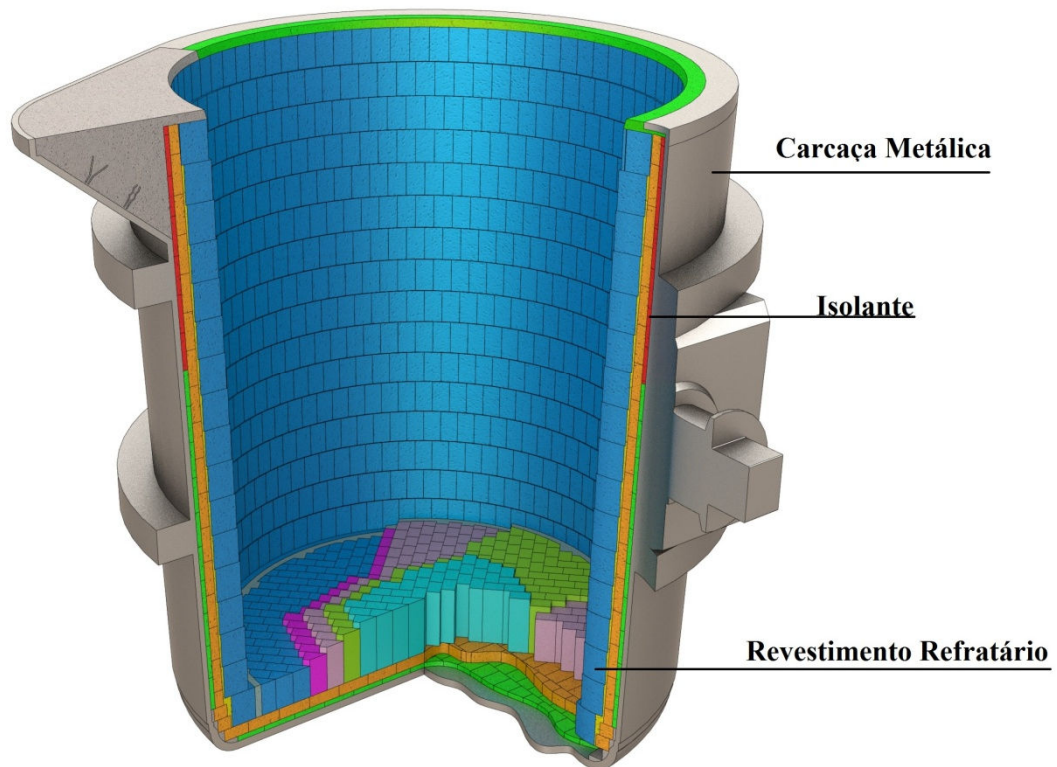


Figura 15 – Panela de aço. Detalhes da carcaça e do revestimento refratário.

Forno Panela

A função principal do Forno Panela é proporcionar condições para que seja realizada a maioria das operações realizadas que consistem o refino secundário [23]. Outras funções incluem:

- o reaquecimento do aço líquido;
- a homogeneização química e térmica da panela pela injeção de gases inertes pelo plugue no fundo da panela;
- formação de uma escória que proteja o refratário de danos causados pelo arco elétrico, concentre e isole o calor da panela do ambiente, aprisione inclusões e óxidos metálicos; e
- favoreça a dessulfuração.

Na Figura 16, ilustra-se um forno panela em operação.

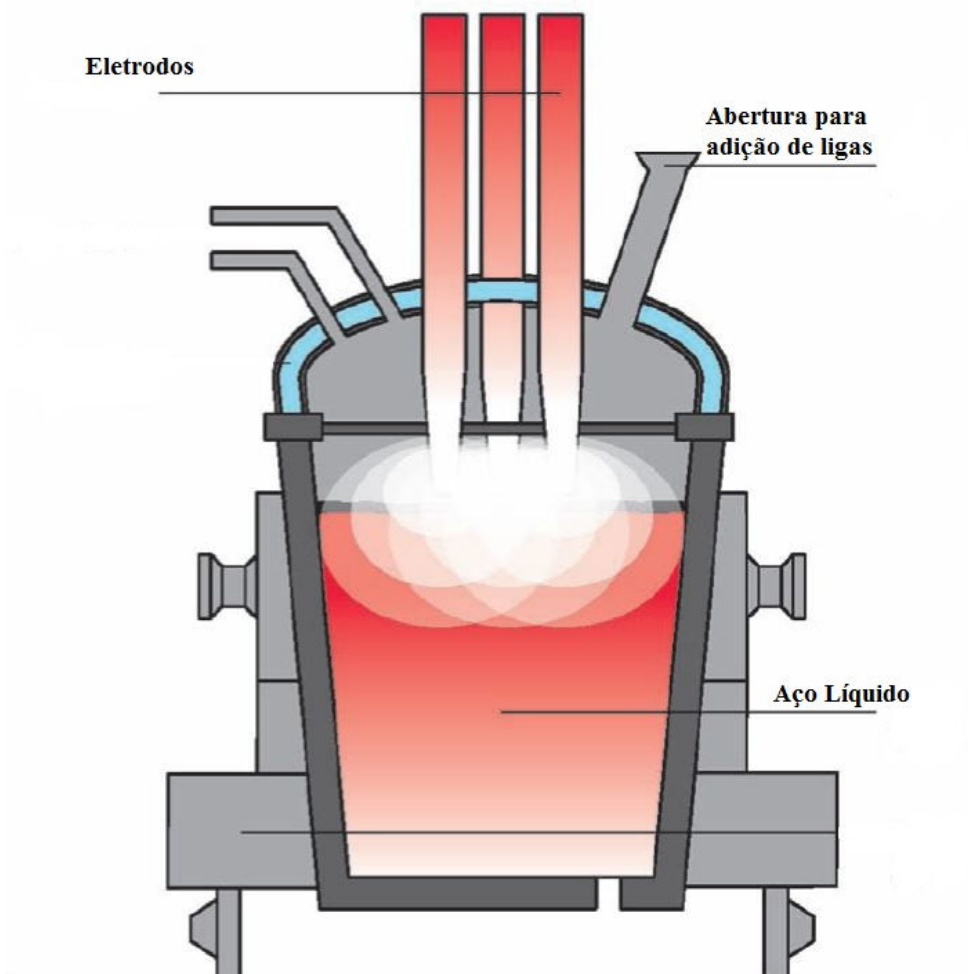


Figura 16 - Operação de um Forno Panela.

Desgaseificação à vácuo.

A desgaseificação à vácuo é usada desde que novos desenvolvimentos nessa área começaram a ser feitos em 1950 [24]. Novos equipamentos e novas práticas industriais foram implementadas desde então. Inicialmente, a desgaseificação à vácuo era utilizada apenas para a remoção de hidrogênio. No entanto, durante os últimos 30 anos esses processos foram cada vez mais utilizados na produção de aços com ultra baixo teor de carbono (30 ppm de carbono ou menos). Uma nova família de aços, chamada de "interstitial-free" ou IF demandou aços com um conteúdo menor que 30 ppm de carbono e nitrogênio. Para atingir esses níveis de concentração, o tratamento à vácuo é obrigatório. Existem dois tipos básicos de tratamento à vácuo, os que circulam o aço dentro do equipamento e os que não o circulam, [25].

Dentre os equipamentos que circulam o aço dentro do equipamento, podemos citar o desgaseificador RH. Na Figura 17, é mostrado um esquema da operação de um RH. No RH, um vaso refratário é encaixado no topo da panela de aço e suas pernas são submergidas no banho metálico. Estabelece-se vácuo na parte superior do vaso do RH promovendo assim uma elevação do nível do aço dentro das pernas do vaso. Nesse ponto, argônio é injetado em uma das pernas do equipamento (perna de subida). O aço passa então a circular dentro do equipamento. O vácuo promove a extração de gás CO e CO₂ presentes no banho reduzindo assim o teor de carbono do aço.

Entre os equipamentos que não circulam o aço, pode-se citar o VOD ("Vacuum Oxygen Decarburization"). Nesse equipamento, a panela de aço é tampada, vácuo é promovido no interior do vaso e argônio é injetado para promover a retirada de carbono e nitrogênio, bem como promover a homogeneização do banho.

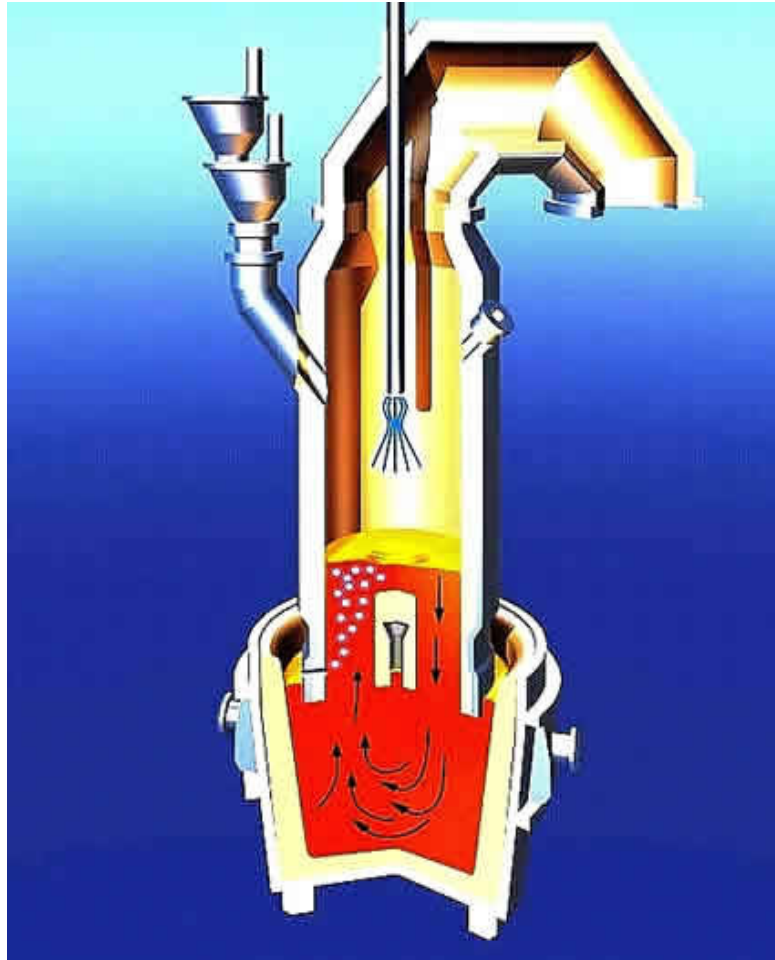


Figura 17 - Desenho esquemático do processo de desgaseificação RH.

Após o processo de refino, o aço líquido é transferido para o distribuidor através de um furo no fundo da panela. Esse furo é controlado por um mecanismo de placas deslizantes (válvula gaveta) que controlam a vazão com que o aço líquido passa para o distribuidor. Na Figura 18, é mostrado em detalhe a montagem refratária do canal de saída do aço líquido da panela de aço para o distribuidor. Nela, é possível ver como o alinhamento das peças refratárias cria um canal por onde o aço líquido irá passar. Na Figura 19, mostra-se em detalhe o mecanismo que controla o alinhamento das placas deslizantes. Esse mecanismo é o responsável por controlar a área livre de passagem do aço e, portanto, controlar a vazão de aço para o distribuidor. O momento em que o aço vaza da panela para o distribuidor com abertura total da válvula gaveta é ilustrado na Figura 20.

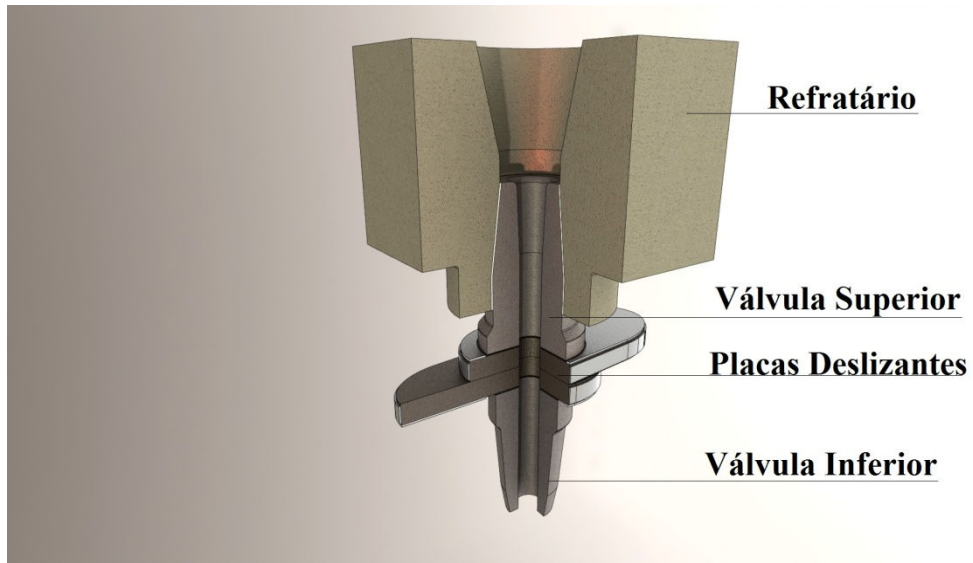


Figura 18 – Detalhes dos refratários responsáveis pelo controle do fluxo de aço líquido da panela de aço para o distribuidor.

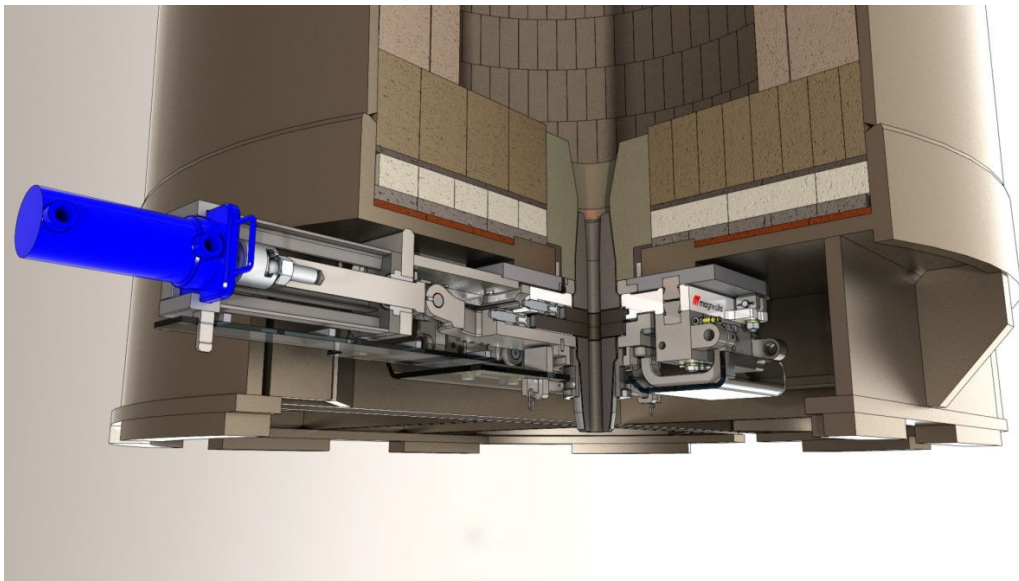


Figura 19 – Detalhes do mecanismo de válvula gaveta responsável pelo controle do fluxo de aço na panela de aço.

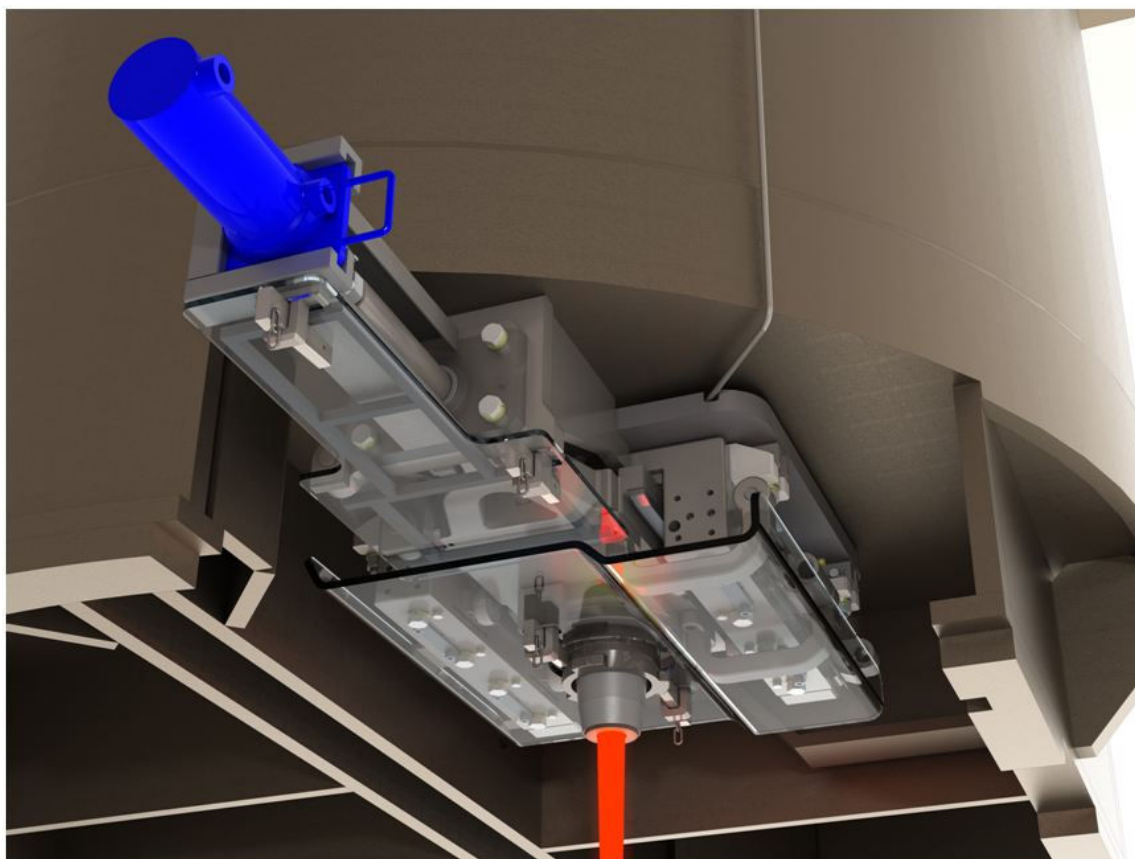


Figura 20 – Representação do vazamento do aço líquido da panela de aço para o distribuidor durante o lingotamento contínuo.

O foco deste trabalho está no processo de vazamento do aço líquido da panela de aço para o distribuidor. Durante o processo de vazamento, os siderurgistas controlam a taxa com que o aço líquido deixa a panela de acordo com as necessidades do processo. Esse processo de vazamento é interrompido em um certo estágio para evitar a passagem de escória para o distribuidor [26]. A escória de panela não tem função no lingotamento contínuo e seu eventual transporte para os moldes poderá acarretar em defeitos no produto final, segundo Thomas et al. [10]. Fontes na literatura descrevem dois tipos de estruturas que seriam responsáveis por promover a passagem de escória para o distribuidor. Mazzaferro et al. [26], Ni [27], Kojola et al. [1], discutem a formação de uma estrutura em formato de funil, denominada sorvedouro que colapsa em cima do canal de saída da panela, não havendo formação de vórtices nesses casos. Davila et al. [2] fazem uma análise tanto isotérmica quanto considerando a perda de calor na panela e mostram que essas diferentes análises produzem resultados distintos para o processo de esvaziamento da panela de aço e a conseqüente passagem de escória da panela de aço para o distribuidor. Esses fenômenos serão discutidos mais a fundo nas seções seguintes.

3.7 Lingotamento Contínuo

O Lingotamento Contínuo transforma metal líquido em sólido em um regime permanente e inclui uma variedade de importantes processos comerciais. Esses processos são as formas mais simples de se solidificar grandes volumes de metal em formatos simples para serem processados posteriormente. A maioria dos metais básicos são processados em massa por meio do lingotamento contínuo incluindo 500 milhões de toneladas de aço, 20 milhões de toneladas de alumínio, 1 milhão de toneladas de cobre, níquel e outros metais a cada ano, [12].

O Lingotamento Contínuo se difere dos outros processos de solidificação por causa do regime contínuo de operação. O metal líquido se solidifica dentro de um molde enquanto é puxado para fora do mesmo. É um processo que demanda um investimento mais alto, porém apresenta custos de operação reduzidos por proporcionar qualidade consistente em uma grande variedade de tamanhos e formatos. O Lingotamento Contínuo é capaz de produzir peças com a seção transversal retangular para subsequente laminação, seções quadradas ou circulares para a produção de produtos longos e ainda a produção de formatos especiais para serem transformados em perfis "I" ou "H". Dentre os vários tipos de máquinas para o lingotamento contínuo, destaca-se a máquina em curva que é utilizada para a produção da maioria do aço lingotado, que requer o dobramento e o desdobramento do produto ainda solidificando. Na Figura 21, mostra-se um esquema do processo do lingotamento contínuo.

O lingotamento contínuo é um processo relativamente novo em termos históricos. Apesar de ter sido concebido em 1858 por Bessemer, começou a se difundir a partir de 1960, quando problemas técnicos como o "rompimento de pele", um evento que ocorre quando a camada de aço em solidificação adere à superfície do molde e rompe a pele que está em formação, foram resolvidos. Pesquisa e inovação nessa área transformaram o lingotamento contínuo no responsável pela produção de mais de 90 % do aço produzido no mundo.

Durante o processo do lingotamento contínuo, o aço líquido proveniente da panela de aço chega ao molde de solidificação após passar pelo distribuidor de aço. O distribuidor retém aço líquido suficiente para prover constantemente aço aos moldes e garantir a continuidade do processo inclusive durante a troca das panelas de aço, que são fornecidas constantemente em intervalos regulares pela Aciaria. O distribuidor também funciona como último estágio de refino, pois, durante o tempo que o aço passa dentro do distribuidor, seu fluxo pode ser projetado para otimizar a remoção de inclusões não metálicas por parte da escória que também protege o aço líquido da exposição à atmosfera.

Uma vez no molde, o aço líquido solidifica pelo contato com a parede resfriada de cobre do molde. O molde oscila verticalmente para evitar que ocorra a aderência do aço solidificado ao molde. O aço é lentamente retirado de dentro do molde, essa velocidade sendo conhecida como velocidade de lingotamento, e pode variar de acordo com as necessidades do processo, por meio do controle de fluxo de aço líquido para o molde. O processo opera continuamente por um período de tempo que pode variar de uma hora até várias semanas, quando uma manutenção faz-se necessária.

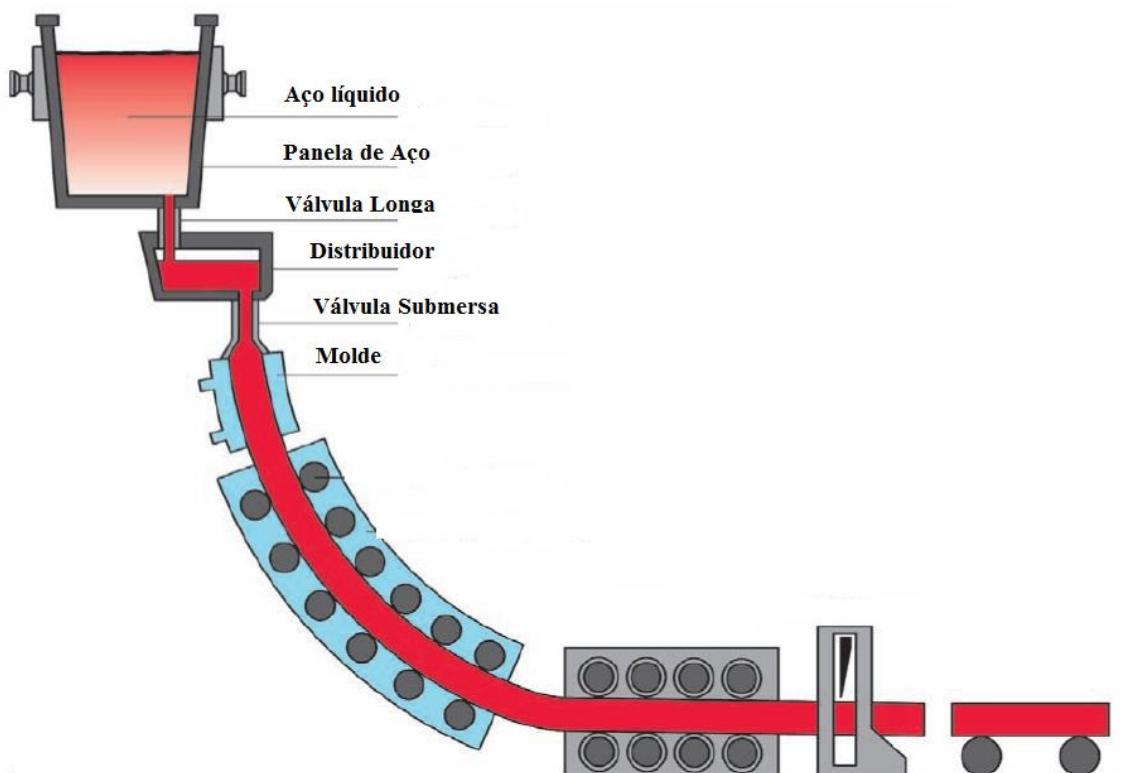


Figura 21– Desenho esquemático do processo de lingotamento contínuo.

3.8 Modelagem Numérica Do Processo Industrial

Os processos que envolvem escoamento de fluidos podem ser simulados pela técnica CFD [28], que é baseada na teoria dos Fenômenos de Transporte, utilizando métodos numéricos tais como volumes finitos para prever as características do escoamento do processo analisado.

A análise de um processo via CFD visa resolver numericamente as equações descritivas do escoamento envolvido no problema em questão. Para tanto, algumas etapas são

necessárias. A primeira delas é a especificação e construção da geometria a ser estudada, também chamada de domínio computacional. Essa geometria irá conter todo o objeto de estudo com suas características construtivas para serem analisadas. Em seguida, há a necessidade de se discretizar o domínio computacional em pequenos volumes ou elementos criando assim uma estrutura que é denominada Malha Computacional. A malha permitirá que as equações sejam aplicadas a todas as regiões (volumes ou elementos) do domínio, uma vez que não é possível aplicar as equações de maneira contínua na geometria. A construção da malha é extremamente importante para a obtenção de uma solução numérica representativa do escoamento.

Após a construção da malha computacional, as condições de contorno para solução das equações que descrevem o processo são aplicadas ao problema. Essas condições incluem condições de contorno como, por exemplo, fluxos de massa passando pelo domínio, condições para troca de calor do processo com o ambiente, geração ou perda de calor do processo por aquecimento, resfriamento ou reação química, e condições iniciais que refletem os campos de propriedades do escoamento no marco zero (do tempo), em todo o domínio computacional, para, em seguida, se iniciar o processo de solução das equações descritivas.

Após a solução das equações, os resultados podem ser visualizados e interpretados em ferramentas de Pós-processamento. Essas ferramentas permitem o acesso a informações completas sobre o processo estudado por meio da visualização tridimensional de linhas de correntes, vetores de velocidades, planos de contorno, dentre outros recursos gráficos.

3.9 Construção da Geometria

A simulação numérica aplicada a problemas envolvendo mecânica dos fluidos deve descrever os aspectos mais importantes da física do problema real por um conjunto de equações diferenciais e expressões algébricas, com condições iniciais e de contorno bem estabelecidas, conhecido como modelo matemático. Os modelos tridimensionais apresentam uma grande vantagem, uma vez que a reprodução geométrica é mais fiel ao problema real, permitindo assim a análise da influência de parâmetros construtivos do equipamento sem a necessidade da construção física de modelos para análises experimentais. Na Figura 22, é ilustrado um exemplo de uma geometria feita em três dimensões.

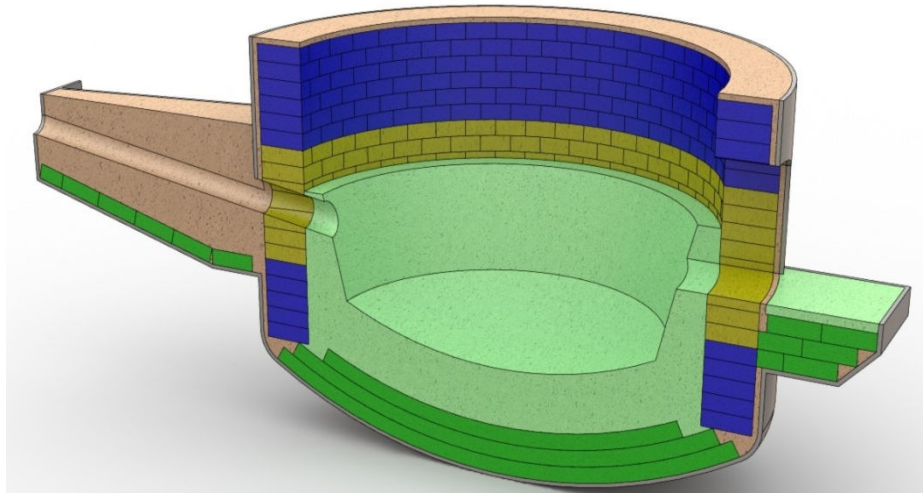


Figura 22– Exemplo de uma geometria em 3 dimensões.

3.10 Malha

A etapa de discretização do domínio de cálculo é uma das etapas mais importantes do pré-processamento de uma análise de CFD e é com certeza uma das mais decisivas na qualidade das soluções numéricas obtidas. Os modelos numéricos são sensíveis à qualidade da malha, fazendo com que diferentes discretizações de um mesmo domínio possam apresentar resultados distintos para o mesmo conjunto de condições de contorno. Isto ocorre devido a problemas de orientação, refino e qualidade dos elementos da malha. Dessa maneira, as malhas utilizadas nesse trabalho foram “calibradas” com o experimento e com a referência escolhida [2].

Apesar de apresentar maior controle sobre a qualidade dos elementos, as malhas hexaédricas nem sempre podem ser usadas para geometrias mais complexas. Na Figura 23, é mostrada uma malha hexaédrica. Já as malhas tetraédricas apresentam uma grande flexibilidade para a discretização de geometrias complexas devido ao seu caráter não estruturado. Em muitos casos, as malhas tetraédricas apresentam-se como a única solução para a discretização do domínio. De acordo com Maliska [28], as malhas tetraédricas são bastantes empregadas, pois mostram-se mais versáteis que as malhas hexaédricas quando representam geometrias complexas. Na Figura 24, é mostrada uma malha tetraédrica.

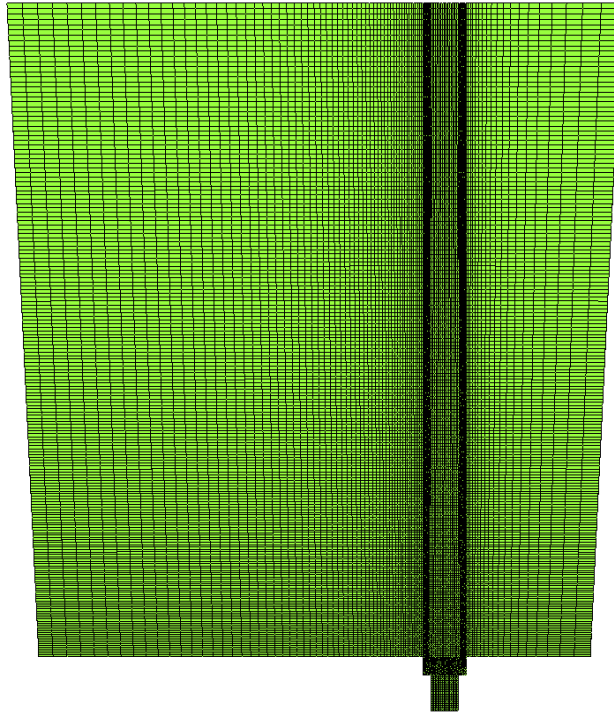


Figura 23 – Exemplo de uma malha hexaédrica.

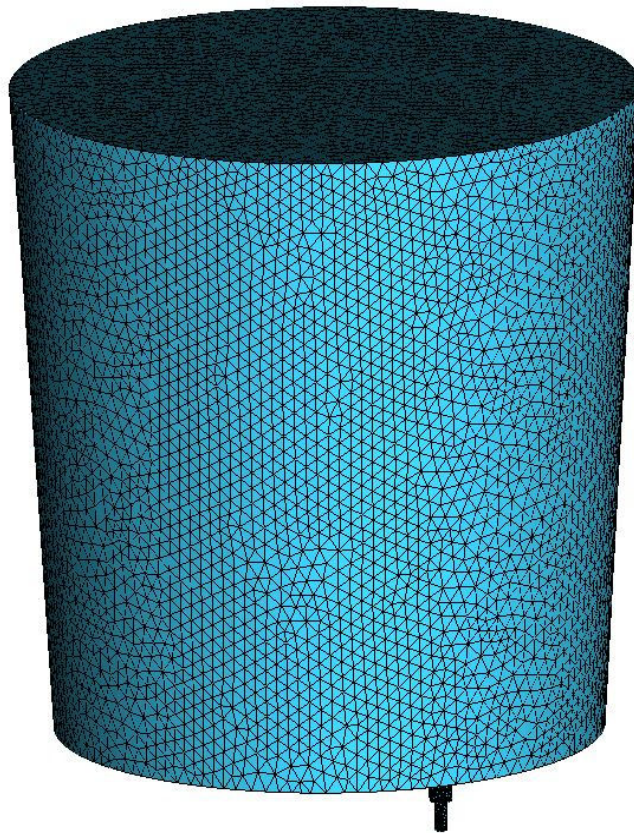


Figura 24 – Exemplo de uma malha tetraédrica.

3.11 Condições De Contorno

Nessa etapa, as condições de processo são aplicadas ao modelo. As condições geométricas são estabelecidas como: entradas e saídas de massa, paredes e planos de simetria. As condições de processo como vazão, trocas de calor, condições externas à geometria são definidas nessa fase. Na Figura 25 é mostrada a tela principal do programa CFX® utilizado na solução do problema.

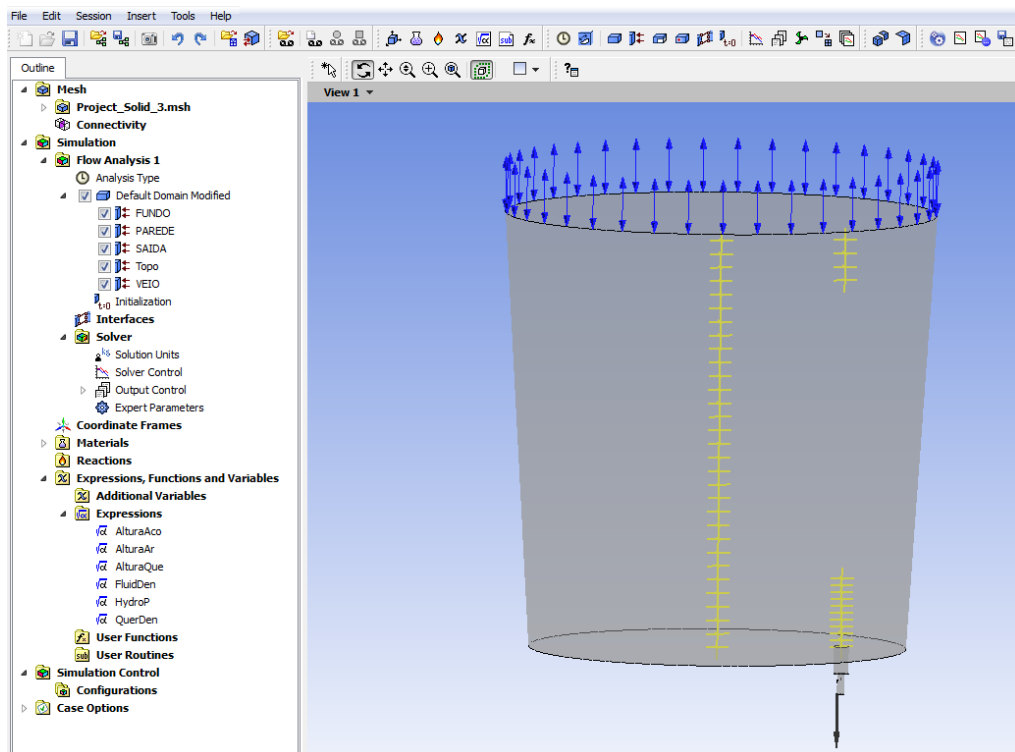


Figura 25 – Tela do programa CFX® utilizado para resolver as equações de continuidade e do movimento.

3.12 Solução das Equações

Nessa etapa, o software utiliza as condições de contorno e as condições iniciais para resolver as equações que governam o processo. O processo iterativo de solução das equações é interrompido quando a solução atinge precisão desejada ou número de iterações pré determinado.

3.13 Resultados

É nesta etapa que é feita a análise dos resultados obtidos na simulação numérica. O software permite analisar cada propriedade e característica do escoamento em qualquer momento do processo em três dimensões. Isto permite a investigação de fenômenos de difícil

mensuração, como é o caso do processo siderúrgico que acontece em temperaturas tão elevadas (acima de 1500 °C) que não há instrumentos para medir propriedades on-line.

Na Figura 26, mostra-se um corte transversal em uma panela de aço em que está representado a solução numérica para um certo momento do processo de esvaziamento do equipamento. Aço líquido está sendo transferido para o distribuidor e, nesse momento, há três fases distintas dentro da panela de aço: ar atmosférico na porção superior, escória (uma mistura líquida de óxidos de cálcio, magnésio e alumínio) sobrenadando em uma camada de aço e aço líquido. O software permite a visualização do local em que essas três fases estão bem como a interação entre elas. Isso permite um maior conhecimento do processo e ajuda a desenvolver novas e melhores práticas operacionais.

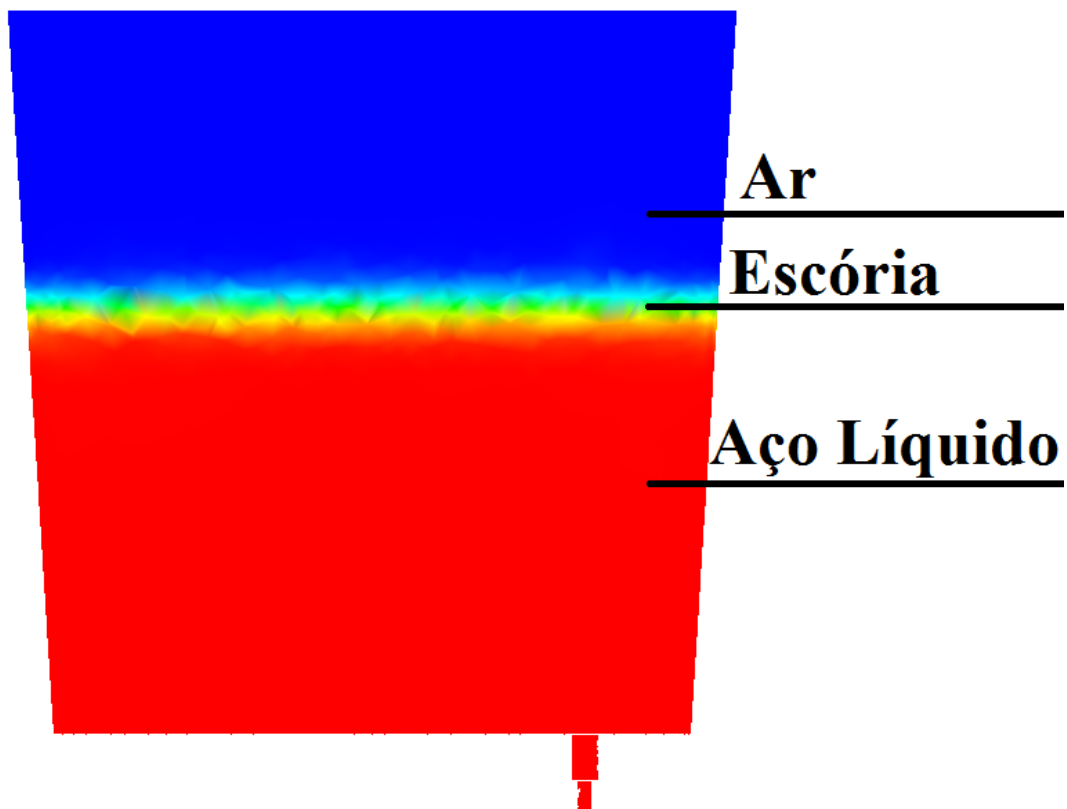


Figura 26 – Distribuição das fases ar, escória e aço líquido dentro da panela de aço durante o processo de vazamento do aço líquido no lingotamento contínuo.

3.14 - Modelagem do Esvaziamento da Panela de Aço

A necessidade de um processo de fabricação do aço com alta eficiência e baixo custo, exige que os siderurgistas invistam cada vez mais em pesquisa e desenvolvimento, tanto de produtos como de processos. Ter um processo com alto rendimento significa, na prática, aproveitar ao máximo o aço líquido produzido, enviando a menor quantidade possível para a reciclagem. Esse alto rendimento requer um controle preciso dos processos de fabricação do aço. Um dos processos que requerem um alto controle para que um alto rendimento seja alcançado é o processo da transferência do aço líquido da panela de aço para o molde no lingotamento contínuo. Esse processo exige a passagem do aço pelo distribuidor de aço. Durante esse processo, não há tratamento algum do aço líquido. Todos os processos que dão ao aço produzido suas características químicas já foram feitos em etapas anteriores. Portanto, o transporte desse aço até o molde no qual ocorrerá a solidificação deverá acontecer da maneira mais controlada possível. A camada de escória que protege o aço líquido na panela do ar atmosférico não deve ser transferida para o distribuidor, pois, como a escória é formada por uma solução de óxidos de magnésio, cálcio e alumínio entre outros, sua presença no produto final é indesejada, visto que estes óxidos se acumulam na forma de inclusões exógenas (inclusões compostas de materiais que não fazem parte da composição do aço) e causam defeitos no produto final. A presença de escória no distribuidor de aço além de causar inclusões exógenas no produto final, contribui para acelerar o ataque químico ao revestimento refratário do distribuidor.

Visando compreender melhor os fenômenos envolvidos nesse processo, extensas pesquisas nesta área foram feitas, utilizando duas técnicas: a modelagem em escala, utilizando a água como fluido de estudo, e a simulação computacional. A primeira teve seu início na década de 1980 [29], e a segunda só foi possível com o advento dos computadores de alto desempenho [12].

Historicamente, os modelos em escala serviram como uma maneira de analisar os processos siderúrgicos de maneira rápida e com baixo custo. Porém, há a restrição dos processos serem analisados à temperaturas constantes. Pequenas alterações na geometria do problema em questão podem também tornar o processo mais lento e de custo mais elevado. Com o advento dos computadores de alto desempenho, a simulação computacional dos processos siderúrgicos permitiu avaliar simultaneamente padrões de escoamento e troca térmica de maneira mais complexa e próxima ao processo real [30].

O problema da transferência do aço líquido da panela de aço para o distribuidor foi estudado por ambas as técnicas. Na literatura, diversos autores utilizam a modelagem física como um parâmetro para a validação de modelos numéricos. Kojola et al. [1] discutiram o processo de vazamento da panela utilizando um modelo em escala, utilizando a água como fluido. Os autores avaliaram diferentes mecanismos de formação do sorvedouro e relataram que este depende do diâmetro da válvula de saída, do comprimento da válvula de saída, e da densidade da fase sobrenadante.

Ni [27] investigou numericamente a formação do sorvedouro e como pequenas mudanças na geometria local (fundo da panela de aço) como na geometria da válvula de saída afetam a formação do sorvedouro. Rodrigues et al. [31] mostraram que o perfil térmico dentro da panela de aço varia não somente com o tempo, mas também com a altura da coluna de aço dentro da panela. Trabalhos na área de perda térmica em painéis de aço são antigos e, como mostra Urquhart et al. [32], há maneiras de se reduzir a perda de energia em painéis.

Mazzaferro et al. [26], começaram a utilizar a comparação de modelos em escala com modelos numéricos. Entretanto, como o trabalho foi conduzido somente em condições isotérmicas, apenas a formação do sorvedouro foi observada, tanto no modelo em escala quanto no modelo numérico. Os trabalhos mais completos nessa área foram publicados por Davila et al. [2] e Morales et al. [33]. Na primeira publicação, esse grupo mostrou que, em condições isotérmicas, o escoamento durante o vazamento é ordenado e em direção à válvula de saída. Quando se adiciona a perda térmica ao processo, correntes convectivas são geradas pela diferença na densidade do fluido (aço líquido) e esse escoamento perde essa ordem aparente, e um movimento rotacional é reportado, causando assim um vórtice claro ao final do processo de drenagem da panela. Na segunda publicação, os autores discutiram mais uma vez como não há tendência de formação de vórtices em painéis de aço que passam um tempo maior que 15 minutos em “descanso”. Os autores mais uma vez mostraram que as correntes convectivas originadas da perda térmica da panela de aço são responsáveis pela formação do vórtice.

Com base nestes trabalhos, optou-se, no presente estudo, por avaliar o processo em duas etapas. A reprodução de um experimento em escala utilizando um modelo numérico e a reprodução em modelo numérico dos resultados publicados por Davila et al. [2].

4 METODOLOGIA

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para analisar o processo de vazamento de uma panela de aço pela utilização da técnica da fluidodinâmica computacional, como feito por Kojola et al. [1], Davila et al. [2], Mazzaferro et al. [26], Ni [27], a elaboração desta foi conduzida pela validação de um modelo numérico com um modelo físico em escala como referência. O modelo em escala utiliza água e querosene como fluidos para simular o processo de vazamento do aço líquido na panela de aço. A validação do modelo numérico inclui a reprodução do experimento em um modelo numérico e a comparação dos resultados obtidos com os resultados dos experimentos. Uma vez que os resultados experimentais estejam sendo reproduzidos corretamente, o mesmo modelo numérico poderá ser utilizado para reproduzir outros processos, sem a necessidade de nova experimentação.

O trabalho foi dividido então em duas partes. A primeira parte incluiu a realização de experimentos no Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP) localizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais e, em seguida, foi criado um modelo numérico que reproduziu as condições do experimento. Esse modelo foi ajustado até que seus resultados reproduzissem com precisão os resultados experimentais. O modelo numérico foi feito utilizando o pacote ANSYS CFX. Os modelos foram processados utilizando a infra-estrutura disponibilizada pela Magnesita Refratários S.A., localizada em Contagem, MG.

A segunda parte do trabalho foi reproduzir, utilizando as configurações de software estudadas na primeira parte do trabalho, os resultados publicados por Davila et al. [2]. Neste trabalho, os autores publicam o resultado da simulação numérica do vazamento do aço líquido durante o processo do lingotamento contínuo, considerando a troca térmica da panela de aço com o ambiente industrial.

O experimento foi projetado para emular o esvaziamento da panela de aço durante o processo do lingotamento contínuo. De acordo com Chaudhary et al. [3], para garantir que as características do escoamento de um processo real de esvaziamento sejam realmente capturadas pelo experimento em escala utilizando água, é importante prestar atenção às diferenças no escoamento dos fluidos envolvidos. Essas diferenças incluem diferenças em propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade, tensão superficial), diferenças no processo envolvido e na escala dos equipamentos. O problema dos diferentes fluidos é resolvido pelo

uso das similaridades dos números de Reynolds e de Froude, segundo Szekely [34], considerando que as viscosidades cinemáticas são similares nos fluidos estudados: aço líquido e água.

4.1 O Modelo Físico

Para a reprodução do processo industrial, um modelo em acrílico de uma panela de aço, em escala 1:5, foi utilizado. Na Figura 27, são mostradas as dimensões do modelo em acrílico.

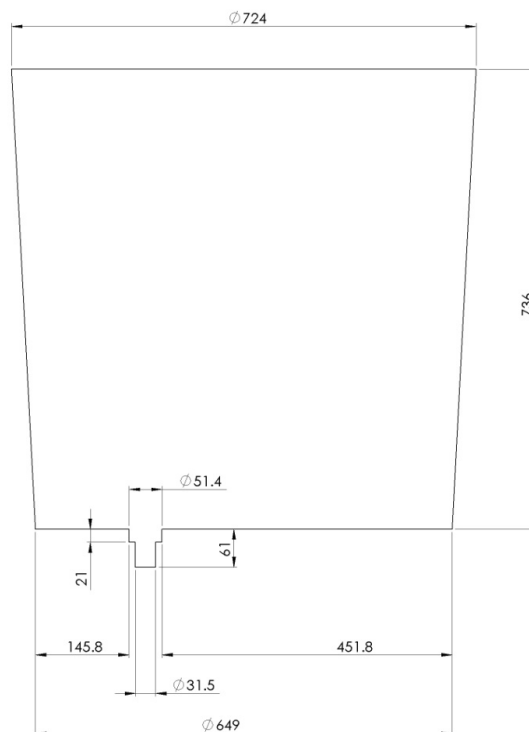


Figura 27 - Dimensões dos modelos experimental e numérico(em mm) da panela de aço.

Água foi usada como fluido para emular o aço líquido e uma camada de querosene (com densidade medida de 870 kg m^{-3}) de 1,5 cm espessura foi utilizada para emular a escória. A drenagem da água se dá por uma válvula com um diâmetro de 51,4 mm, tendo uma contração abrupta de 31,5 mm. A válvula está localizada a 190,5 mm do centro do fundo da panela.

Para a realização do teste de drenagem, objetivou-se em um primeiro momento avaliar o vazamento da panela de aço quando a água atingisse um estado de completa estagnação conforme procedimento descrito por Davila et al.[2]. Como os resultados dessa simulação seriam usados para a calibração do modelo numérico, não houve a necessidade da utilização

de nenhum dispositivo de controle de vazão. Este fato eliminou possíveis erros adicionais ao experimento.

Para atingir o estado de estagnação, durante o processo de enchimento da panela foram adicionados pó (purpurina) e fios de lã para observar-se o movimento da água após o enchimento. Foi determinado visualmente então que 50 minutos após o término do enchimento da panela não havia mais movimento residual na panela. O esvaziamento da panela então começou e o processo todo foi filmado utilizando uma câmera Canon Rebel T2i, gravando o vídeo em alta definição (1920 x 1080 pixels), sendo o filme utilizado para a análise dos resultados. Os experimentos foram realizados em triplicata.

4.2 O Modelo Numérico

Foram construídos dois modelos numéricos para este trabalho, sendo um para cada uma das etapas desse projeto. Alguns autores: Rodrigues et al. [31], Mazzaferro et al. [26], Ni [27], publicaram resultados utilizando modelos numéricos simplificados, seja utilizando um modelo que contemple apenas a região da válvula de saída ou pela utilização de critérios de simetria geométrica. Na busca pela melhor representação do fenômeno físico observado, optou-se pela construção de um modelo completo, de acordo com as publicações de Morales et al. [33], Kojola et al. [1] e Davila et al. [2].

Os modelos numéricos utilizados foram construídos utilizando o pacote de ferramentas para simulação fluidodinâmica da ANSYS. Na Figura 28, mostra-se o modelo em três dimensões utilizado na simulação da primeira etapa.

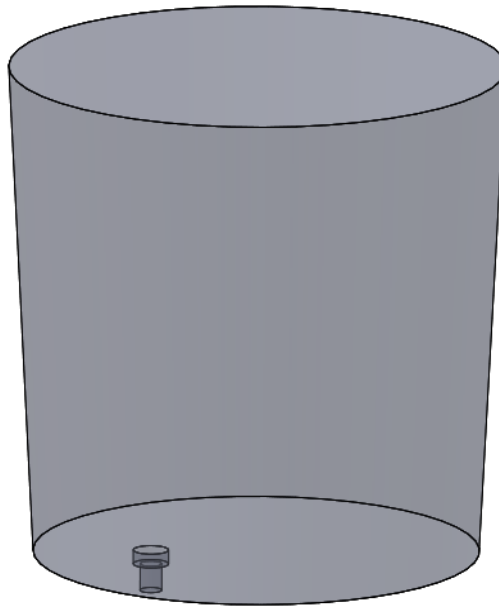


Figura 28 - Modelo em três dimensões utilizado na simulação da primeira etapa.

Para a elaboração da malha computacional da primeira etapa, realizaram-se testes preliminares. A malha computacional final utilizou 2,7 milhões de nós, sendo do tipo hexaédrica, o que traz vantagens para a simulação quando o objetivo é investigar escoamentos em uma direção dominante [28]. Nesse caso, o escoamento do aço líquido escoava preferencialmente em direção ao fundo da panela. O modelo foi uma réplica do modelo em acrílico utilizado nos experimentos em laboratório. Na Figura 29, é mostrada a malha computacional para a primeira etapa.

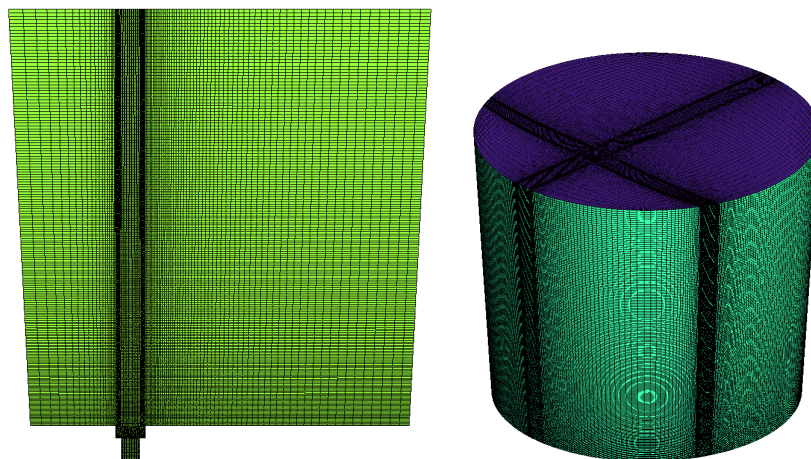


Figura 29 – Malha hexaédrica utilizada na validação dos experimentos realizados em laboratório.

Para a elaboração da malha computacional da segunda etapa, utilizou-se as referências contidas na publicação de Davila et al. [2]. Neste trabalho, os autores utilizaram uma malha tetraédrica com um refino na região da válvula de saída do aço, sendo que a malha final teve um total de aproximadamente 160 mil células. Esse modelo reproduziu um equipamento industrial em uma escala de 1:1. Na Figura 30, mostra-se a malha computacional para a segunda etapa.

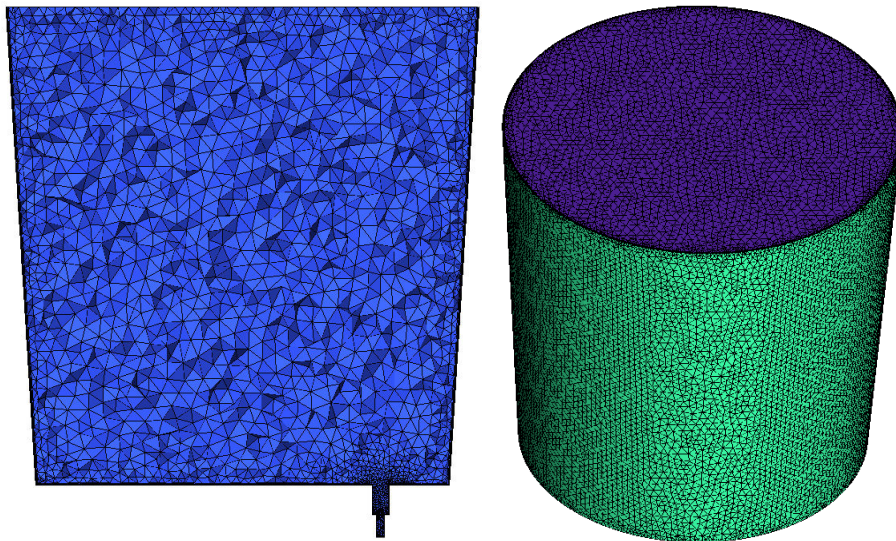


Figura 30 - Malha computacional para a segunda etapa.

Os arranjos para ambas as etapas são diferentes. Na primeira etapa, utilizou-se água e querosene a 25°C e ar atmosférico como fluido de preenchimento. O modelo utilizado foi isotérmico. As propriedades dos fluidos se encontram na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades dos fluidos utilizados na primeira etapa. Dados encontrados em Davila et al. [2].

Fluido	Propriedade	Valor	Unidade
Água	Densidade	997	kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	0,0008899	pa s
Querosene	Densidade	870	kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	0,001078	pa s
Ar	Densidade	1,225	kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	1,789x10 ⁻⁵	pa s

Na interface entre a água e o querosene, foi utilizada uma condição de contorno de superfície livre homogênea, pois durante os pré testes realizados com o modelo numérico essas condições se mostraram mais estáveis (melhor convergência numérica) e seus resultados reproduziam com mais fidelidade o resultado experimental. O modelo de turbulência utilizado foi o modelo de duas equações, k-ε. A simulação transiente utilizou um passo de tempo de 1×10^{-3} s e teve como objetivo alcançar uma diferença média entre uma interação e outra menor que 1×10^{-4} .

Para a segunda etapa da simulação, os fluidos utilizados são diferentes e suas propriedades estão listadas na Tabela 2. Para o arranjo inicial do vazamento desta etapa, conforme descrito no trabalho de Davila et al. [2], a panela de aço permanece cheia por um período de 15 minutos. Durante esse tempo, a panela perde calor para o ambiente e um gradiente térmico se forma dentro da panela de aço. Esse gradiente térmico é o responsável por induzir correntes convectivas dentro da panela. Para a transferência de calor, o autor utiliza uma condição imposta de uma taxa de transferência de calor de 9500 W/m^2 nas paredes do equipamento. A transferência de calor pela interface escória/ar foi considerada desprezível devido ao isolamento proporcionado pela camada de escória.

Após esse período de 15 minutos, uma vazão em massa de 2,1 t/min foi imposta ao modelo, fazendo assim com que o aço líquido começasse a ser drenado da panela. Na interface entre o aço líquido e a escória, foi utilizada uma condição de contorno de superfície livre homogênea. Uma diferença entre os dois modelos numéricos foi o modelo de turbulência utilizado. Davila et al. [2] reportaram que utilizaram o modelo SST ao invés do modelo de duas equações k-ε. Essa alteração exigiu dos autores que inserissem algumas equações para calibrar o modelo. Essa calibração não foi necessária ser reproduzida, pois, como explica o ANSYS Help [35], a mesma é feita automaticamente pelo software durante as primeiras iterações. A tensão interfacial entre escória e aço líquido utilizada foi de 1,3 N/m. A simulação transiente utilizou um passo de tempo de 1×10^{-3} s e teve como objetivo uma diferença média de solução entre uma interação e outra menor que 1×10^{-4} .

Tabela 2 - Propriedades dos fluidos utilizados na segunda etapa. Dados encontrados em Davila et al. [2]

Fluido	Propriedade	Valor	Unidade
Aço Líquido	Densidade	7010	kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	0,006	pa s
	Condutividade Térmica	41	W/m K
	Calor específico	750	J/kg K
Escória	Densidade	2570	kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	0,13	pa s
	Condutividade Térmica	6,96	W/m K
	Calor específico	780	J/kg K
Ar	Densidade	1,225	Kg/m ³
	Viscosidade Dinâmica	$1,789 \times 10^{-5}$	pa s
	Condutividade Térmica	0,0242	W/m K
	Calor específico	1006,43	J/kg K

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados do Modelo Físico

A avaliação do tempo de estagnação da panela mostrou que 50 minutos é um tempo longo o suficiente para que qualquer velocidade residual dentro da panela cesse. Essa avaliação foi feita pela observação do movimento de pequenas partículas de pó adicionadas à panela e também pela visualização do movimento de pequenos fios de lã. Então para cada uma das réplicas do experimento, esse tempo de estagnação foi observado.

O vazamento da panela era iniciado assim que o tempo de estagnação era atingido. Os experimentos foram filmados e a análise dos filmes permitiram extrair as informações desejadas.

O primeiro ponto a ser observado foi a possível formação de um vórtice no final do processo. Entretanto tal vórtice não se formou e, como descrito por Kojola et al. [1], Rodrigues et al. [31], Mazzaferro et al. [26] e Ni [27], o que se observou foi a formação de uma estrutura em forma de funil denominada sorvedouro. Durante o processo de formação dessa estrutura, quando o nível de água dentro da panela diminui até um certo ponto, a superfície logo acima da saída da panela é dragada para dentro da válvula formando assim o sorvedouro.

Analisando passo a passo as imagens dos filmes gravados durante o experimento, verificou-se que quando a interface água/querosene se aproximou da marca de 5 cm na escala pequenas porções de querosene estão começando a ser arrastadas para dentro da válvula de saída. Indicando haver um aumento na velocidade vertical [1]. Na Figura 31, é mostrado este instante inicial.

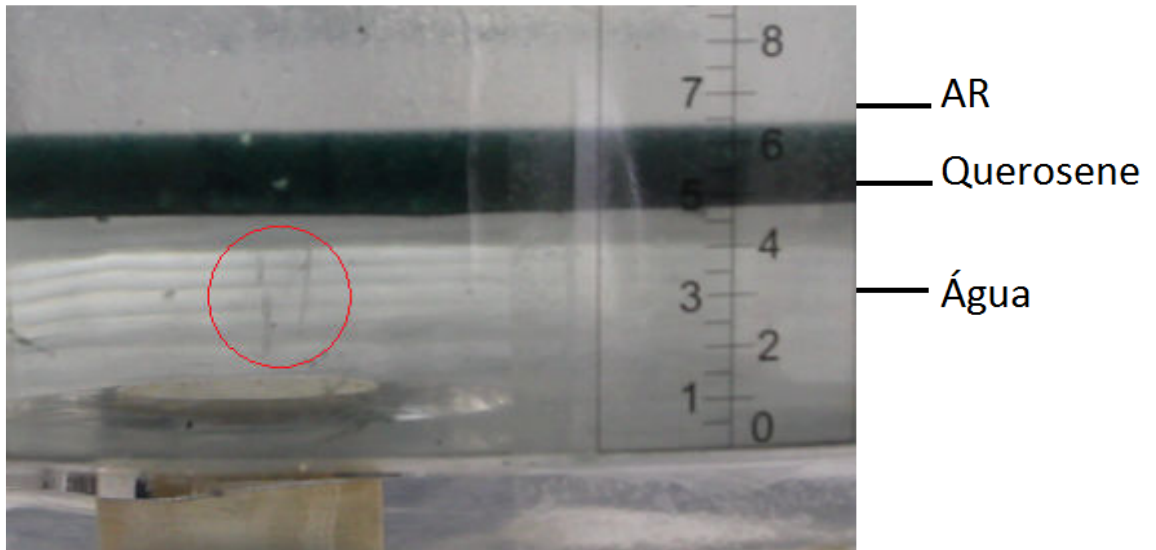


Figura 31 - Instante inicial de arraste de querosene para dentro da válvula de saída.

Assim que a interface água/querosene passa da marca dos 4 cm aumenta a frequência com que porções, cada vez maiores, de querosene são sugadas para dentro da válvula. Na Figura 32, mostra-se uma grande porção de querosene sendo arrastada para a válvula.

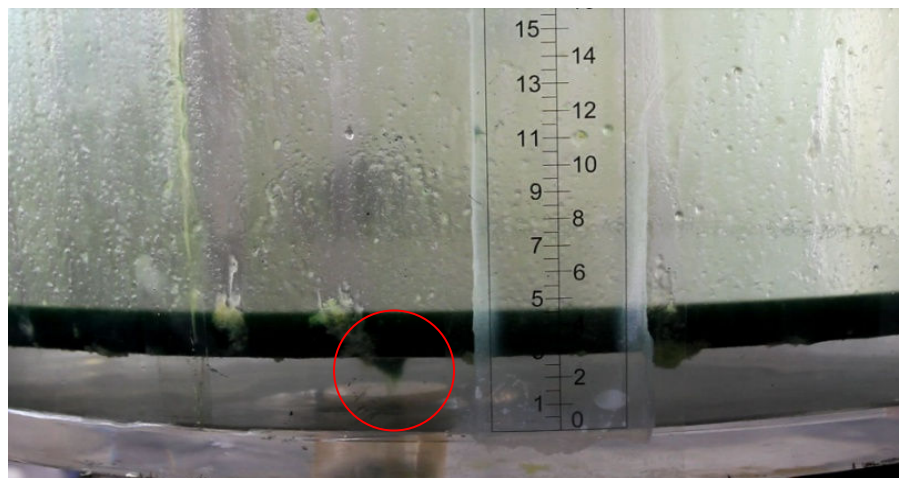


Figura 32 – Arraste de uma grande porção de querosene para a válvula de saída.

Por volta da marca dos 3 cm, a pressão estática exercida pela camada de querosene se torna maior do que a pressão da água escoando para dentro da válvula, o que faz com que a interface água/escória colapse dentro da válvula em uma estrutura com formato de um funil, fazendo com que água e querosene sejam continuamente drenados. Esse comportamento foi observado em todos os experimentos realizados. Na Figura 33, é mostrado o momento da formação do sorvedouro, em que o querosene é continuamente drenado juntamente com a água no dreno afinado que se forma.

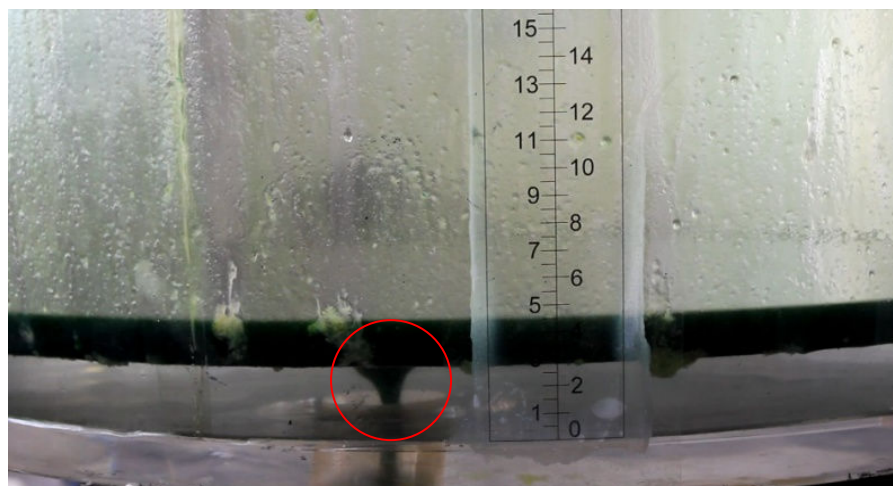


Figura 33 - Momento da formação do sorvedouro.

5.2 - Resultados do Modelo Numérico da Primeira Etapa

Com base nos resultados do modelo físico, o modelo numérico foi construído e calibrado. Testes foram feitos para se definir quais seriam os melhores parâmetros para a simulação.

O primeiro passo para a verificação do modelo numérico foi comparar o fluxo calculado com o observado no modelo físico. Utilizando as ferramentas de pós-processamento do pacote ANSYS, foi possível verificar as características do escoamento. Quando a interface água/querosene estava acima de 5 cm da válvula, não houve qualquer perturbação no escoamento, conforme pode ser visto na Figura 34.

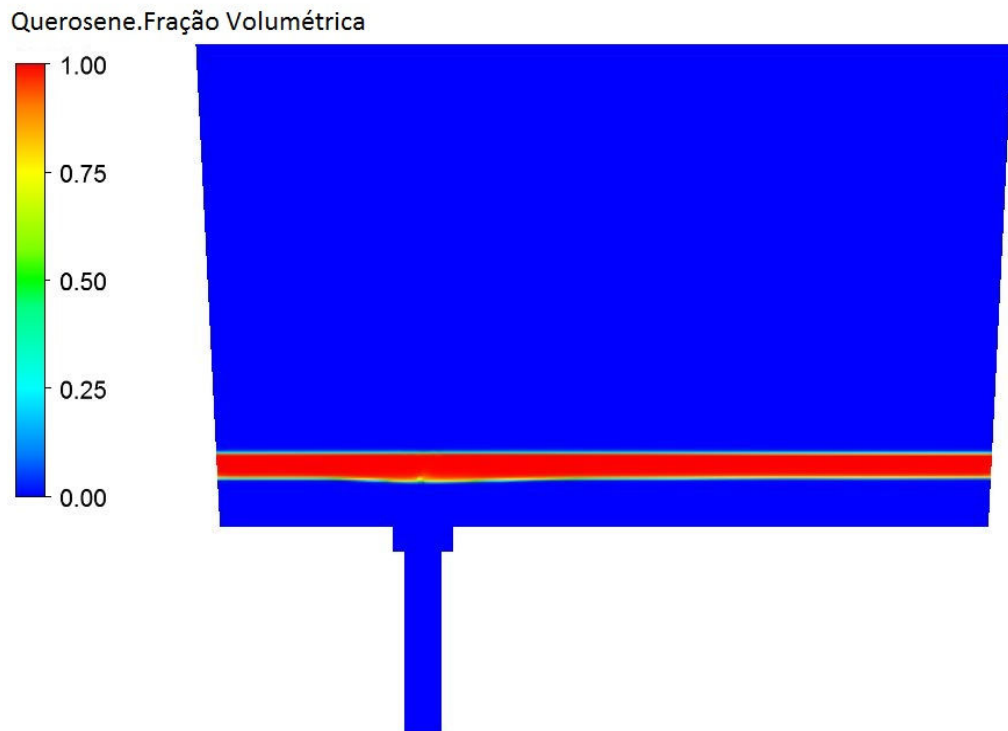


Figura 34 – Interface água/querosene a 5cm do fundo da panela.

Quando a interface água/querosene atingiu a marca de 4,5 cm, a mesma começou a ser defletida em direção à abertura da válvula, indicando um aumento de velocidade vertical naquela região (Figura 35).

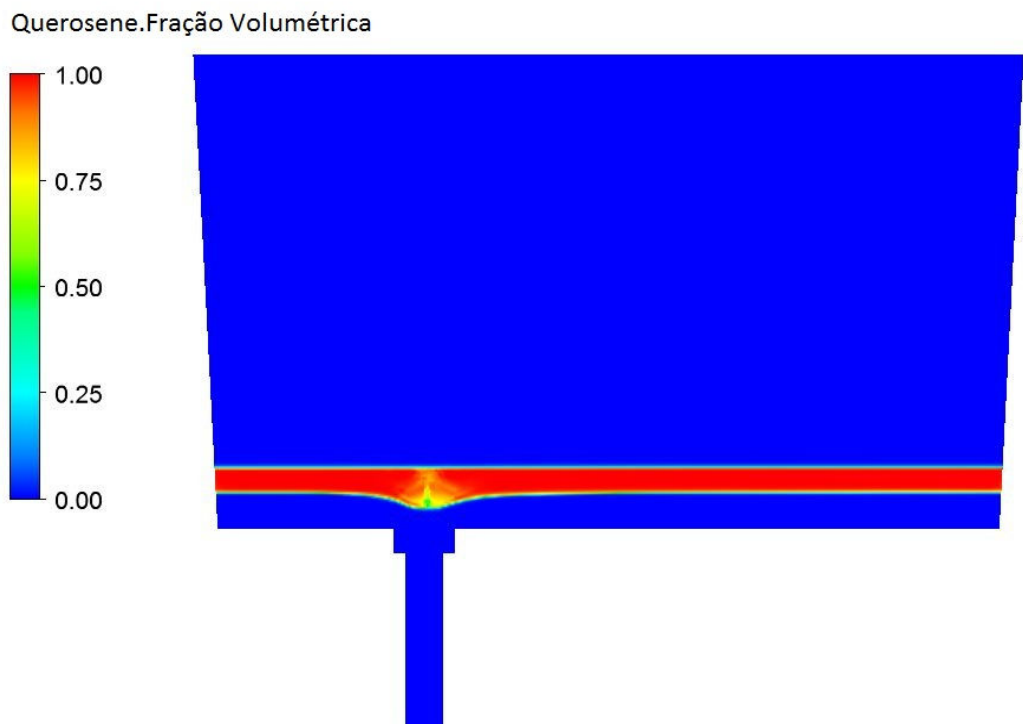


Figura 35 - Interface água/querosene defletida pelo escoamento a 4,5 cm de altura em relação à válvula de saída.

Finalmente, quando a interface água/querosene atinge a marca de 3 cm acima da válvula de saída, a pressão estática da camada de querosene se torna maior que a pressão da água na entrada da válvula e a interface querosene\água é drenada para dentro da válvula. A partir desse momento a camada de querosene é constantemente drenada e ocorre a formação do sorvedouro (Figura 36).

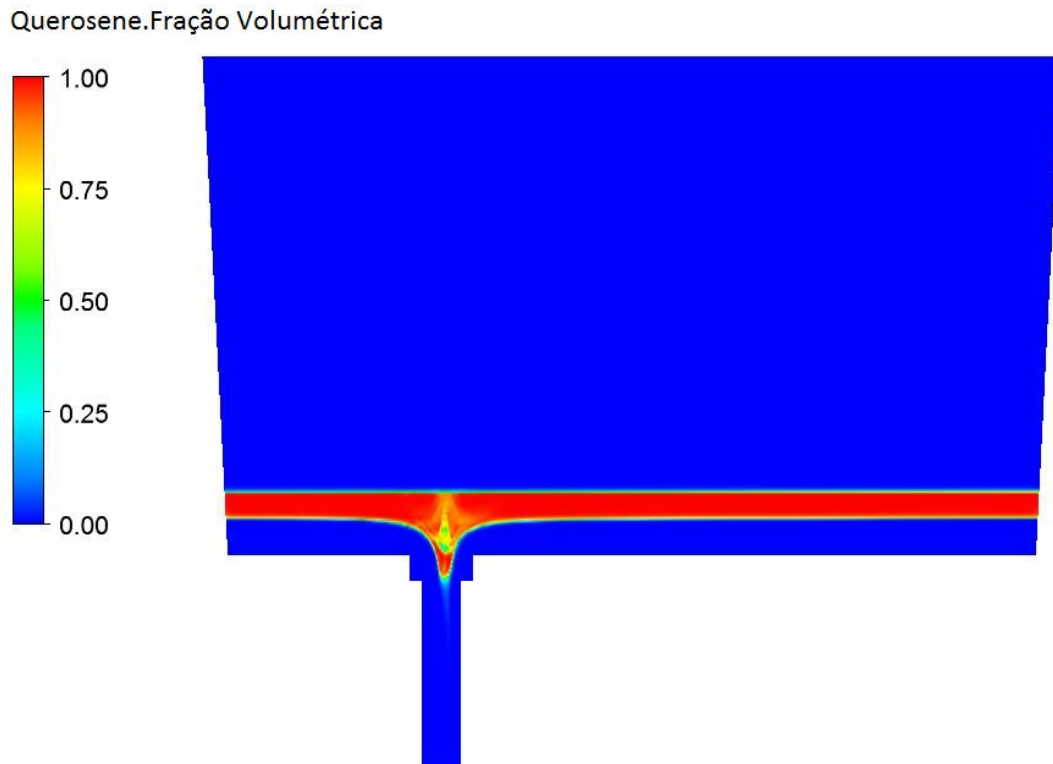


Figura 36 - Instante em que ocorre a formação do sorvedouro. Interface água/querosene a 3 cm de altura em relação à válvula de saída.

As velocidades verticais do escoamento próximas à válvula de saída, ao longo do processo de vazamento da panela, foram calculadas pelo modelo numérico. Pontos de referência foram distribuídos em torno da válvula. Os pontos de 1 a 4 foram situados logo acima do centro da válvula, com alturas de 1, 2, 3 e 4 cm medidos a partir do fundo da panela. Os pontos 5 e 6 foram situados na borda da válvula a uma altura de 0,1 cm a partir do fundo da panela. Na Figura 37, mostra-se a disposição dos pontos de referência no modelo numérico.

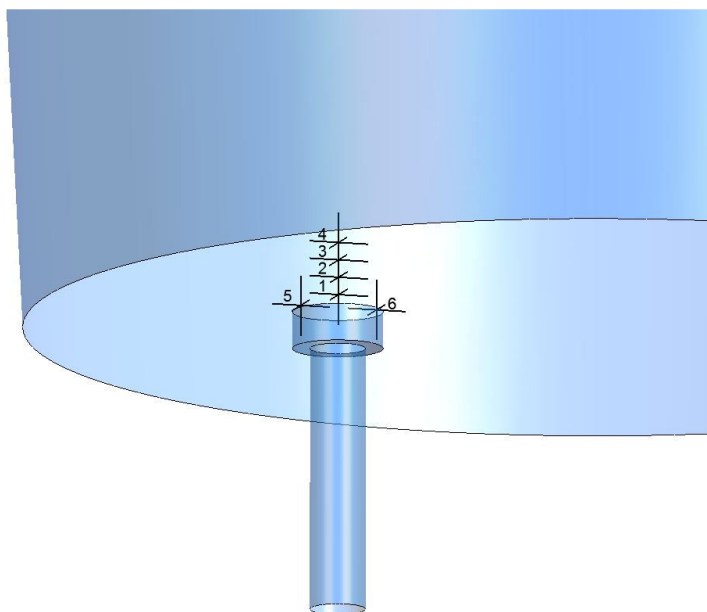


Figura 37 - Disposição dos pontos de referência no modelo numérico.

A partir desses pontos de referência, as velocidades verticais puderam ser calculadas e comparadas. Como discutido por Kojola et al.[1] a velocidade vertical acima da válvula de saída aumenta pelo fato do fluxo no fundo da panela não ser capaz de fornecer toda a massa necessária para suprir a demanda por escoamento. Na Figura 38 é mostrada a evolução das velocidades verticais nos pontos citados. É possível verificar que as velocidades nos pontos 1 e 2 são maiores que as velocidades nos pontos 5 e 6 (localizados nas bordas da válvula). Esse aumento na velocidade vertical causa um aumento no valor da pressão dinâmica e consequentemente uma redução na pressão estática naqueles pontos. Essa redução na pressão estática da água é compensada pela deflexão da interface água/querosene. Quando a interface passa do pela altura de 3 cm em relação ao fundo da panela, a pressão estática da camada de querosene se torna maior que a pressão estática da água na saída da válvula e a interface colapsa dentro da válvula de saída, em uma estrutura com formato de funil, formando assim o sorvedouro.

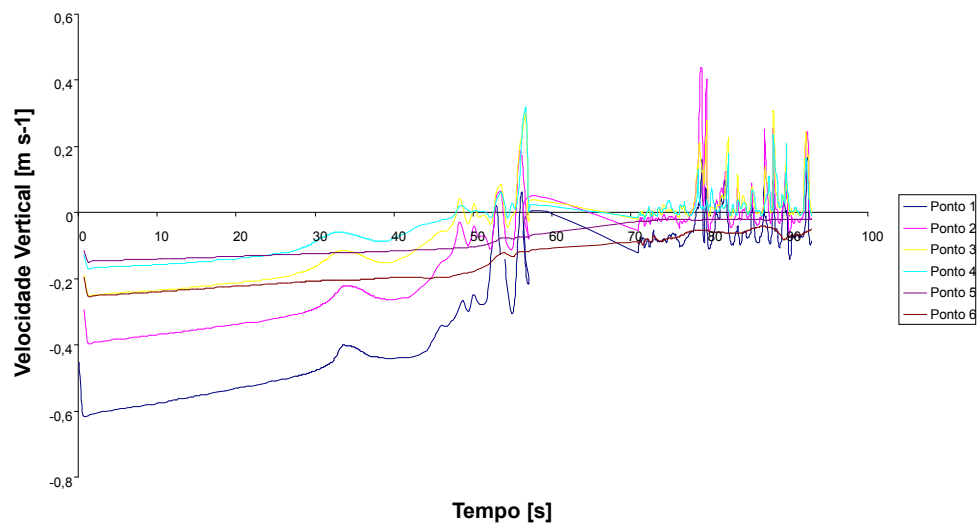


Figura 38 - Evolução das velocidades verticais nos pontos de referência.

Por fim, a análise dos campos de velocidades em cortes transversais e paralelos à válvula mostram a clara formação do sorvedouro em um formato de funil e sem a presença de estruturas de vórtices, assim como discutido por Kojola et al.[1]. O padrão de escoamento de água em direção à válvula em um corte transversal é mostrado na Figura 39.

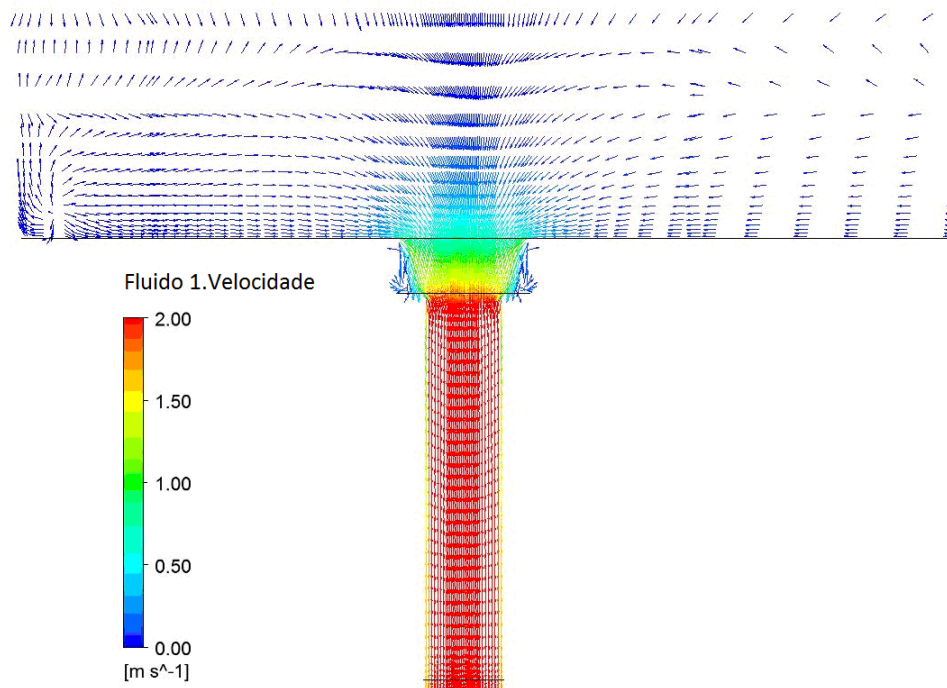


Figura 39 - Corte transversal à válvula.

Nas Figuras 40, 41 e 42, são mostrados os campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela. Pode-se verificar nessas imagens que não há movimento tangencial em relação ao centro da válvula de saída como seria esperado em um caso no qual a formação de vórtices fosse detectada. Na Figura 43, mostra-se mais claramente os vetores apontando uniformemente em direção à válvula, corroborando assim o resultado do trabalho de Kojola et al.[1]. Resultado similar ao da Figura 43 também foi apresentado por Mazzaferro et al. [26].

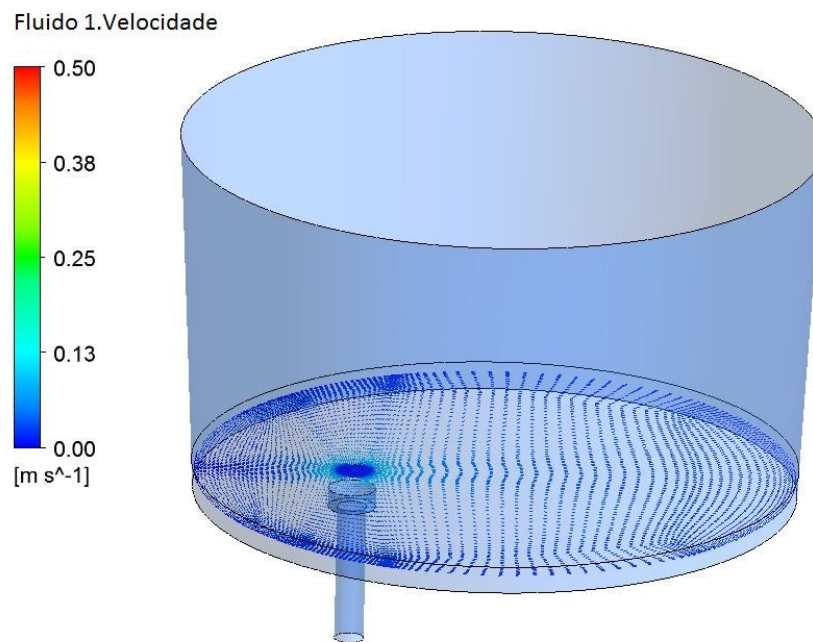


Figura 40 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela.

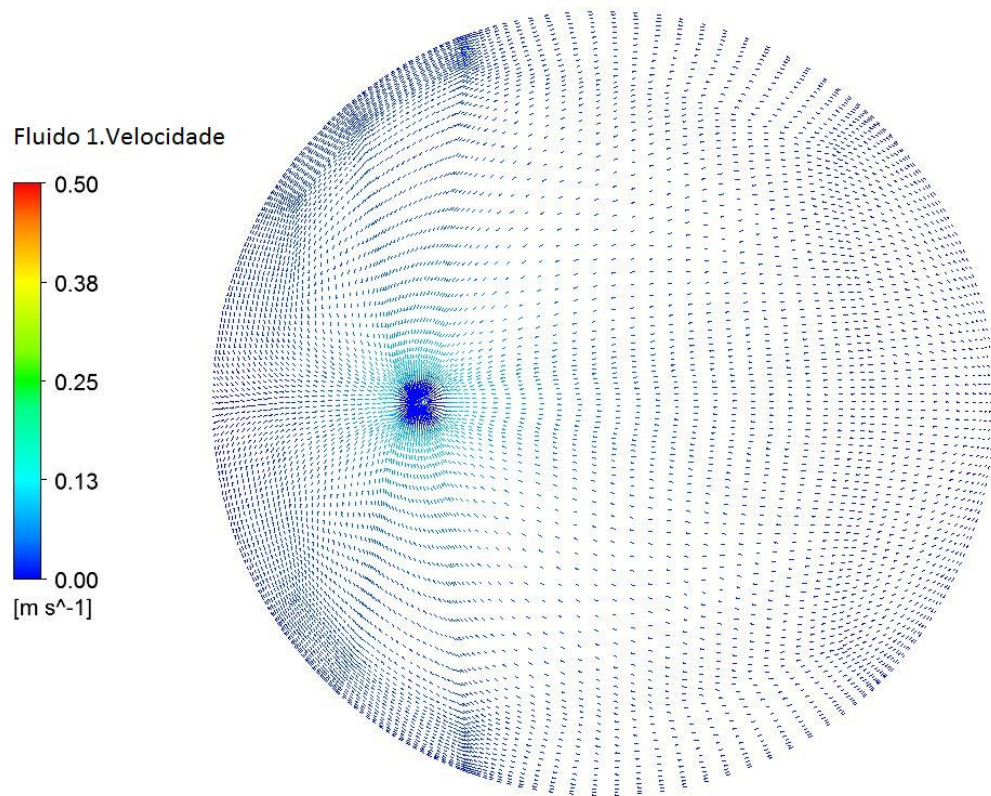


Figura 41 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela. Vista superior.

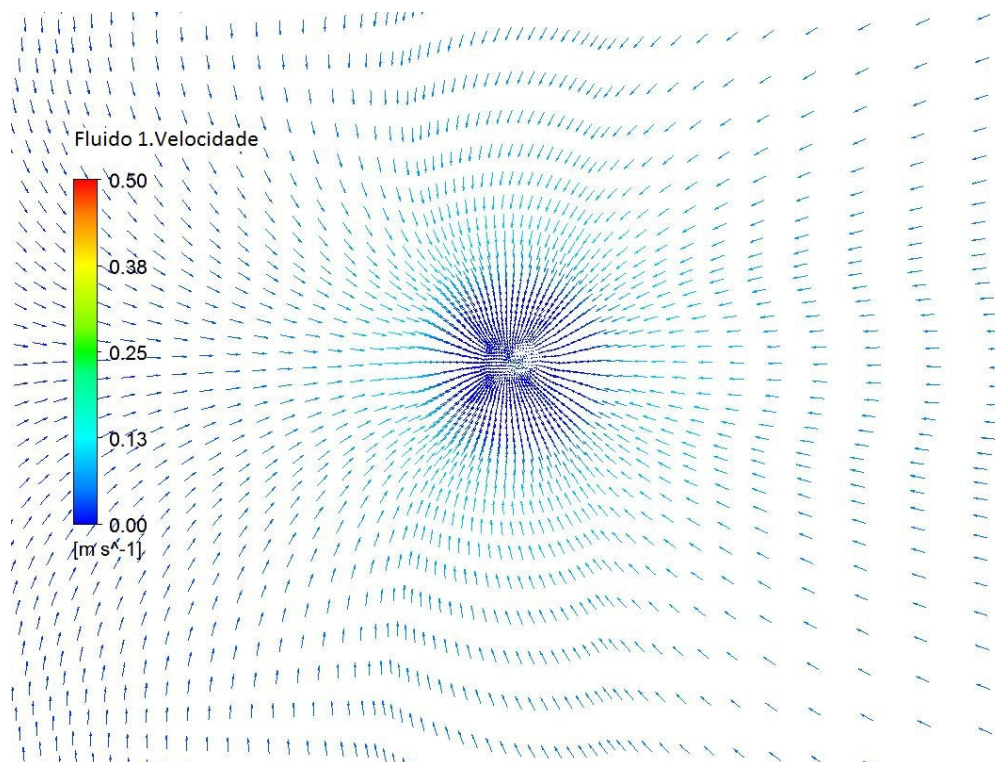


Figura 42 - Campos de velocidade em um corte paralelo à válvula a uma altura de 2 cm do fundo da panela. Detalhe da vista superior.

5.3 Resultados do Modelo Numérico da Segunda Etapa

Após a validação dos resultados dos experimentos realizados em laboratório, partiu-se para a elaboração de um modelo que reproduzisse os resultados publicados por Davila et al. [2] para uma panela real, lingotando aço líquido e escória. Esse modelo foi computado em duas fases.

Na primeira fase, a panela de aço foi deixada em repouso e perdendo calor para o ambiente conforme as condições de contorno já descritas. Como consequência desse fato, gera-se dentro da panela um gradiente térmico, que pode ser observado na Figura 43. As correntes convectivas decorrentes da formação desse gradiente podem ser observadas na Figura 44. Davila et al. [2], estudaram o comportamento térmico da panela em diferentes intervalos de tempo (5, 30, 45 e 60 minutos) e observaram que quanto mais tempo a panela permanecesse em repouso, maior seria a perda térmica da mesma. Para a análise do processo de vazamento da panela, os autores optaram por utilizar a panela após 15 minutos de descanso. Embora não haja uma explicitação do motivo para se adotar essa configuração, um intervalo entre 15 e 20 minutos é coerente com o tempo operacional que se gasta para transportar a panela de aço da estação de tratamento no refino secundário até a torre do lingotamento contínuo [23].

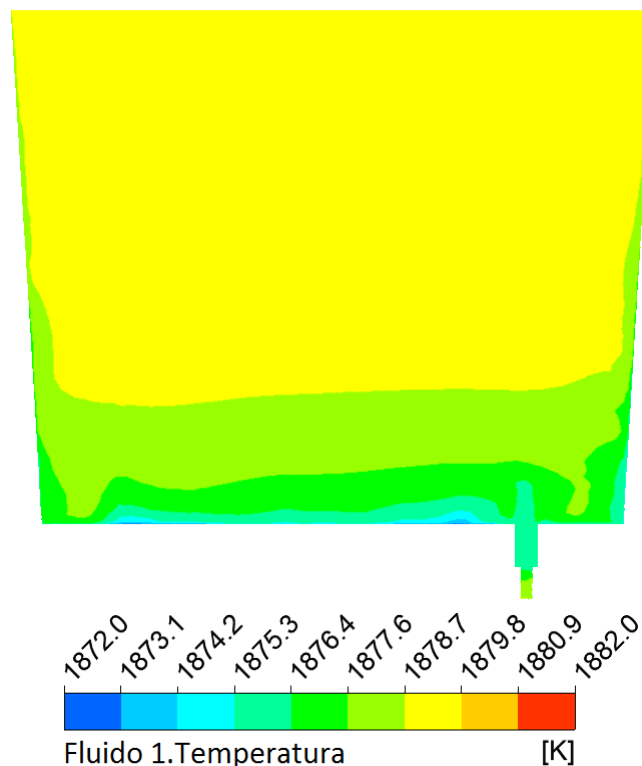


Figura 43 - Gradiente térmico na panela de aço após um tempo de repouso de 15 min.

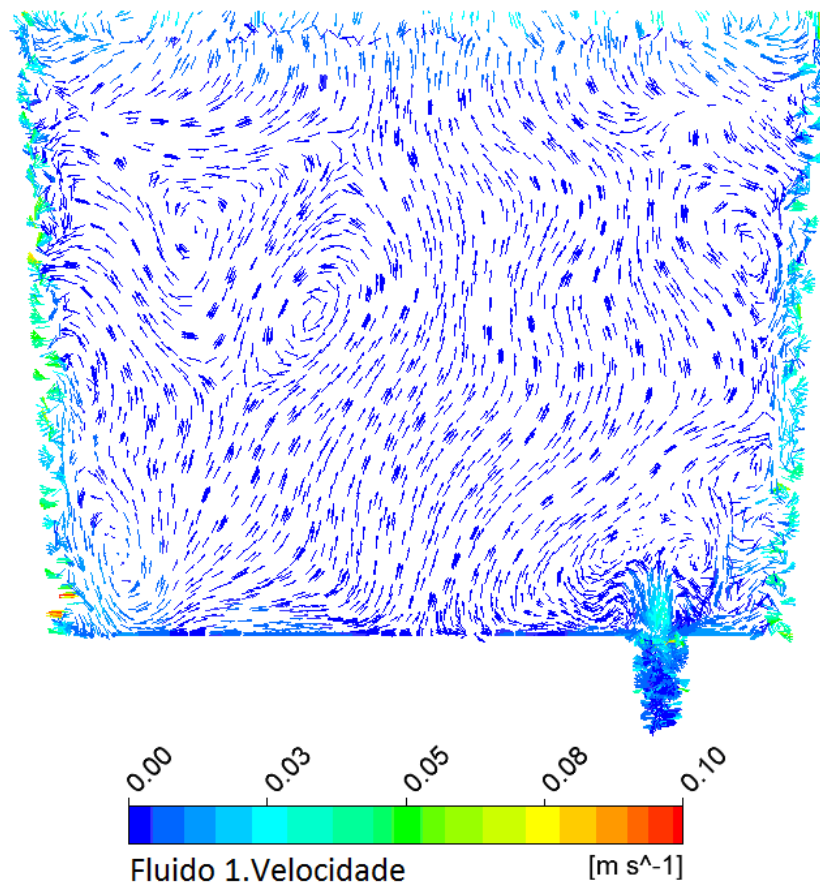
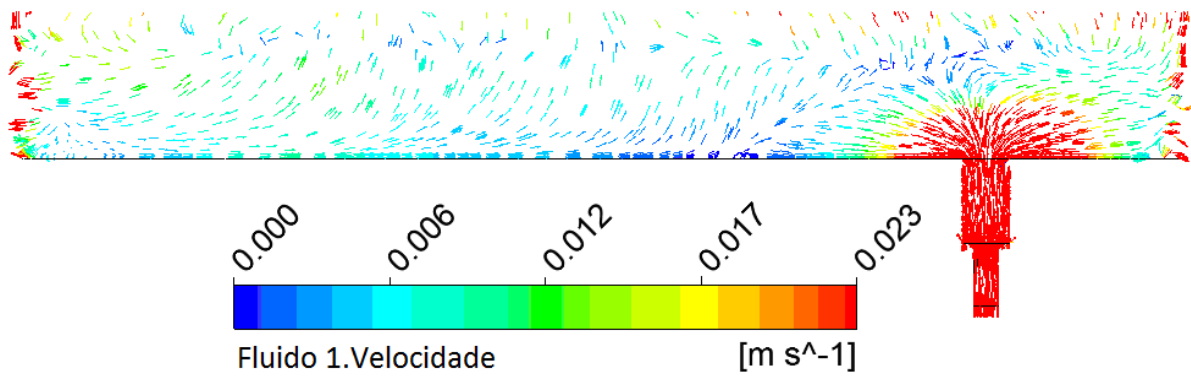
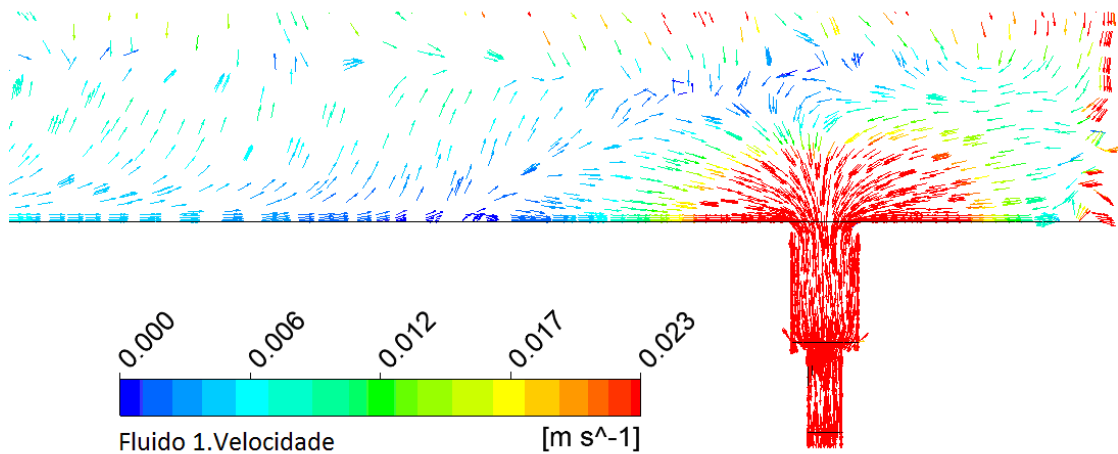


Figura 44 - Correntes convectivas decorrentes do processo de resfriamento do aço dentro da Panela.

Na segunda fase, a panela começa a vazar o aço líquido com uma taxa prescrita, além da contínua perda de calor pelas paredes da panela. Observa-se, então, o alinhamento do escoamento em direção à válvula de saída, entretanto, devido a ação das correntes convectivas, esse escoamento começa a apresentar uma rotação em torno da válvula. Na Figura 45, é mostrado um plano passando pelo centro da válvula de saída quando a altura do banho metálico estava em 0,35 m. Nesse momento, pode-se observar o escoamento alinhado em direção à válvula de saída, e no lado oposto à válvula, as correntes convectivas ascendentes perturbando o escoamento.



(a)



(b)

Figura 45– (a) Plano pelo centro da válvula de saída. Altura do banho metálico em 0,35 m. (b) Detalhe do escoamento no plano pelo centro da válvula de saída.

Na Figura 46, mostra-se que, mesmo a interface do banho metálico com a escória estando a uma altura de 1,5 m do fundo da panela, é possível identificar movimento rotacional em relação à válvula de saída.

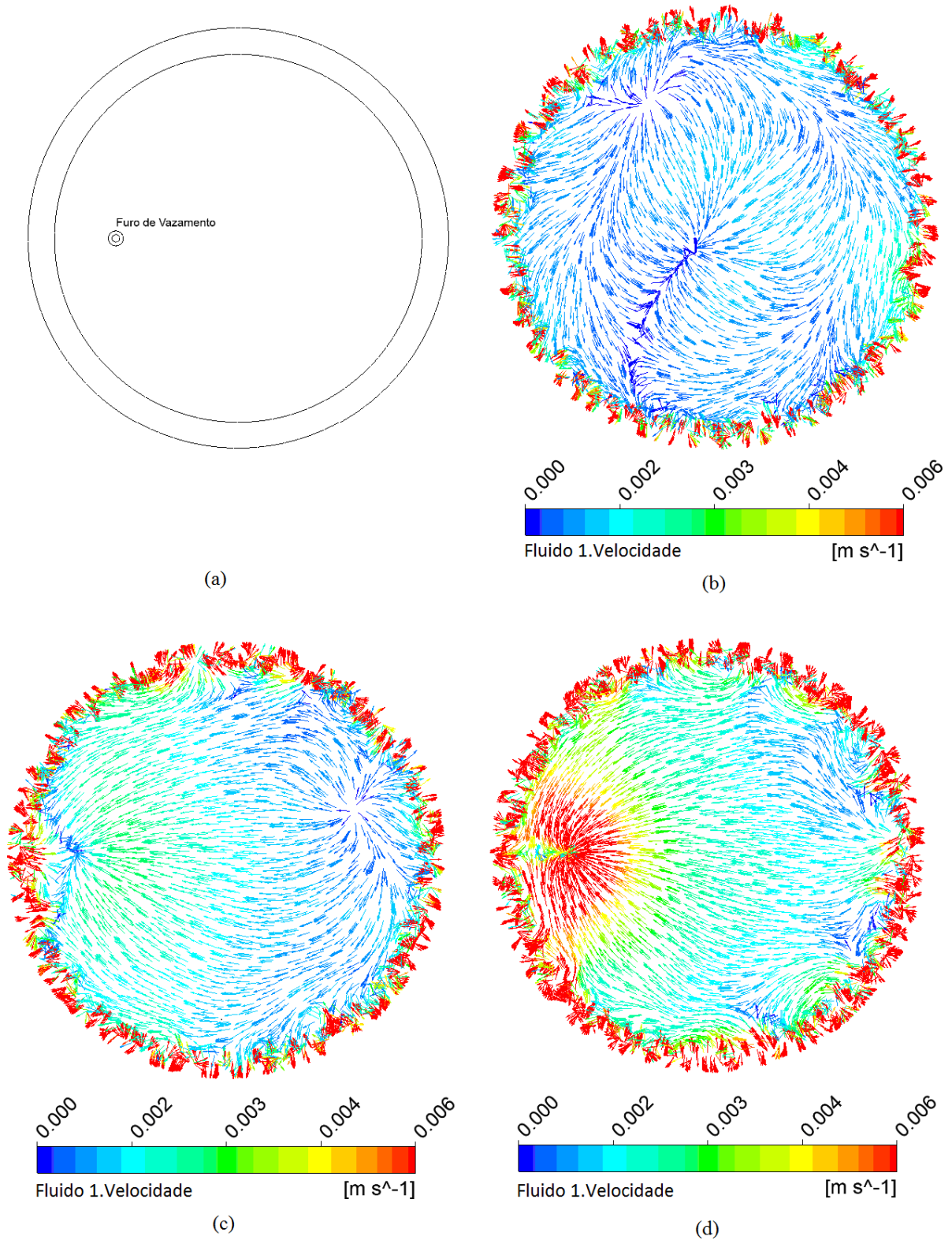


Figura 46 - Movimento rotacional do banho metálico em diferentes alturas e nível do banho metálico em 1,5 m. (a) posição do furo de vazamento (b) altura do fundo da panela: 0,8 m; (c) altura do fundo da panela: 0,4 m; (d) altura do fundo da panela: 0,2

Seguindo os resultados publicados por Davila et al. [2], os autores reportaram o início da formação do vórtice quando a altura da interface do banho metálico chegou à 0,35 m do fundo da panela de aço. O mesmo início da formação de vórtice pode ser visto na Figura 47.

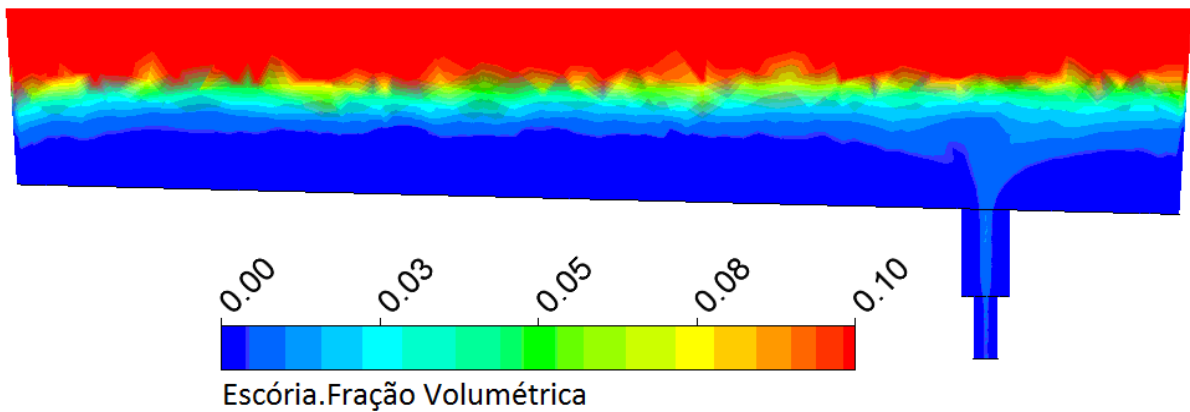


Figura 47 - Início da formação do vórtice. Altura da interface metal/escória em 0,35 m do fundo da panela.

As Figuras de 48 a 52 mostram os vetores em planos cortados em diferentes alturas do fundo da panela no instante em que a altura da interface metal/escória era de 0,35 m. Esses cortes mostram claramente que a orientação dos vetores muda de um nível para outro, caracterizando assim a formação do vórtice.

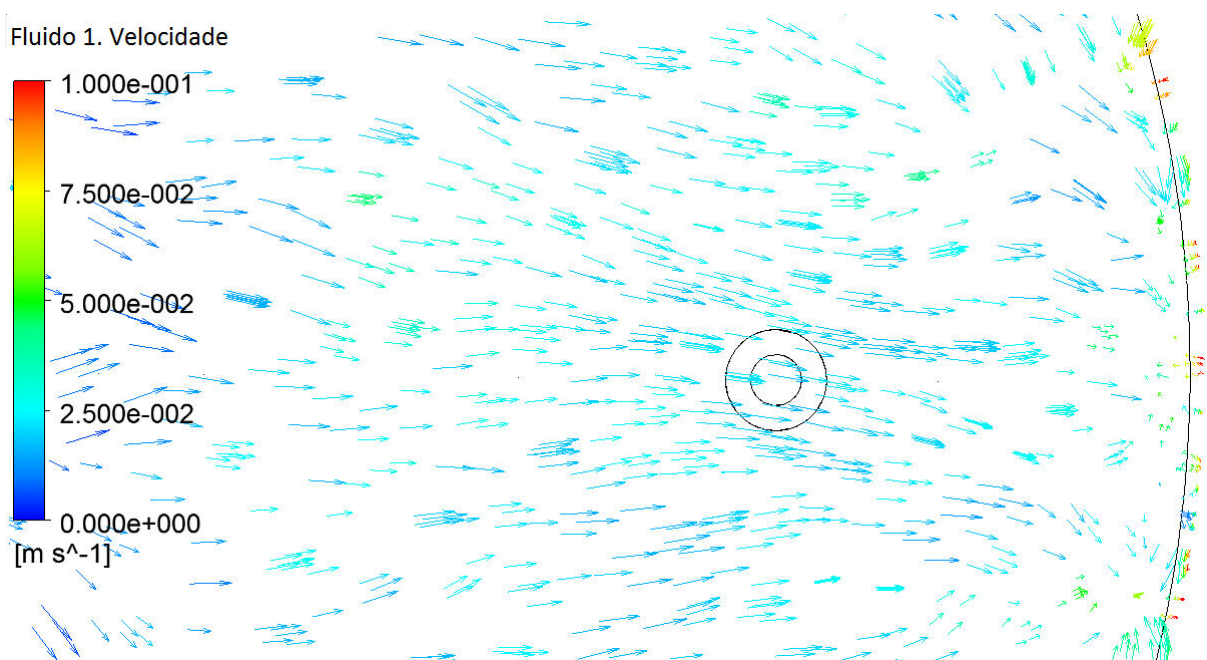


Figura 48 - Plano a 0,25m de altura e banho a 0,35m

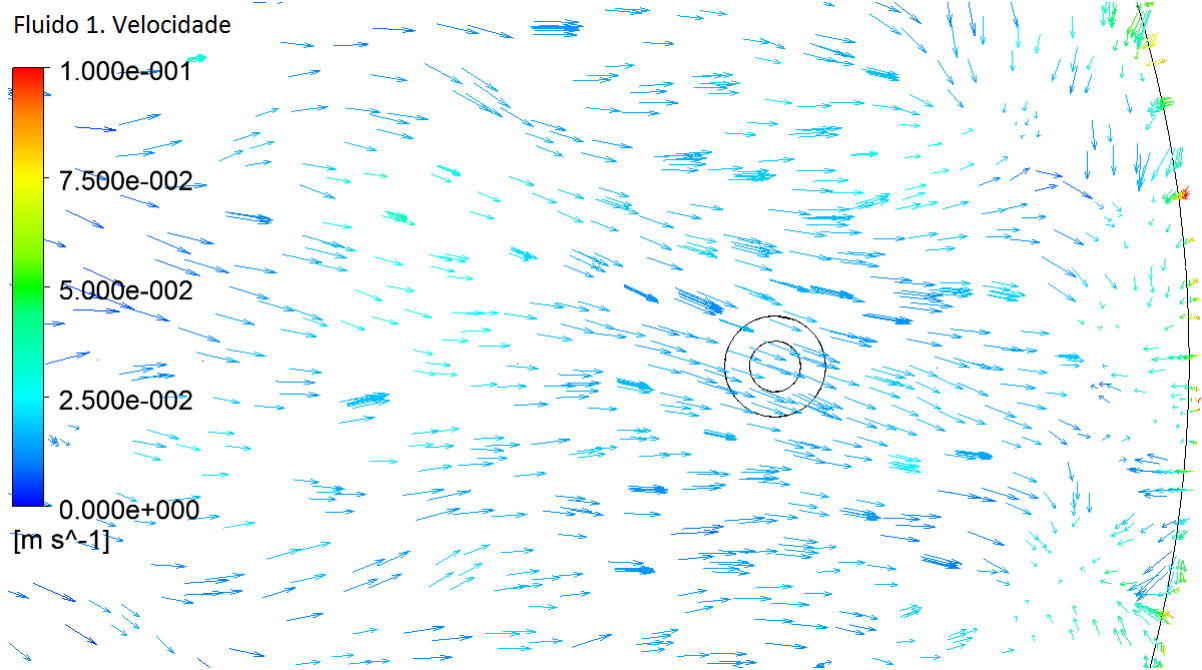


Figura 49 - Plano a 0,22m de altura /banho a 0,35m

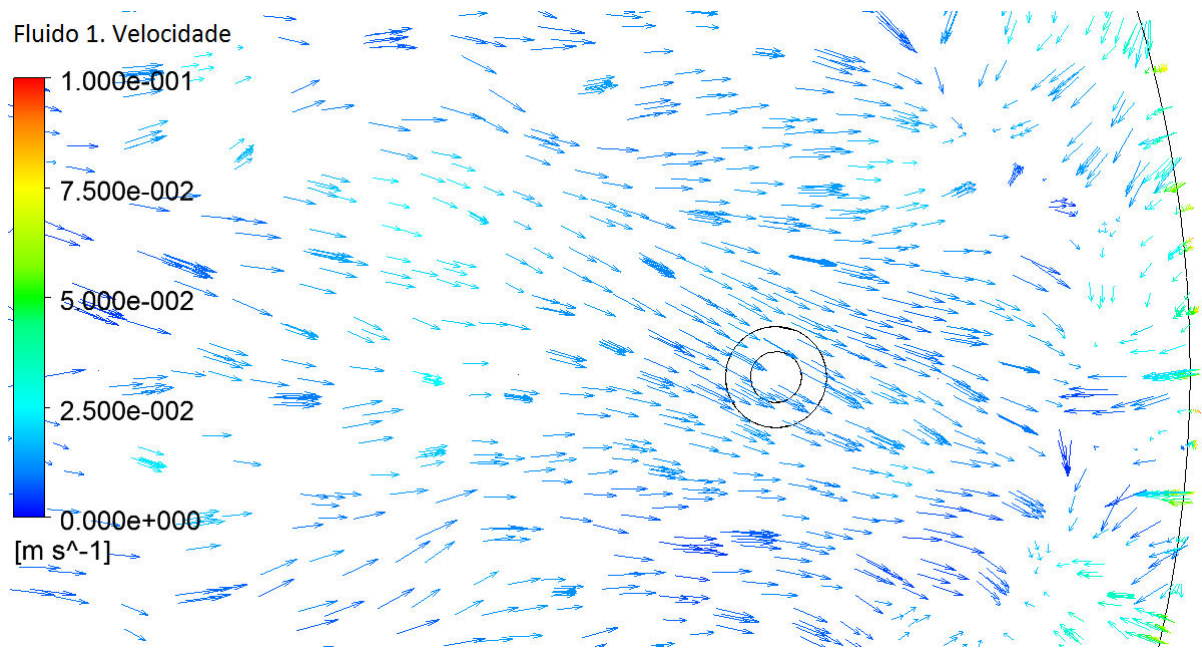


Figura 50 - Plano a 0,2m de altura /banho a 0,35m

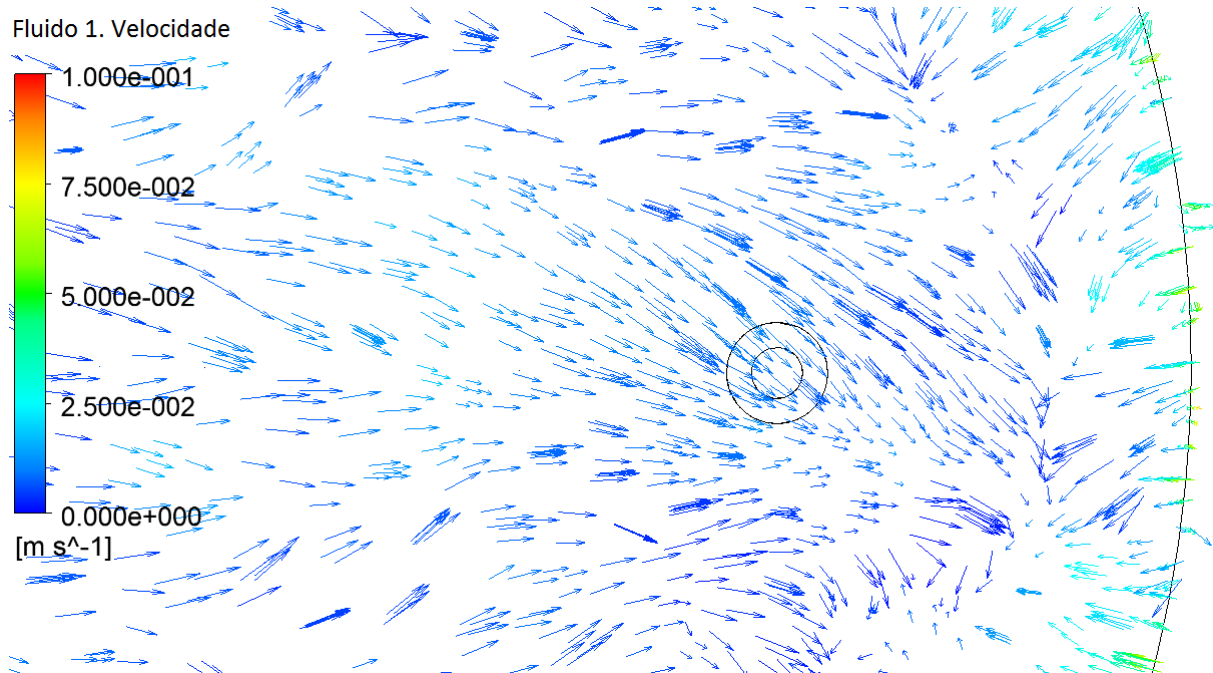


Figura 51 - Plano a 0,18m de altura /banho a 0,35m

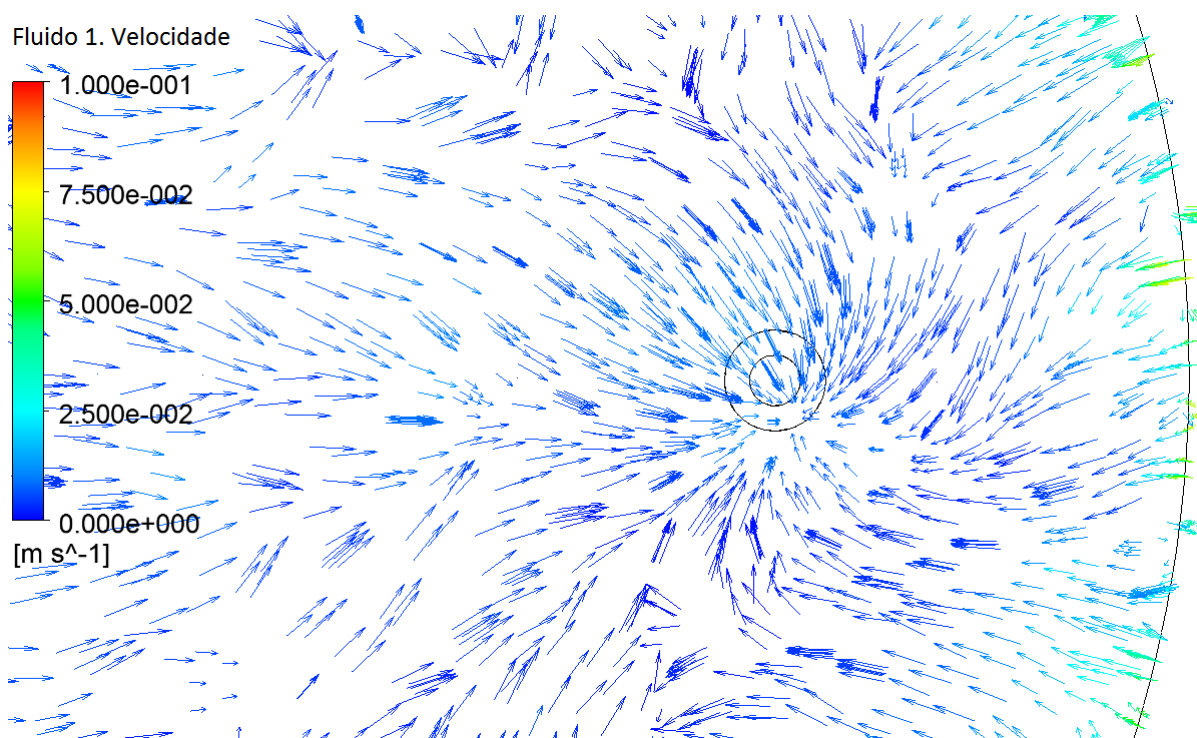


Figura 52 - Plano a 0,16m de altura /banho a 0,35m

Quando a interface metal/escória atinge a marca de 0,2 m do fundo da panela, pode-se verificar de forma mais nítida a formação do vórtice (Figura 53). Pode-se verificar também que não houve o colapso da interface metal/escória dentro da válvula de saída. Outra evidência que corrobora a hipótese da formação do vórtice é a clara concentração da escória

no centro do canal da válvula de saída. Um escoamento em rotação, por diferença de densidades, separaria os fluidos empurrando o fluido menos denso (escória) para o centro do vórtice.

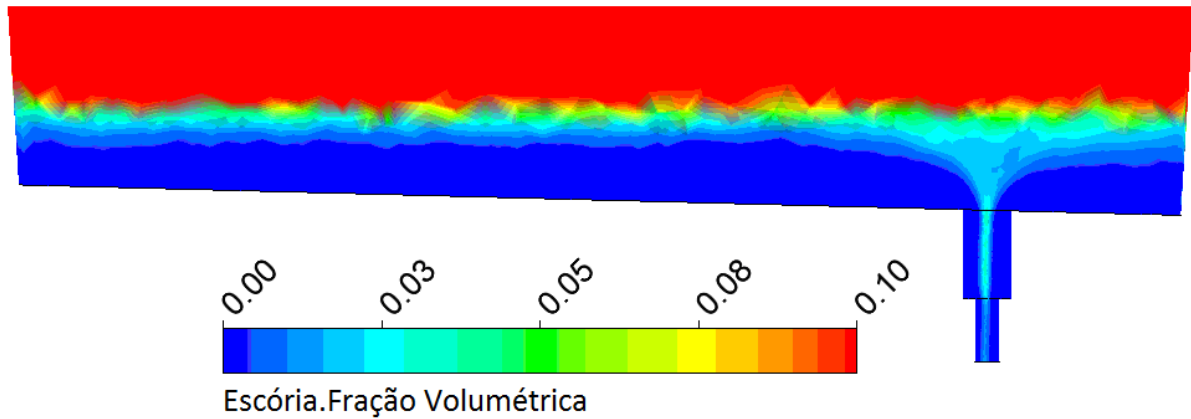


Figura 53 - Formação do vórtice. Interface metal/escória em 0,2 m do fundo da panela.

Como o propósito dessa análise era reproduzir os resultados obtidos por Davila et al. [2], a malha utilizada nessa fase foi construída reproduzindo as informações disponíveis na publicação. Para um resultado com uma resolução melhor, uma malha mais refinada e até mesmo uma malha hexaédrica deveria ser utilizada.

6 CONCLUSÕES

Foram estudadas duas metodologias distintas para se analisar o problema de passagem de escória da panela de aço para o distribuidor durante o processo do Lingotamento Contínuo. Ambas as metodologias foram verificadas. A execução do trabalho permitiu a investigação dos fenômenos envolvidos durante o processo de transferência do aço líquido da panela de aço para o distribuidor em diferentes condições.

Para o caso isotérmico, verificou-se que não há a formação de vórtice na panela e sim a formação de uma estrutura em forma de funil, denominada sorvedouro, que se forma logo acima da válvula de saída da panela de aço. Essa estrutura faz com que a interface metal/escória colapse dentro da válvula de saída assim que o escoamento para dentro da válvula não consiga mais fornecer toda a massa suportada por essa. Dessa forma a pressão estática na região da válvula se torna menor que a pressão estática na interface escória/aço líquido acima da válvula, colapsando a interface dentro do funil de drenagem e subsequentemente para o canal de saída. A simulação numérica do modelo em escala produziu um resultado em concordância com o observado em laboratório, indicando que as condições impostas ao modelo numérico foram adequadas. Os experimentos conduzidos em laboratório mostraram que o sorvedouro se formou quando a interface água/querosene chegou a 3 cm do fundo da panela. Esse comportamento foi reproduzido pela simulação numérica que também indicou a formação do sorvedouro para a mesma distância entre a interface água/querosene e o fundo da panela.

Para a análise do processo industrial, a perda térmica se torna um fator importante para o processo, faz-se necessário uma análise prévia da estratificação térmica da panela de aço, pois as correntes convectivas geradas nessa etapa serão as responsáveis pela indução de um escoamento rotacional em torno da válvula de saída gerando assim, ao final do vazamento um vórtice. Apesar de limitadas as informações para a reprodução dos resultados de Davila et al (2006) o modelo criado permitiu a visualização da formação do vórtice assim como reportado pelos autores. A simulação numérica mostrou o início da formação do vórtice quando a interface metal/escória atingiu a altura de 0,35 m do fundo da panela.

Como os produtores de aço utilizam painéis com diferentes configurações refratárias como fundos inclinados e dispositivos “anti-vórtices” para aumentar o rendimento e reduzir perdas no processo. A partir deste trabalho, será possível analisar esses fenômenos para diferentes geometrias de painéis de aço, satisfazendo assim o objetivo deste trabalho.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez estabelecida a metodologia para se analisar a passagem de escória da panela para o distribuidor, a mesma poderá ser aplicada de diferentes maneiras:

- a) analisando diferentes configurações de válvulas superiores em painéis de aço para retardar a formação de vórtices; e
 - b) analisando processos de vazamento similares em diferentes equipamentos da indústria siderúrgica e de outros tipos de indústrias que também lidam com escoamento de metal líquido em equipamentos revestidos com refratários.
-

REFERÊNCIAS

- [1] Kojola, N., Takagi, S., Yokoya, S., Jonsson, P.; “Prediction and Disarming of Drain Sink Formation during Unsteady-State Bottom Teeming”, *ISIJ International*, vol 49, 2009, pp 1-9
- [2] Davila, O., Morales, R.D., Garcia-Demedices, L.; “Mathematical Simulation of Fluid Dynamics During Steel Draining Operations from a Ladle”, *Metallurgical and Materials Transactions*, vol 37B, 2006, pp 71-87.
- [3] Chaudhary, R., Rietow, B. T., Thomas, B.G.; “Differences between Physical Water Models and Steel Continuous Casters: A Theoretical Evaluation”, *Materials Science and Technology*, October 2009, p. 1090-1101.
- [4] Moore, G.E. (1997). "The microprocessor: Engine of the technology revolution". *Communications of the ACM* 40 (2): 112
- [5] Steel University, Blast Furnace Simulation User Guide; 2013. disponível em <<http://www.steeluniversity.org/>>
- [6] Ohashi, N.; *Modern Steelmaking*, American Scientist, vol 80, 1992, pp 540-555.
- [7] Zhang, L.; *Basic oxygen furnace based steelmaking processes and cleanliness control at Baosteel*; *Ironmaking and Steelmaking*. Vol. 33, 2006, pp 129-139.
- [8] AISI, American Iron and Steel Institute. <<http://www.steel.org/>>; acessado em junho de 2014.
- [9] Key to Metals <<http://www.keytometals.com/Articles/Art62.htm>>; acessado em junho de 2014.
- [10] Jones, J., B. Bowman, B., Lefrank, P.; “Electric Furnace Steelmaking”; *Steel Making and Refining*. 1998. pp 525-660.
- [11] Christ, F. S.; *Melhorias no Aquecimento de Panelas de Aço de uma Aciaria Elétrica*, 2001, Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [12] Thomas, B.G., “Continuous Casting,” *The Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K.H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, (D. Apelian, subject ed.) Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 2001, pp. 1595-1599;
- [13] Green, J., Batchelor, J.; *The Manufacture of Steel*; 2008 disponível em: <<http://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8A.pdf>>
-

[14] Groover, M. P., Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed. 2010. pp 352-357.

[15] Moraes, S. L., Kawatra, S. K.; Avaliação do Uso de Combinações de Aglomerantes na Pelotização de Concentrado de Magnetita pela Tecnologia de Aglomeração em Tambor. 2011. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 3, p. 168-173.

[16] Viana Filho, O. A.; “Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em altos-fornos de alta produtividade. 2007. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[17] Isenmann, A.; O Processo do Alto Forno e a Produção de Aço; disponível em: <http://www.timoteo.cefetmg.br/site/sobre/cursos/quimica/repositorio/artigos/arq/Processo_d_o_Alto_Forno.pdf>; acessado em janeiro de 2014.

[18] Miller, T.W., Jimenez, J., Sharan, A., Goldstein, D.A.; Steelmaking and Refining Volume. 1998. pp 475-524.

[19] Stubbles, J.; The Basic Oxygen Steelmaking (BOS) Process. Disponível em: <<http://www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/The%20Basic%20Oxygen%20Steelmaking%20Process.aspx>>; acessado em setembro de 2014.

[20] Jones, J.A.T.; Electric Furnace Steelmaking; Disponível em: <<http://www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/Electric%20Arc%20Furnace%20Steelmaking.aspx?siteLocation=88e232e1-d52b-4048-9b8a-f687fbd5cdeb>> acessado em setembro de 2014.

[21] Dorcak, L., Terpak, J.; Monitoring and Prediction of the Liquid Steel Temperature in the Ladle and Tundish. METALURGIJA 45 (2006) 2, pp. 93-96.

[22] Hubble, D. H.; Russell, R. O.; Vernon, H. L.; Marr, R. J.; "Steelmaking Refractories" Steelmaking and Refining Volume. 1998. pp 227-290.

[23] Simmons, J.C; “Description and Operation of a Ladle Furnace”, Secondary Refining, disponível em: <<http://www.steel.org/>> ; acessado em setembro de 2014.

[24] Szekely, J. and Yadaya R.T.; Metallurgical Transactions, Vol. 3, Oct 1972, pp. 2673-2680.

[25] Kor, G. J. W., Glaws, P. C.; “Ladle Refining and Vacuum Degassing” Steelmaking and Refining Volume. 1998. pp 661-713.

[26] Mazzaferro, G.M., Piva, M., Ferro, S., Bissio, P., Iglesias, M., Calvo, A., Goldschimit, M.; “Experimental and numerical analysis of ladle teeming process”; Ironmaking and Steelmaking; 2004; vol 31 no 6;

[27] Ni, P.; “Numerical Study on Steel Flow and Inclusion Behavior during a Ladle teeming Process” 2013, Licentiate Thesis; Royal Institute of Technology; Stockholm; Sweden.

[28] Maliska, C.R.; Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Florianópolis; LTC; 2004.

[29] Kruger, M.; Desenvolvimento de um Procedimento Computacional para o Estudo do Escoamento no Interior de Distribuidores de Lingotamento Contínuo, 2010. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[30] Thomas, B. G. and F. M. Najjar, "Finite Element Modelling of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in Continuous Casting," Applied Mathematical Modeling, 15:5, 226-243, May 1991.

[31] Rodrigues, E., Marins, A., Solimani, M.; “Um estudo numérico e experimental do escoamento de aço durante o vazamento de uma panela de aciaria.” Revista Escola de Minas; jul. set. 2007; pp 557-563.

[32] Urquhart, R., Guthrie, R., Howat, D.; “Heat losses from ladles during teeming;” Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy; 1973; pp 132-139.

[33] Morales, R.D., Dávila-Maldonado, O., Calderón, I., Morales-Higa, K. “Physical and Mathematical Models of Vortex Flows During The Last Stages of Steel Draining Operations from a Ladle”, ISIJ International, Vol 53, 2013, pp 782-791.

[34] Szekely J, Themelis M.; Rate Phenomena in Process Metallurgy. New York; Wiley-Interscience; 1970.

[35] ANSYS Help; “Theory Guide // 2. Turbulence and Wall Function Theory // 2.2. Eddy Viscosity Turbulence Models // 2.2.2. Two Equation Turbulence Models”
