

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**IGOR TEIXEIRA DA COSTA
VINÍCIUS SCARDUA DELLACQUA**

**ANÁLISE TÉRMICA DO RESFRIAMENTO INTERNO DE UM ROLO
DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

**VITÓRIA
2014**

**IGOR TEIXEIRA DA COSTA
VINICIUS SCARDUA DELLACQUA**

**ANÁLISE TÉRMICA DO RESFRIAMENTO INTERNO DE UM ROLO
DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Projeto de graduação apresentado ao
Corpo Docente do Departamento de
Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Juan Sergio
Romero Saenz

**VITÓRIA
2014**

**IGOR TEIXEIRA DA COSTA
VINICIUS SCARDUA DELLACQUA**

**ANÁLISE TÉRMICA DO RESFRIAMENTO INTERNO DE UM ROLO
DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 12 de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Orientador

Eng. Dr. Rogério Silveira de Queiroz
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

Eng. Matheus Darós Pagani
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

DEDICATÓRIAS

Dedicamos esse trabalho à nossas famílias e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pela saúde e força para superar as dificuldades.

Aos nossos pais pelo apoio e torcida.

Aos irmãos pela cumplicidade.

Ao Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz, pela orientação, apoio e confiança.

Ao Eng. Amilcar Bosto Altoé e ao Eng. Reinaldo Arruda por contribuir na realização deste trabalho.

Aos amigos pelo auxílio na parte experimental deste projeto.

A empresa ArcelorMittal Tubarão pelo fornecimento do material estudado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte deste projeto.

RESUMO

Este trabalho destina-se como um guia para o engenheiro projetista e alunos que necessitem ter conhecimento ou referência sobre o processo de simulação da transferência de calor da água de resfriamento interno do rolo que compõe o segmento do lingotamento contínuo nas posições mais críticas da máquina, 11, 12, 13 e 14. Sabe-se que nessas posições o rolo sofre maior desgaste pois a placa já está praticamente solidificada. Como o resfriamento externo do rolo é reduzido, o rolo pode sofrer um desgaste prematuro, pois o seu revestimento tende a perder propriedades a partir de 400°C, e essa perda se torna significativa a partir de 520°C. Para a realização deste trabalho, foi utilizado o CFX-CFD Ansys, que é um software com alta confiabilidade.

Palavras-Chave: Resfriamento interno de um rolo. Simulação da transferência de calor. CFX-CFD Ansys. Lingotamento contínuo.

ABSTRACT

This work was made to guide a design engineering and students with the need of acknowledgment or reference about heat transfer simulation process of the internal cooling water of one of the rolls that makes up one segment in the critical area at the position 11, 12, 13 and 14. Knowing that in these positions, the roll suffers more wear than others do, because the slab has already solidify. As the roll cooling is reducing, the roll can suffer a premature wear because the cladding tends to lose its mechanical propriety from 400°C, and its significantly problem begin when it reach about 520°. To accomplishment of this paper was used the CFX-CFD Ansys, that is a software with a high reliability.

Keywords: Internal cooling of the roll. Heat transfer simulation. CFX-CFD Ansys. Continuous casting.

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Pág.
1	Análise comparativa dos principais tipos de máquinas de lingotamento contínuo	17
2	Definições das variáveis Ψ , J e f para as equações de conservação de massa e Energia Térmica	29
3	Valores das dimensões mostradas nos desenhos	44
4	Condições de contorno do domínio fluido	47
5	Condições de contorno do domínio fonte de calor	47
6	Condições de contorno do domínio rolo	47
7	Condições de contorno do domínio tubo	47
8	Condições iniciais do domínio fluido	47
9	Condições iniciais do domínio fonte de calor	47
10	Condições iniciais do domínio rolo	48
11	Condições iniciais do domínio tubo	48
12	Comparação da temperatura experimental com a aproximada pela simulação	49

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
1	Representação esquemática das formas e dimensões típicas da seção transversal dos produtos do processo de lingotamento contínuo de aços.....	15
2	Representação esquemática dos tipos de máquinas de lingotamento contínuo de placas, tarugos e blocos de aço	16
3	Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo moderna	18
4	Montagem dos rolos bipartidos no segmento	21
5	Representação dos rolos inteiriços (1), bipartido (2a), tri-apoiado (2b) e tetra-apoiado (2c)	22
6	Representação dos tipos de rolos, de cima para baixo: Furo Central, Periférico ou Revolver e por último o Espiral.....	23
7	Representação do rolo de furo central com o tubo interno.....	24
8	Junta rotativa da CARBOFOR	24
9	Transferência de Calor unidimensional por condução	28
10	Perfil de Velocidade	32
11	Volume de Controle	34
12	Método de malhas não estruturadas centrada na célula (a) e centrada no vértice (b)	36
13	Relações dos programas do CFD	37
14	Fluxograma mostrando o funcionamento do CFX – Solver	40
15	Dimensões do desenho pelo plano YZ	42
16	Dimensão do diâmetro do rolo	43
17	Dimensões da área da fonte de calor	43
18	Dimensões da espessura do tubo e do furo de entrada.....	44

19	Malha vista do plano XY	45
20	Malha vista do plano YZ ampliada na entrada do fluido	45
21	Malha vista do plano YZ ampliada no final do tubo.....	46
22	Malha do rolo na visão ISO	46
23	Medição da temperatura da simulação no ponto inferior vista do plano YZ	50
24	Medição da temperatura da simulação no ponto inferior vista do plano XY	50
25	Medição da temperatura da simulação no ponto inferior na visão ISO	51
26	Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão vista do plano YZ	51
27	Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão vista do plano XY	52
28	Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão na visão ISO	52
29	Distribuição da temperatura no rolo.....	53
30	Distribuição da temperatura no rolo ampliada próximo a fonte de calor	53
31	Distribuição da temperatura na superfície do rolo	54
32	Distribuição da temperatura na superfície do rolo com aumento de 50% da vazão	55
33	Distribuição da temperatura na superfície do rolo com aumento de 300% da vazão	56
34	Gráfico da comparação das temperaturas superiores do rolo no projeto atual com o das novas propostas.....	57

LISTA DE VARIÁVEIS

ρ – Densidade da Água

$\vec{V}$ – Velocidade do Fluido

u – Velocidade do Fluido no Eixo X

v – Velocidade do Fluido no Eixo Y

w – Velocidade do Fluido no Eixo Z

$\vec{g}$ – Aceleração da Gravidade

P – Pressão

μ – Viscosidade do Fluido

∇ – Fator Gradiente

T – Temperatura

L – Comprimento de X, Y ou Z

k – Condutividade Térmica

q'' – Fluxo de Calor

$\dot{q}$ – Taxa de Calor

A – Área

Ψ, J e f – Variáveis da Tabela 2

E_i – Energia Interna

q'''' – Fluxo de Energia Liberada

W – Trabalho

Q – Soma do fluxo de calor

Φ – Dissipação Viscosa

C_p – Calor Específico do Fluido

ε – Emissividade Térmica

σ – Constante de Stefan-Boltzmann

Re – Número de Reynolds

D_h – Diâmetro do tubo

SUMÁRIO

Título	Pág.
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	14
1.2 Lingotamento Contínuo	14
1.2.1 Segmento.....	19
1.2.1.1 Tipos de Rolos	22
1.2.1.2 Resfriamento Interno	22
1.2.1.3 Revestimento do Rolo	25
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	26
2.1 Equação de Navier-Stokes	26
2.2 Condução	27
2.3 Formas Genéricas das Equações de Transporte	29
2.4 Radiação	31
2.5 Escoamento Interno	32
2.6 Método dos Volumes Finitos	32
2.7 Ansys – Computational Fluid Dynamics (CFD)	36
2.7.1 Estrutura de CFX.....	37
2.7.1.1 Gerador de Malha	38
2.7.1.2 CFX - PRE	38
2.7.1.3 CFX Solver Manager	38
2.7.1.4 CFX Solver	39
2.7.1.5 CFX Post	40

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS.....	42
3.1 Geometria	42
3.2 Malha	44
3.3 Condições de Contorno	47
3.4 Condições Iniciais	47
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 Validação da Simulação	49
4.2 Resultado	53
CAPÍTULO 5 – NOVOS RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS	55
5.1 Proposta	55
5.1.1 Aumento de 50% da vazão de entrada	55
5.1.2 Aumento de 300% da vazão de entrada	56
5.1.3 Comparação	57
5.2 Trabalhos Futuros	57
CAPÍTULO 6 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	58

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a troca térmica da água de resfriamento interno de um rolo de furo central (Fig. 7) da máquina de lingotamento contínuo de número 2 da ArcelorMittal Tubarão. Para tal fim, foi feita uma simulação de troca térmica com a utilização do software Ansys e levando-se em consideração a situação mais crítica da máquina (baixa velocidade de lingotamento, bico de spray obstruído, temperatura crítica da placa na posição que mais sofre com o desgaste, 11-14, juntamente com as configurações desse rolo).

Dentro dessa análise térmica do rolo, será analisado também o desgaste prematuro que ocorre no mesmo rolo juntamente com a sua causa.

1.2- LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento Contínuo de aços ainda era um desafio devido as altas temperaturas envolvidas no processo (acima de 1570° no geral) e a reduzida condutibilidade térmica, quando comparado por exemplo ao alumínio. O conceito básico do lingotamento contínuo, como o conhecemos hoje, com molde resfriado a água, resfriamento secundário, barra-falsa, roletes de empuxo e dispositivo de corte (serão explicados posteriormente), já havia sido apresentado em 1887, na Alemanha, por Rainer M. Daelen para o lingotamento contínuo do aço. Porém, diversos problemas ocorreram devido ao agarramento da camada solidificada no molde. Durante muitos anos, grande número de pesquisadores dedicou-se a desenvolver a técnica de vazamento e entre 1930 à 1940, Siegfried Jungnhans, na Alemanha, conseguiu lingotar continuamente, de início um latão e alumínio, e depois o próprio aço. O grande lance foi um sistema de oscilação no molde evitando que a pele solidificada do aço ficasse agarrada no molde, isso fez com que o processo de produção fosse em alta escala. A primeira máquina industrial começou a operar em 1946 na Inglaterra para produção de tarugos numa máquina tipo vertical. A primeira máquina, também do tipo vertical, para placa operou na Rússia em 1951.

No Brasil o processo de lingotamento contínuo foi introduzido pela Siderúrgica Riograndense em 1960, com uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos de

dois veios. O lingotamento contínuo de placas foi iniciado no Brasil em 1976 na empresa USIMINAS.

Existem diversas formas e dimensões da seção transversal de produtos típicos do processo de lingotamento contínuo de aços (Figura 1), como placa, tarugo, bloco e etc.

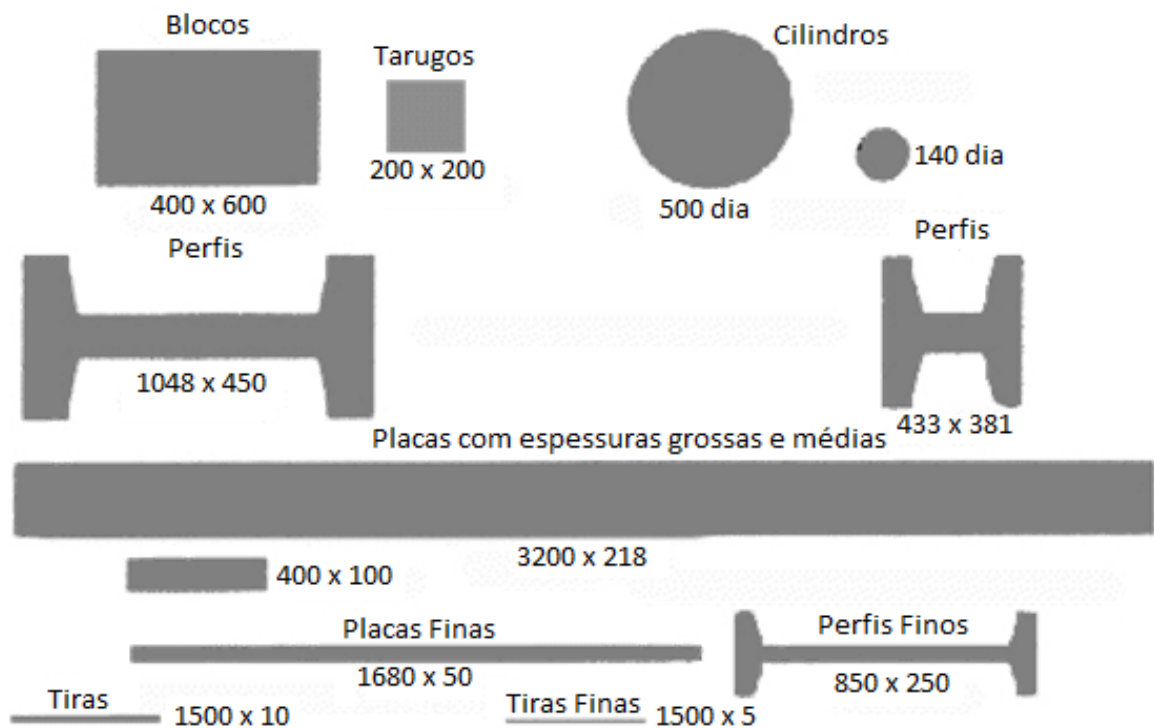


Figura 1 – Representação esquemática das formas e dimensões típicas da seção transversal dos produtos do processo de lingotamento contínuo de aços.

Os principais tipos de máquinas de lingotamento contínuo de aço são (Figura 2):

- Reto – Vertical.
- Reto – Vertical/Curvo. Com ponto simples de dobramento e retificação do veio e corte na horizontal.
- Curvo – com raio de dobramento variável, isto é, com retificação progressiva do veio.

OBS: As Vantagens e Desvantagens dos 3 tipos está relacionada na tabela 1.

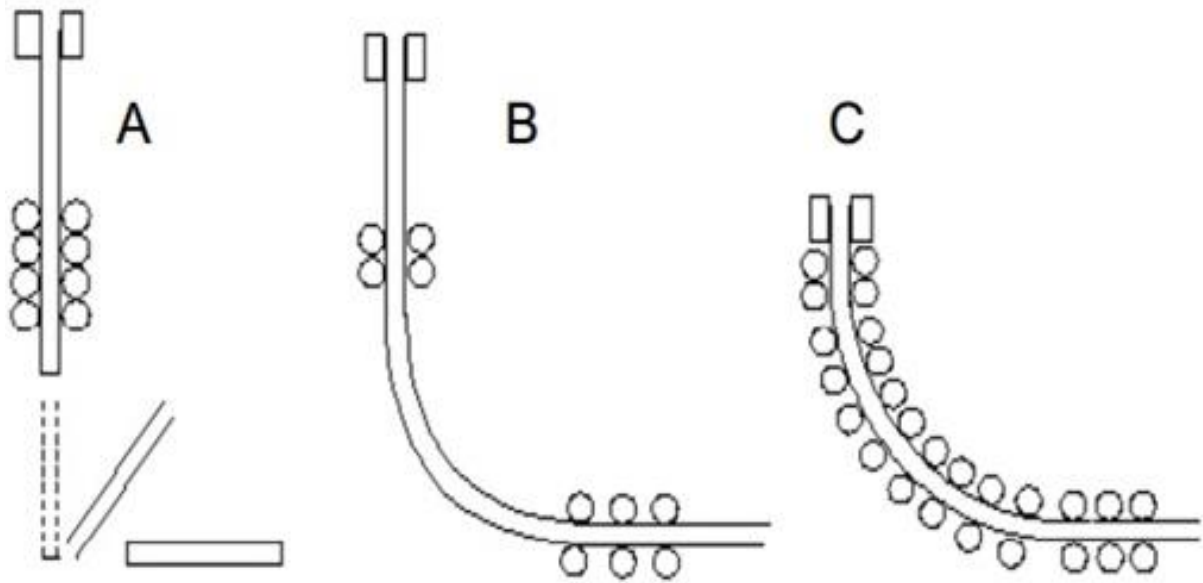


Figura 2: Representação esquemática dos tipos de máquinas de lingotamento contínuo de placas, tarugos e blocos de aço.

Tabela 1 – Análise comparativa dos principais tipos de máquinas de lingotamento contínuo.

Tipos:	Vantagens:	Desvantagens:	Comentário
A	• Não há deformação de encurvamento e desencurvamento. • Facilidade para remover inclusões em suspensão.	• Elevada pressão ferrostática. • Altura elevada de instalação da máquina. • Grande risco de abaulamento de placa entre rolos. • Velocidade de lingotamento limitada.	Este sistema foi utilizado no início e abandonado devido as desvantagens utilizadas.
B	• Em relação ao molde curvo (C), possui maior facilidade para flutuar incrustações.	• Grande raio de curvatura.	Este sistema é bom para a placa e é o mais utilizado atualmente
C	• Baixa altura de instalação. • Baixa pressão ferrostática, redução da possibilidade de rompimento de pele.	• Maior tendência de aprisionar inclusões se comparado às máquinas de molde reto. • Possibilita maior vazamento de selagem devido a curvatura do molde.	• Projeto ainda em uso porém pouco aplicado nos novos projetos.

Basicamente, uma instalação de lingotamento contínuo é constituída de:

- a) Um distribuidor localizado abaixo da panela e acima do molde para alimentar os veios ou o veio numa vazão controlada por uma válvula submersa.
- b) O molde de cobre eletrolítico, resfriado a água, para formação da pele de solidificação inicial, com espessura suficiente para resistir a pressão ferrostática do metal líquido.
- c) A zona de resfriamento secundário, por meio de jatos de água, através de sprays localizados entre os rolos de um segmento, para complementar a solidificação.
- d) Rolos extratores, com velocidade regulável, para movimentação do esboço produzido, além dos rolos (segmentos) de suporte do esboço.
- e) Dispositivo para o corte das placas (tarugos, blocos ou barras e o transporte das peças cortadas.



Figura 3 – Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo moderna.

O lingotamento contínuo compreende as seguintes etapas:

- a) A inserção de uma barra falsa no molde para prevenir o vazamento de metal líquido pelo fundo do molde no início do vazamento.
- b) O vazamento do metal líquido da panela para um distribuidor até que uma altura pré-determinada seja atingida, quando então abre-se uma válvula do distribuidor (Válvula Submersa).
- c) O metal líquido escoar por um tubo refratário (válvula gaveta), alimentando o molde de cobre refrigerado a água.
- d) Transferência de calor no sentido do molde, que promove a solidificação do metal e a formação de uma camada (pele) sólida e para a barra falsa solidificar rapidamente o metal em contato com a mesma.
- e) Movimentação para extração contínua do esboço (semiacabado em processo de fabricação) combinado com movimentos oscilatórios de molde e uso de um lubrificante que evita o agarramento da pele nas placas de cobre.
- f) Com o progressivo deslocamento da casca sólida formada, puxada pelo movimento de extração da máquina, sua espessura aumenta.
- g) Resfriamento do esboço para remoção do calor do núcleo ainda líquido, por meio de chuveiros de água (com ou sem mistura com ar).

- h) Corte no comprimento desejado e remoção do esboço.
- i) Quando a barra falsa passa pela região horizontal da máquina, a mesma é desconectada do esboço, removida da máquina e estocada.
- j) Alimentação contínua de metal líquido no molde, na mesma vazão da extração do esboço da máquina.

O processo de lingotamento contínuo apresenta várias vantagens em relação ao processo convencional, entre elas, podemos citar:

- a) Aumento substancial no rendimento de metal na transformação do metal líquido em produtos semiacabados.
- b) Extinção de diversos equipamentos e etapas do processo de obtenção de semiacabados como por exemplo: lingoteiras, cabeças quentes, pontes, estripadores, etc.
- c) Eliminação dos fornos-poço e laminadores desbastadores de lingotes.
- d) Melhoria da qualidade interna do aço, como resultado de uma maior velocidade de solidificação do que no caso de lingotes produzidos no lingotamento convencional.
- e) Melhoria da qualidade superficial do semi-produto, eliminando as escamas e dobras, conseqüentes do vazamento e laminação primária.

1.2.1- SEGMENTO

Os segmentos são constituídos de vários rolos pela qual possuem papel fundamental na qualidade final da placa. Além de contribuírem no resfriamento secundário (junto com spray que se localizam entre os rolos), que é um resfriamento progressivo e controlado, serve de suporte para conter a força ferrostática exercida no veio e mantendo a sua forma, são eles que tracionam, guiam (de forma suave) e garantem a superfície da placa como plana.

Os rolos, que são montados nos segmentos, podem sofrer variação de diâmetro e posição na montagem de acordo com a posição do segmentos na máquina. Os segmentos superiores (mais próximos do molde) possuem rolos com diâmetros menores (menos robustos) para que sejam montados com menores espaçamentos, evitando o efeito *bulding*. À medida que os segmentos descem em direção à saída

da máquina há um aumento da força peso e também um aumento da pressão ferrostática (força exercida pela coluna de aço no sentido da superfície do veio) a ser suportada pelo veio, portanto os diâmetros dos respectivos rolos aumenta até que chegue na parte horizontal da máquina. Como a pele aumenta a espessura e resistência, não sofrerá o efeito *bulding* nessa região.

Os rolos são refrigerados internamente para que não se deformem quando em contato com o veio (temperatura varia entre 1000 e 1300°C de acordo com a velocidade de lingotamento que varia entre 0 até 1,7m/min (há máquina que sua velocidade de lingotamento pode atingir 3m/min). A velocidade depende do tipo de material e tende a reduzir até o limite especificado se houver algum problema na solidificação da placa).

Os rolos são fixados por mancais na estrutura ou carcaça do segmento e ajustados conforme o projeto da máquina.

OBS: Os segmentos possuem também um cilindro hidráulico que permitem o movimento de abrir ou de fechar, para permitir a produção de espessuras diferentes na mesma máquina e também facilitar a manutenção do equipamento (entrada do homem dentro da máquina para efetuar checagem de rotina).

Durante a produção de aço, com o tempo os rolos fixados nos segmentos vão perdendo o ajuste. As máquinas de lingotamento contínuo geralmente possuem uma parte curva, onde cada conjunto de segmentos são montados. Há a necessidade da precisão de montagem que encontra-se na ordem de mais ou menos 0,5mm (pode variar de acordo com o projeto) em relação ao raio da máquina. Outra medida importante é a distância entre o rolo inferior e o superior do segmento (mais ou menos 0,5mm de tolerância) chamado de espaçamento, esta medida representa a espessura da placa que deve ser rigorosamente ajustada para que também não traga danos a qualidade do produto, sendo necessário constantes checagem e ajustes na máquina.

Os rolos existentes na máquina de lingotamento contínuo passaram também por um processo de evolução ao longo do tempo, deixando de ser inteiriço para serem bipartidos, onde os rolos são de pequenos comprimentos suportados por mancais em sua parte central. A vantagem desta nova concepção de rolos foi permitir que

fosse reduzido o abaulamento da face larga da placa, produzindo assim placas com melhor qualidade interna e também superficial.

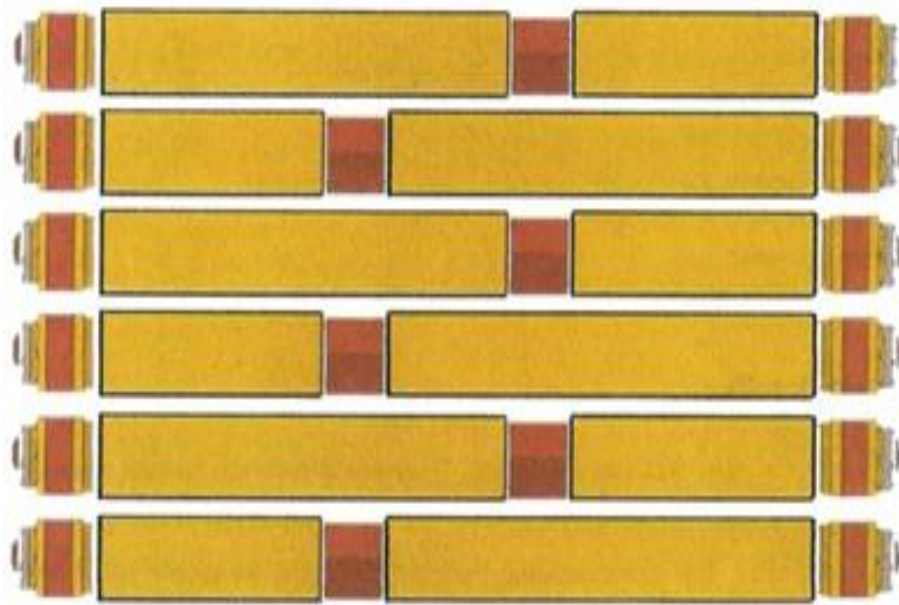


Figura 4 – Montagem dos rolos bipartidos no segmento.

As máquinas de lingotamento contínuo possuem curvas em sua configuração, podendo variar o tamanho da curva e, como no caso atual, começar reta e se tornar curva. O fato é que o veio quando em processo de solidificação passa por momentos em que se tornam curvos. Como nos processos seguintes ao lingotamento contínuo não conseguem trabalhar com placas curvas, torna-se necessário o seu desencurvamento. Isto é feito por determinados rolos na máquina que estão ajustados segundo uma cota que faz a correção do veio de curvo para reto, tornando-a assim uma peça reta, antes de ser cortada em pequenas partes. Estes pontos de endireitamento do veio, muita das vezes podem ajustar na deterioração da qualidade superficial da placa devido ao grande esforço a que o veio é submetido. Por causa disso, as máquinas mais modernas são dotadas de vários rolos com esta finalidade, o que torna esta operação mais amena e segura sem causar danos a qualidade.

1.2.1.1- TIPOS DE ROLOS

Conforme citado anteriormente, existem os rolos inteiriços (1), e os rolos partidos: bipartidos (2a), tripartidos (2b) e tetra-partido (2c).

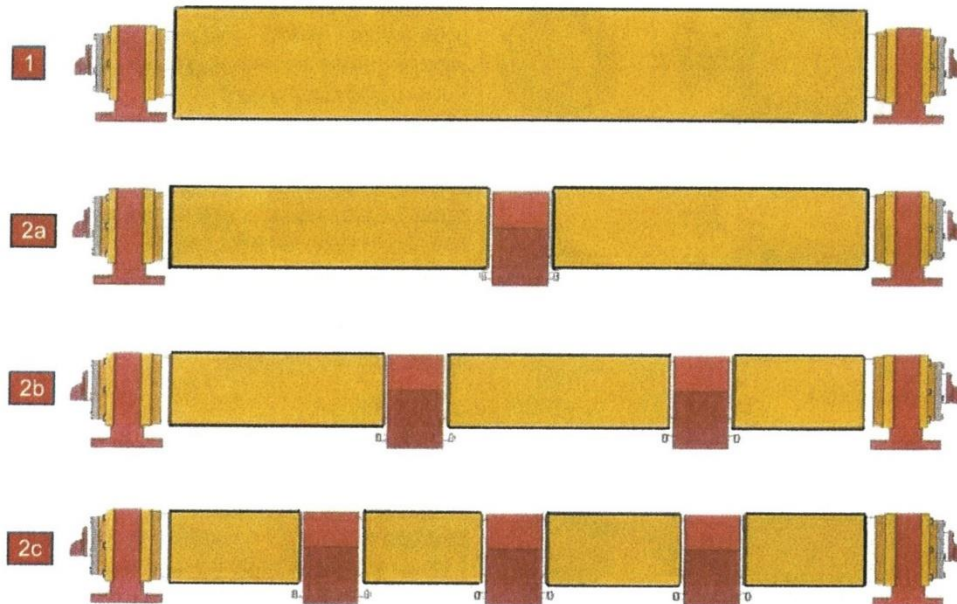


Figura 5 – Representação dos rolos inteiriços (1), bipartido (2a), tri-apoiado (2b) e tetra-apoiado (2c).

Cada segmento existem entre 1 e 2 rolos motrizes que são acionados para tracionarem a placa. Esses rolos são geralmente inteiriços e possuem um dos lados apoiados num mancal e o outro numa redutora. Os rolos acionados são chamados de rolos motrizes, enquanto que o outros rolos são chamados de rolos livres ou não motrizes.

1.2.1.2- RESFRIAMENTO INTERNO

O resfriamento interno consiste no principal resfriamento do rolo, que pode também receber um auxílio externo do resfriamento secundário da Máquina de Lingotamento Contínuo que são os Sprays. A insuficiência desse resfriamento pode resultar numa redução das propriedades do revestimento do rolo (que tem a finalidade de aumentar a resistência mecânica do rolo) caso a temperatura superficial ultrapasse os 400°C. Essa perda de dureza do revestimento acarreta na falha por desgaste

premature do rolo. Devido a tal fim, é essencial um bom funcionamento do resfriamento interno.

O tipo de resfriamento interno é classificado quanto ao furo que é feito no rolo, podendo ser de furo central, periférico/revolver (Fabricação e manutenção complexa e de alto custo) e espiral (Geralmente usado em máquinas cuja troca de calor com a placa não emprega o sistema de resfriamento por Spray). Há também rolos maciços que possuem apenas o resfriamento externo (através de um spray direcionado apenas para o rolo ao invés da placa), porém esse tipo não é muito utilizado.

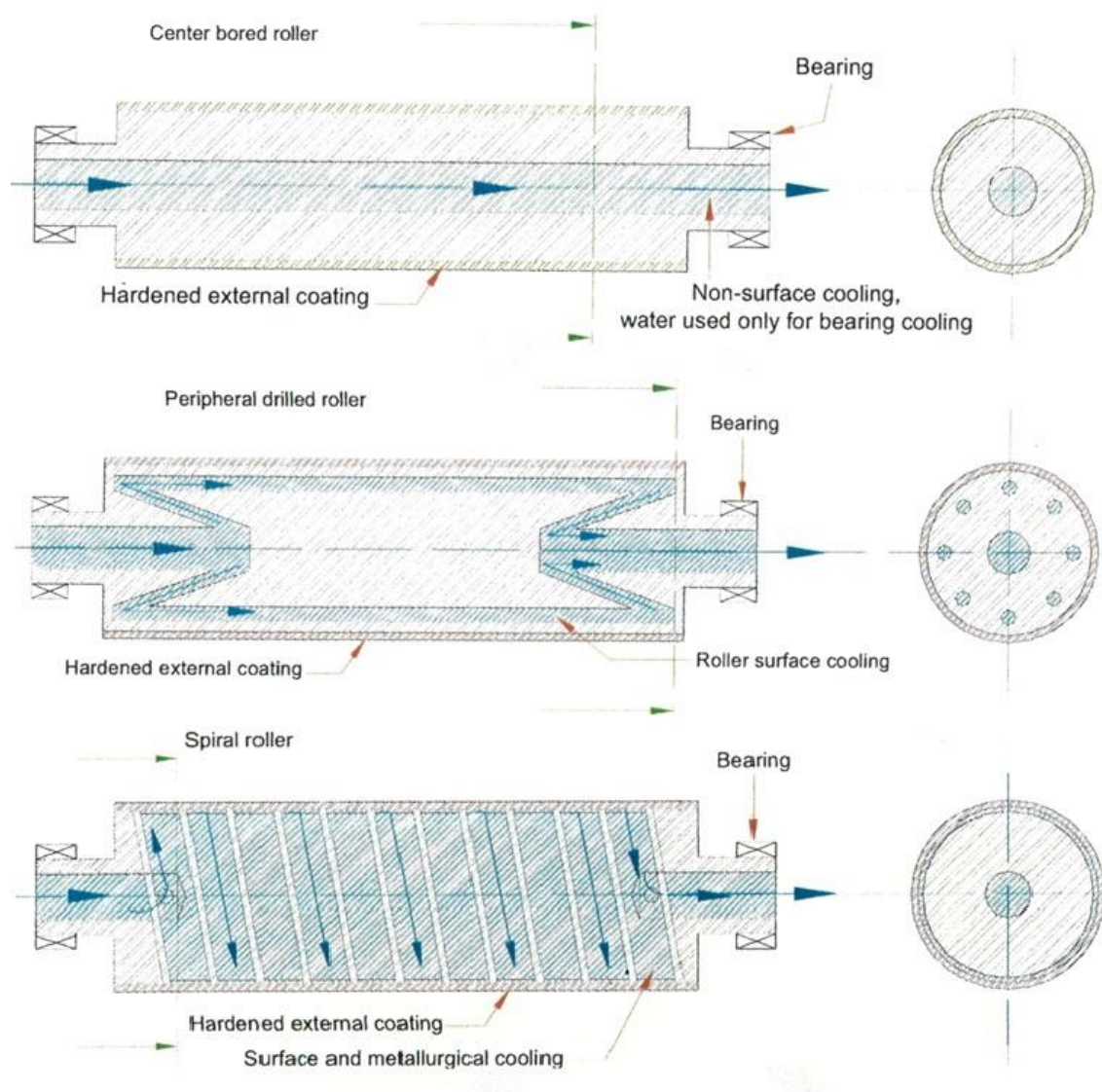


Figura 6 – Representação tipos de rolos, de cima pra baixo: Furo Central, Periférico ou Revolver e por último o Espiral.

Rolo de Furo Central:

O rolo de furo central é simples e o mais primitivo entre os tipos de rolos e em geral não resfria o rolo como um todo. É muito utilizado devido, além da simplicidade e o baixo custo de fabricação, a simplicidade de manutenção do canal. Baseado na figura 7, ele possui um furo central e dentro desse furo entra um tubo de aço inox conectado à uma junta rotativa (essa junta também é utilizada nos outros tipos de rolos), esse sistema permite a rotação do rolo sem prejudicar a injeção de água. A água entra pela junta rotativa por uma conexão passando por dentro do tubo e saindo pelo espaço externo do tubo e interno ao furo, sendo retirados pela outra conexão da junta rotativa. A figura 8 ilustra o trajeto da água pela junta rotativa (em azul é o caminho de entrada da água na junta e no tubo, e em vermelho ilustra o caminho de saída da mesma).

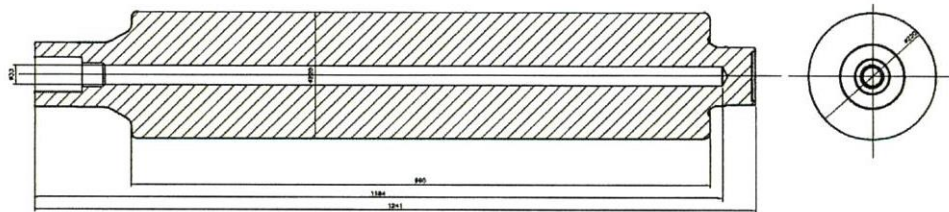


Figura 7 – Representação do rolo de furo central com o tubo interno.

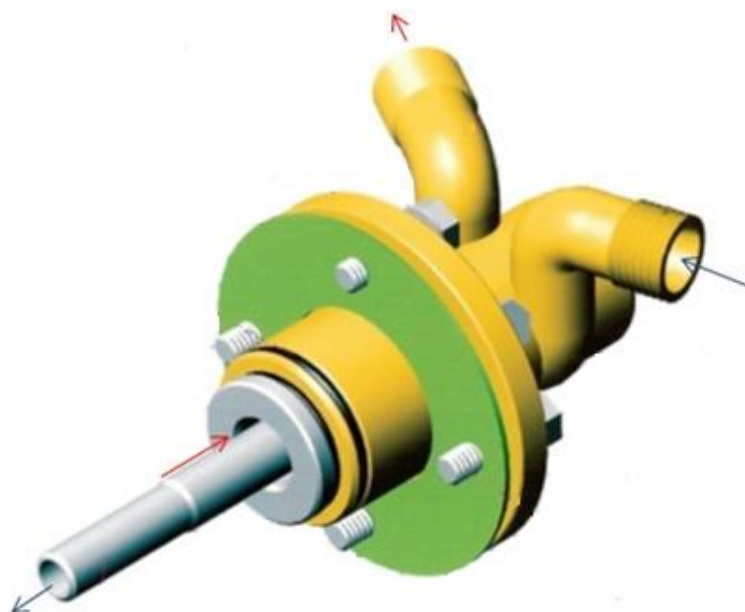


Figura 8 – Junta Rotativa da CARBOFOR.

1.2.1.3- REVESTIMENTO DO ROLO

O revestimento do rolo desempenha um papel fundamental no processo de lingotamento contínuo. Ele protege o rolo com uma melhoria das propriedades mecânicas, como a resistência ao desgaste, garantindo que não haja alteração na geometria do rolo.

O revestimento utilizado na máquina de lingotamento contínuo 2 da ArcelorMittal Tubarão é o TUBRODUR 412N, que é um arame tubular tipo “metal cored” que deposita aço inox martensítico através do processo de soldagem à arco submerso. Esse aço contém 12% de Cromo estabilizado ao Nitrogênio. A adição de Nitrogênio e o menor teor de Carbono no metal de solda resulta na formação de nitretos associados ao Cromo e numa diminuição de carbonetos associados no contorno de grão promovendo maiores resistência à fadiga térmica, tenacidade e resistência a corrosão.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1- EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos Newtonianos. São derivadas parciais que permitem determinar os campos de velocidade e pressão num escoamento. Esta equação estabelece que as mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluída são simplesmente o produto (resultado) das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas na pressão e forças dissipativas (similar a fricção) atuando dentro do fluído. Essa força viscosa se origina na interação molecular e atua como cirro para o fluído.

Considerações:

- Massa Específica Constante (Fluído incompressível)
- Viscosidade Constante

Equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (1)$$

Equação de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

Sendo “u” a velocidade no eixo X, “v” a velocidade no eixo Y e “w” a velocidade no eixo Z, “μ” a viscosidade dinâmica do fluído, “ρ” a densidade, “P” é a pressão e “g” é a gravidade.

2.2- CONDUÇÃO

A condução de calor por condução ocorre dentro de um meio sólido devido ao gradiente de temperatura, definido como positivo no sentido de maior para a menor temperatura de acordo com a Lei de Fourier.

$$q'' = -k\nabla T = -k\left(i\frac{\partial T}{\partial x} + j\frac{\partial T}{\partial y} + k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3)$$

Onde ∇ é o operado gradiente tridimensional e $T(x,y,z)$ é o campo escalar da temperatura. O fluxo térmico pode ser decomposto em componentes de tal forma que para coordenadas cartesianas a expressão geral é dada por:

$$q'' = iq''_x + jq''_y + kq''_z \quad (4)$$

O fluxo térmico, q''_x , em (W/m²) é a taxa de transferência de calor em uma direção, neste caso o “x”, por unidade de área perpendicular à direção da transferência e ele é proporcional ao gradiente de temperatura, $\partial T/\partial x$, nesta direção. O parâmetro k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica (W/m*K) e é uma característica do material de parede. O sinal de menos é uma consequência do fato do calor ser transferido na direção da temperatura decrescente nas condições de estado estacionário, mostrado na figura 14, com a distribuição linear.

O gradiente de temperatura pode ser aproximado como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (5)$$

Logo a equação do fluxo de calor será:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (6)$$

Sendo k a condutividade térmica do material, x a direção do fluxo, T_1 a temperatura do lado emissor e T_2 a temperatura do lado receptor e L o comprimento.

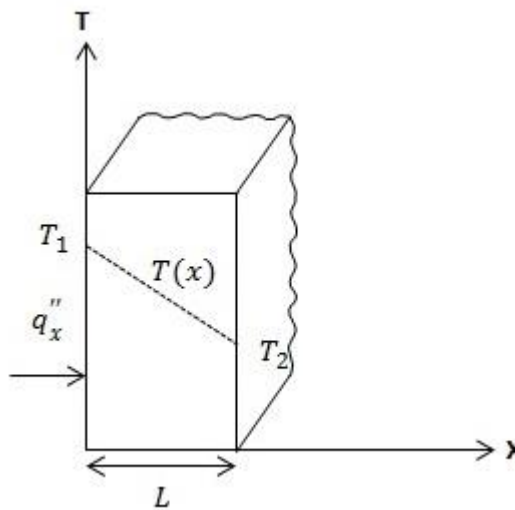


Figura 9 – Transferência de Calor unidimensional por condução

Note que a equação fornece um fluxo térmico, isto é, a taxa de transferência de calor por unidade de área.

A taxa de transferência de calor por condução, q_s (w), através de uma parede plana com área “A”, é, então, o produto do fluxo e da área:

$$q_s = q_s'' A \quad (7)$$

A lei de Fourier é a pedra fundamental da transferência de calor por condução e suas características principais são definidas a seguir. Ela não é uma expressão que possa ser derivada a partir de princípios fundamentais. Ela é uma expressão que define uma importante propriedade dos materiais, a condutividade térmica (k). Além disso, a Lei de Fourier é uma expressão vetorial indicando que o fluxo térmico é

normal a isoterma e no sentido da diminuição das temperaturas e finalmente nota-se que a Lei de Fourier se aplica a toda matéria, independente do seu estado físico (sólido, líquido ou gás).

A lei de Fourier é uma relação constitutiva que nos relaciona o fluxo de calor cedido ou absorvido por um corpo com o campo de temperatura do corpo.

2.3- FORMA GENÉRICA DAS EQUAÇÕES DE TRANSPORTE

O movimento das partículas em um meio continuamente deformável é representado por meio das equações que descrevem, matematicamente, a conservação de uma grandeza, por exemplo: massa, momento, energia, etc. Estas equações de conservação, também conhecidas como equações de transporte, estão genericamente representadas na sua forma diferencial na Eq. (8):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\psi) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\psi) = \nabla \cdot \vec{J} + f \quad (8)$$

Sendo as variáveis Ψ , J e f dados obtidos pela tabela abaixo:

Tabela 2 – Definições das variáveis Ψ , J e f para as equações de conservação de massa e Energia Térmica.

Variável	Ψ	J	F
Massa	1	0	0
Energia Interna	E_i	$\vec{q}_k$	$\vec{T} \cdot \nabla \vec{V} + q'''$

Conservação da Massa:

Consideremos um volume de controle V , fixo no espaço, simplesmente conexo, através do qual um fluido com densidade ρ escoar, sendo v o campo de velocidades do escoamento.

Com base na equação (9) e na tabela 2, temos a equação da conservação de massa, que é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (9)$$

Dissipação Viscosa (Φ):

O termo de dissipação viscosa, para fluidos Newtonianos, é sempre positivo porque ele pode ser expresso pela soma de um quadrado de. Isto implica em dizer que para todos os escoamentos existe uma degradação de energia mecânica (cinética, pressão ou potencial) em energia térmica. Isto é fluidos viscosos degradam energia mecânica de maneira irreversível.

$$\phi = T : \nabla \vec{V} \quad (10)$$

Equação da Energia Térmica

A equação de transporte de energia térmica é obtida a partir da primeira lei da termodinâmica:

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{sist} = Q - W \quad (11)$$

Essa equação estabelece que a variação de energia E para um sistema é igual à soma dos fluxos de calor e trabalho que cruzam a fronteira do sistema. Na formulação da primeira lei, segue-se a conversão de sinal: o calor recebido e o trabalho exercido pelo sistema são positivos por sua vez, o calor rejeitado e o trabalho recebido pelo sistema são negativos. Entende-se por trabalho qualquer transformação cujo efeito final possa ser representado pela elevação de um peso (Reynolds, 1977).

Para o caso de lingotamento contínuo em estudo, pode-se fazer as seguintes considerações:

- O trabalho realizado pelo sistema é nulo

- A taxa de energia térmica liberada por unidade de volume é zero (não ocorre reações químicas).
- A variação da energia cinética é pequena ou nula.
- Material homogêneo e isotrópico.

Portanto, tomando-se como base a equação (9) e a Tabela 2, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E_i + \nabla \rho \vec{V} E_i = \nabla(\vec{q}_k) + T : \nabla \vec{V} \quad (12)$$

Onde ρ é a densidade, E_i é a energia interna, $\vec{q}_k$ é o fluxo pela equação de Fourier. E sabendo que $E_i = C_p T$ e que $T : \nabla \vec{V} = \Phi$ temos então:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla T \cdot \vec{V}_i = k \nabla^2 T + \Phi \quad (13)$$

Sendo $\vec{V}$ a velocidade e T a temperatura.

2.4- RADIAÇÃO

A radiação térmica é a energia transmitida pela matéria que se encontra em uma superfície não nula. Ela pode ser emitida tanto por gás, líquido e sólido (mais comumente estudado). E pode-se calcular o fluxo térmico de radiação (q'' em W/m²), equação 10, e a taxa de transferência de calor por radiação (q em W) pela equação 11.

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (14)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), ε é a propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), essa propriedade depende fortemente do material da superfície e do seu acabamento, T_s

é a temperatura de superfície do material e T_{viz} é a temperatura da vizinhança que pode ser as paredes de uma sala ou um forno. Vale lembrar que $T_s \neq T_{viz}$. Por fim, temos a área da superfície dada por A e o coeficiente de transferência de calor por radiação, h .

2.5- ESCOAMENTO INTERNO

Em um escoamento interno, longe da região de entrada, observa-se que o escoamento não representa variações na sua própria direção, e a pressão varia linearmente ao longo do escoamento. O escoamento é considerado como hidrodinamicamente desenvolvido.

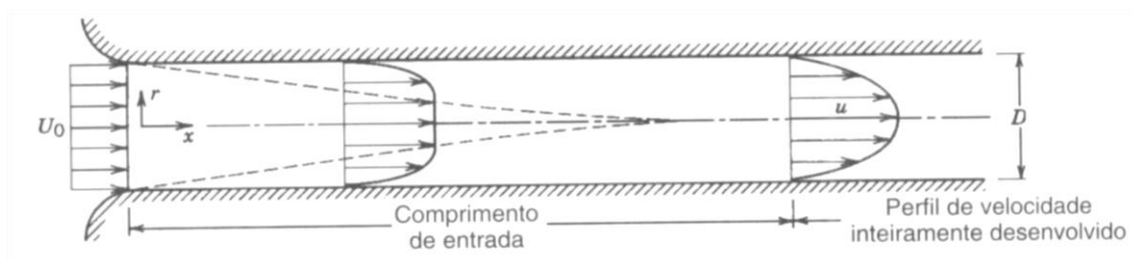


Figura 10 – Perfil de Velocidade

Sendo u_m a velocidade média e D_h o diâmetro hidráulico. O número de Reynolds que caracteriza a transição neste caso é:

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \begin{cases} Re \leq 2300 \rightarrow \text{Laminar} \\ Re > 2300 \rightarrow \text{Turbulento} \end{cases} \quad (15)$$

2.6- MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O propósito de qualquer prática de discretização é transformar uma ou mais equações diferenciais parciais em sistemas correspondentes de equações algébricas. A solução desse sistema produz um conjunto de valores no qual correspondem à solução aproximada da equação original em algum local pré-determinado no espaço ou no tempo, providenciados certas condições sendo

definidas posteriormente de forma a ser satisfeitas. O processo de discretização pode ser dividido em duas partes: A discretização do domínio de soluções e das equações.

A discretização do domínio da solução produz uma descrição numérica do domínio computacional, incluindo a posição dos pontos no qual a solução é solicitada e as descrições do contorno. O espaço é dividido em números finitos de regiões discretizadas, chamadas volumes de controle ou células. Para simulações transiente, o intervalo de tempo é também dividido em números finitos de passo-tempo. A equação discretizada nos dá a transformação apropriada dos termos das equações governantes na expressão algébrica.

Segue abaixo as propriedades do método de Volume Finito de discretização:

- O método é baseado na discretização da forma integral das equações governantes sobre cada volume de controle. A grandeza física, como a massa e o momento será posteriormente conservada no nível discreto.
- Equações serão resolvidas em sistemas de coordenadas cartesianas fixas na malha que não varia no tempo. O método é aplicado tanto aos estado estável quando aos cálculos transientes.
- O volume de controle pode ser em geral na forma poliédrica, com um variável número de vizinhos, criando assim uma malha arbitrariamente não estruturada. Toda variável dependente compartilha o mesmo volume de controle, no qual é usualmente chamado de variável escalonada ou não escalonada
- O sistema de equações diferenciais parciais são tratadas numa forma segregada (Pantakar e Spalding, [107], van Doormaal e Raithby, [137], significando que eles são resolvidos um de cada vez, com o acoplamento inter-equação tratada na forma explícita. Equações diferenciais não lineares são linearizado antes da discretização e os termos não lineares são defasados.

Discretização do domínio de soluções:

Discretização do domínio de soluções produz uma malha computacional no qual as equações governantes são subsequentemente resolvidas. Isso também

determina as posições dos pontos no espaço e tempo onde as soluções são procuradas. O procedimento pode ser dividido em duas partes: Discretização do tempo e do espaço.

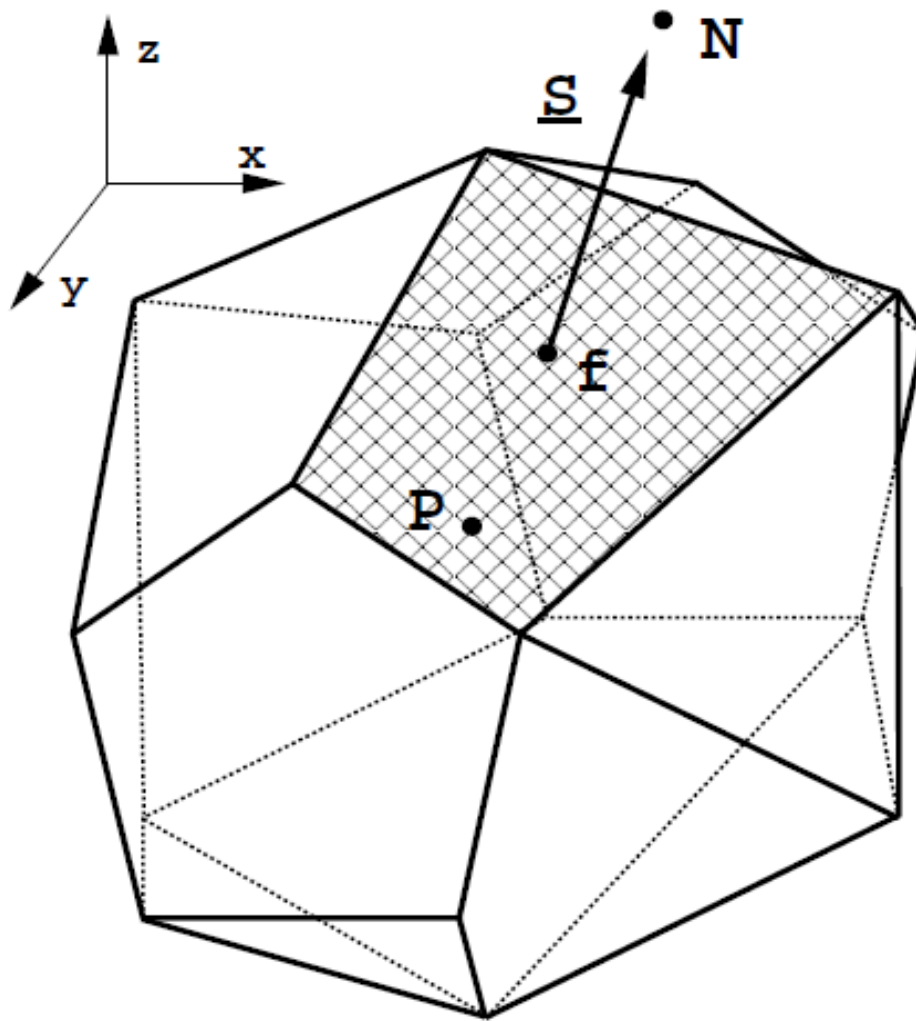


Figura 11: Volume de Controle

Como o tempo é uma coordenada parabólica (Patankar, 105), a solução é obtida por percorrendo no tempo a partir da condição inicial fixada. Para a discretização do tempo, isso é suficiente para prescrever o tamanho do passo-tempo que será usado durante o cálculo.

Um típico volume de controle, mostrado na figura 12. O ponto computacional P é localizado no centroide do volume de controle, de tal modo que:

$$\int_{V_p} (x - x_p) dV = 0 \quad (16)$$

O volume de controle é limitado por um conjunto de faces achatadas e cada face é compartilhada com apenas um vizinho no Volume de Controle. A topologia do Volume de Controle não é importante (ele é em geral poliédrico).

A face da célula na malha pode ser dividido em dois grupos – Faces internas (entre dois volumes de controles) e faces de contorno, na qual coincide com os contornos do domínio. O vetor área da face S_f é construído para cada face de tal maneira que ele aponta para o exterior da célula com o rótulo inferior, é normal para a face e tem a magnitude igual à área da face. A célula com o rótulo inferior é chamada de face própria – seu rótulo é armazenado numa matriz própria. O rótulo de outra célula (vizinha) é armazenada numa matriz vizinha. Faces de fronteiras são reconhecidas por células adjacentes. Para uma face modelada (Figura 12), a célula centrais proprietária ou as vizinhas são marcadas com P e N , como o vetor face área S_f aponta para o exterior a partir do Volume de Controle P . Para simplificar, todas as faces do Volume de Controle serão marcadas com f , que também representa o ponto médio da face.

A capacidade da prática de discretização para lidar com o Volume de Controle arbitrário dá uma liberdade considerável na geração da malha. Ela é particularmente útil nas configurações geométricas complexas da malha no espaço tridimensional. Malhas não estruturadas arbitrária também interagem bem com o conceito de grades locais refinadas, onde os pontos computacionais são adicionados em partes no domínio onde a alta resolução é necessária, sem perturbar o restante da malha.

Malha não estruturada:

A grade não estruturada são na maioria, uma forma geral de arranjos de grade para geometrias mais complexas. Existem duas formas de definir um volume de controle em malhas não estruturadas:

- i) Método centrado na célula
- ii) Método centrado no vértice

Esses dois métodos são ilustrados na Figura 12 para um problema em 2D.

No primeiro caso (i) os nós são alocados no centroide do volume de controle, como mostrado na figura 13.a. No segundo caso (ii) os nós são alocados nos vértices da grade. Esse é seguido por um processo já conhecido como “median-dual tessellation”, pelo que subvolumes são formados juntando centroides de elementos e pontos médios das arestas, como ilustrado na Figura 13.b.

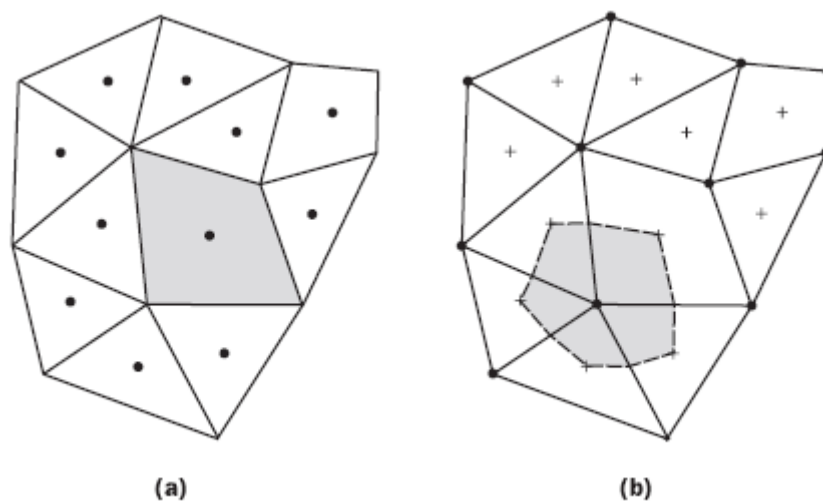


Figura 12: Método de malhas não estruturadas centrada na célula (a) e centrada no vértice (b).

Os subvolumes ao redor de um nó, em seguida, formando o volume de controle para discretização. Ambas os métodos (i e ii) são usados na prática. Porém o primeiro método (i) é mais fácil de entender e desde que um volume de controle sempre tenha mais vértices do que seu centroides, ele possui ligeiramente menos exigência de armazenamento que o segundo método (ii).

2.7- ANSYS – COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) ou Computational Fluid Dynamics CFD é a análise do sistema envolvendo vazão do fluido, troca de calor e associado ao

fenômeno como uma reação química por meio de simulação baseado em computadores. A técnica é muito poderosa e abrange um amplo range em áreas de aplicações industriais e não industriais.

Se tratando de projetos do sistema fluido, o CFD apresenta muitas vantagens em relação a outros softwares, como:

- Redução substancial dos prazos de entrega e custos de novos projetos.
- Habilidade de estudar sistemas onde experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de serem realizadas.
- Habilidade de estudar sistemas sobre condições perigosas além dos seus limites normais de performance, como nos equipamentos do Lingotamento Contínuo.
- Possui um nível ilimitado de detalhes dos resultados.

2.7.1- A ESTRUTURA DO CFX

O CFX é constituído de cinco módulos os quais são unidos pelo fluxo de informação necessário para se realizar uma análise de CFD. A Figura 14 mostra estes módulos e como eles se relacionam. Nas seções que seguem são descritas as funções de cada um dos módulos sendo dada uma especial atenção ao módulo solver.

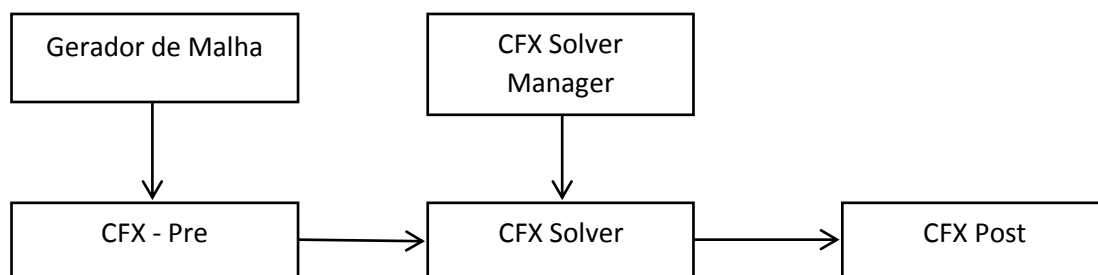


Figura 13 – Relações dos programas do CFD.

2.7.1.1- GERADOR DE MALHA

O software de geração de malha utilizado foi o ICEM CFD 4.0. Este gerador de malha faz a geração de malhas tridimensionais tetraédricas a partir de um algoritmo denominado de “Abordagem Octree”. Este algoritmo permite o refinamento da malha onde necessário, mas mantém elementos maiores onde for possível para uma computação mais rápida.

2.7.1.2- CFX-PRE

Neste módulo são definidas todas as condições físicas e matemáticas do problema em estudo, tais como, tipo de escoamento, regime, fluido em estudo, condições de contorno, valores iniciais, parâmetros do solver tais como resíduo máximo permitido para a convergência, número máximo de iterações para convergência, tipo de funções de interpolação dos termos advectivos, dentre outros.

O CFX-Pre pode importar arquivos de malha produzidos por vários softwares de geração de malha tais como o ICEM-CFD, Ansys, I-DEAS e até mesmo geradores de malha não comerciais, desde que seja feita uma rotina em linguagem C para que o módulo possa reconhecer o padrão de armazenamento dos nós da malha.

2.7.1.3- CFX SOLVER MANAGER

CFX Solver Manager é um módulo de gerenciamento da solução do problema de CFD em questão. Suas principais funções são:

- Especificar os arquivos de entrada (advindos do CFX-Pre) para o CFX-Solver;
- Especificar a precisão das variáveis de entrada e saída (se precisão simples, default do programa, ou dupla)
- Iniciar/Parar o CFX-Solver;
- Acompanhar o progresso (comportamento dos resíduos normalizados passo-a-passo) da solução;

- Arbitrar os parâmetros para que o CFX-Solver trabalhe com processamento em paralelo (mais de um processador em uma mesma máquina ou diversas máquinas em uma mesma rede).

2.7.1.4- CFX SOLVER

Para um problema especificado dentro do CFX- Pre, o CFX- Solver calcula todas as variáveis para a simulação. Uma das mais importantes características do CFX-5 Solver é o uso de um “Solver Acoplado”, no qual as equações hidrodinâmicas são resolvidas como um sistema único. O Solver Acoplado é mais rápido que um solver segregado e menos iterações são necessárias para se obter uma solução convergida do fluxo.

O fluxograma da Figura 15 ilustra o procedimento geral de solução. A solução de cada conjunto de equações mostrados no fluxograma consiste de duas operações:

1. As equações não lineares são linearizadas (iteração sobre os coeficientes) e montadas na matriz de solução.
2. As equações lineares são resolvidas (iteração de solução da equação) usando um Método de Multigrid Algébrico.

A iteração no passo de tempo é controlada pelo passo de tempo físico (global) ou por um fator local ajustado para avançar a solução no tempo para uma simulação em regime permanente. Neste caso há apenas uma iteração de linearização dos coeficientes por passo de tempo. Para análises transientes, o usuário controla as iterações de passo de tempo e de coeficientes.

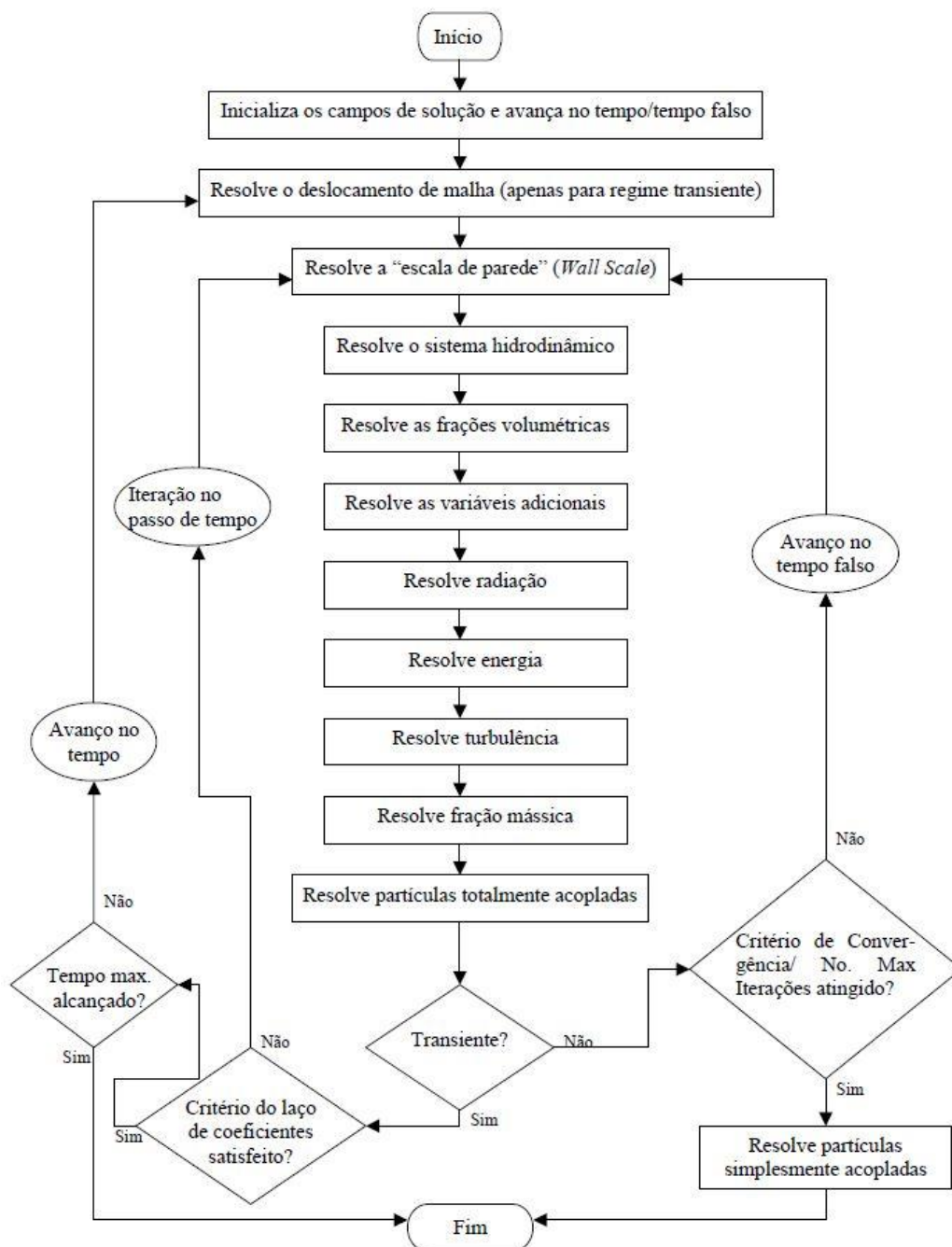


Figura 14 – Fluxograma mostrando o funcionamento do CFX – Solver

2.7.1.5- CFXPOST

CFX Post é provido de ferramentas iterativas para o pós-processamento gráfico da solução das simulações incluindo:

- Pós-processamento quantitativo;

- Variáveis definidas pelo usuário;
- Geração de uma grande variedade de objetos gráficos nos quais a visibilidade, transparência, cor e tipo de renderização das faces podem ser controlados pelo usuário;
- “Power Syntax” permite arquivos de sessão de pós-processamento totalmente programáveis.

CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS.

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos adotados para realizar a simulação e obter os resultados finais.

3.1- GEOMETRIA

O desenho da geometria foi feita de acordo com o desenho B-46-20-MX-08208 revisão 6 cedido pela ArcelorMittal Tubarão.

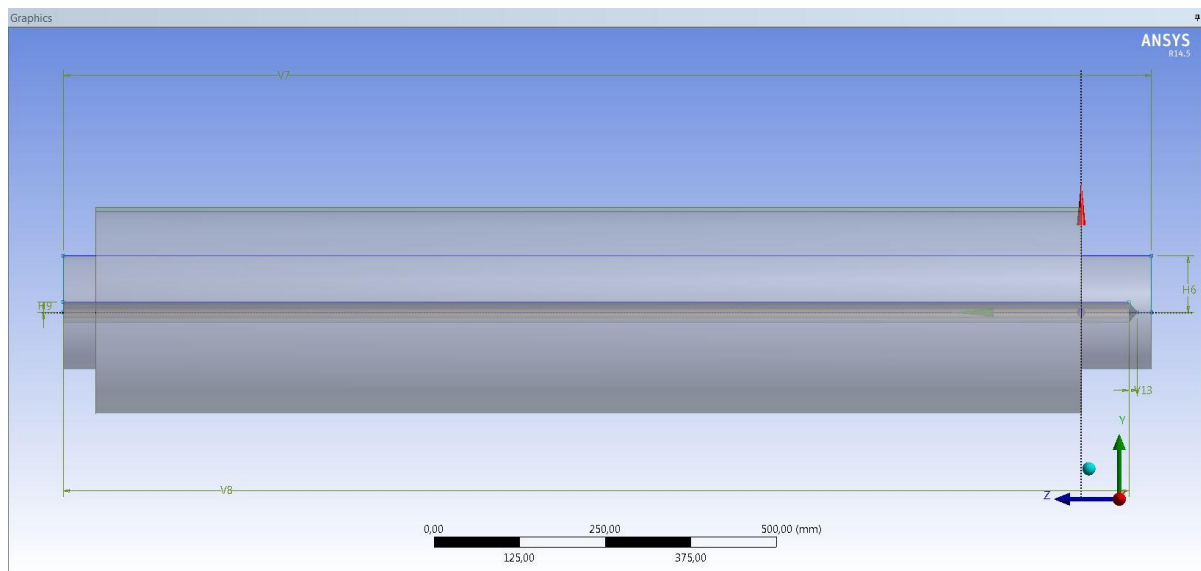


Figura 15 – Dimensões do desenho pelo plano YZ.

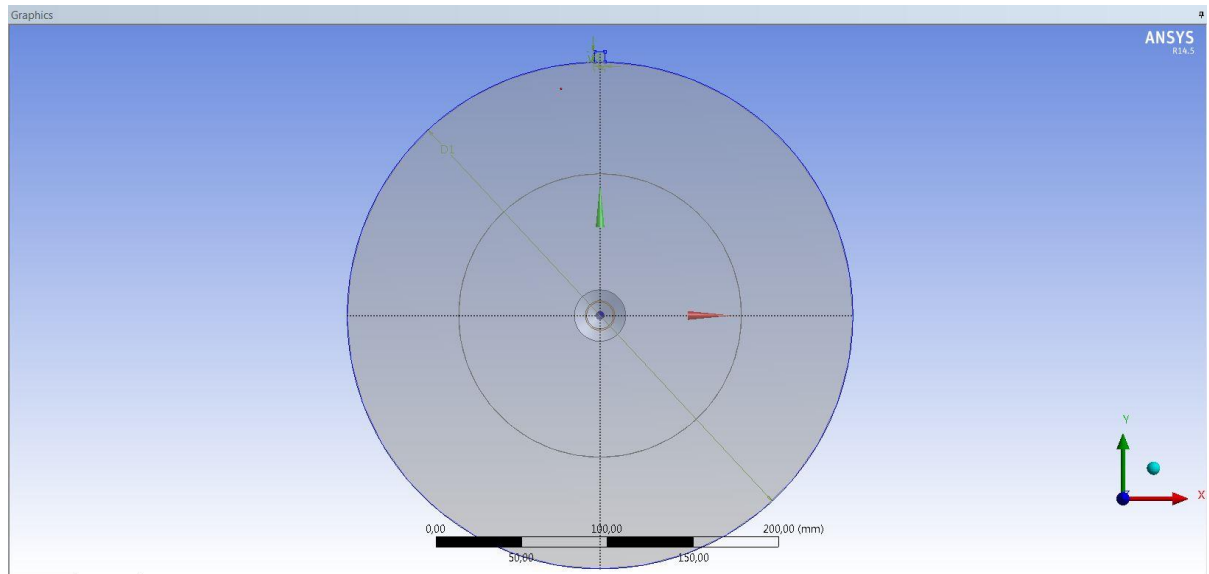


Figura 16 – Dimensão do diâmetro do rolo.

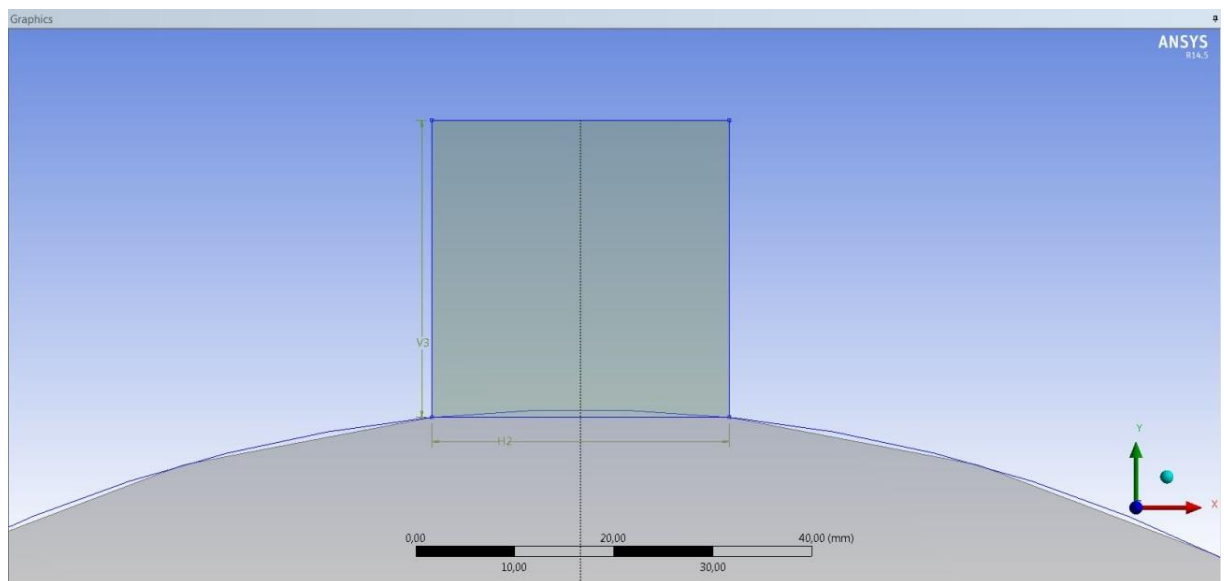


Figura 17 – Dimensões da área de troca de calor.

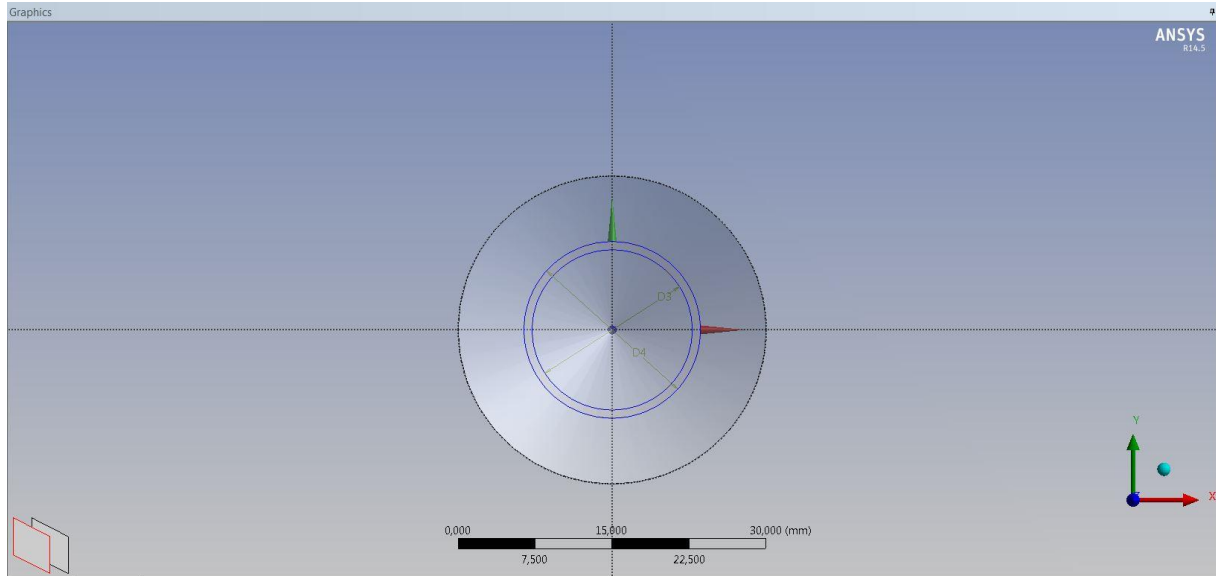


Figura 18 – Dimensão da espessura do tubo e do furo de entrada.

A tabela a seguir irá apresentar o valor das dimensões mostradas nos desenhos acima.

Tabela 3 – Valores das dimensões mostradas nos desenhos.

Dimensão	Valor
D1	295 mm
D3	15,6 mm
D4	17,2 mm
H2	30 mm
H6	82,5 mm
H9	15 mm
V3	30 mm
V7	1588 mm
V8	1555 mm
V13	12,5 mm

3.2- MALHA

O software de geração de malha utilizado foi o ICEM CFD. Este gerador de malha faz a geração de malhas tridimensionais tetraédricas a partir de um algoritmo denominado de “Abordagem Octree”. Este algoritmo permite o refinamento da malha onde é necessário, mas mantém em elementos maiores onde for possível para uma computação mais rápida.

Foi realizado um refinamento maior nas áreas de contato entre a área da fonte de calor e o rolo, e nos contatos do domínio do fluido com o tubo injetor de água, pois nessas áreas acontece a troca de calor entre os corpos e devem ser refinadas para obter resultados mais precisos.

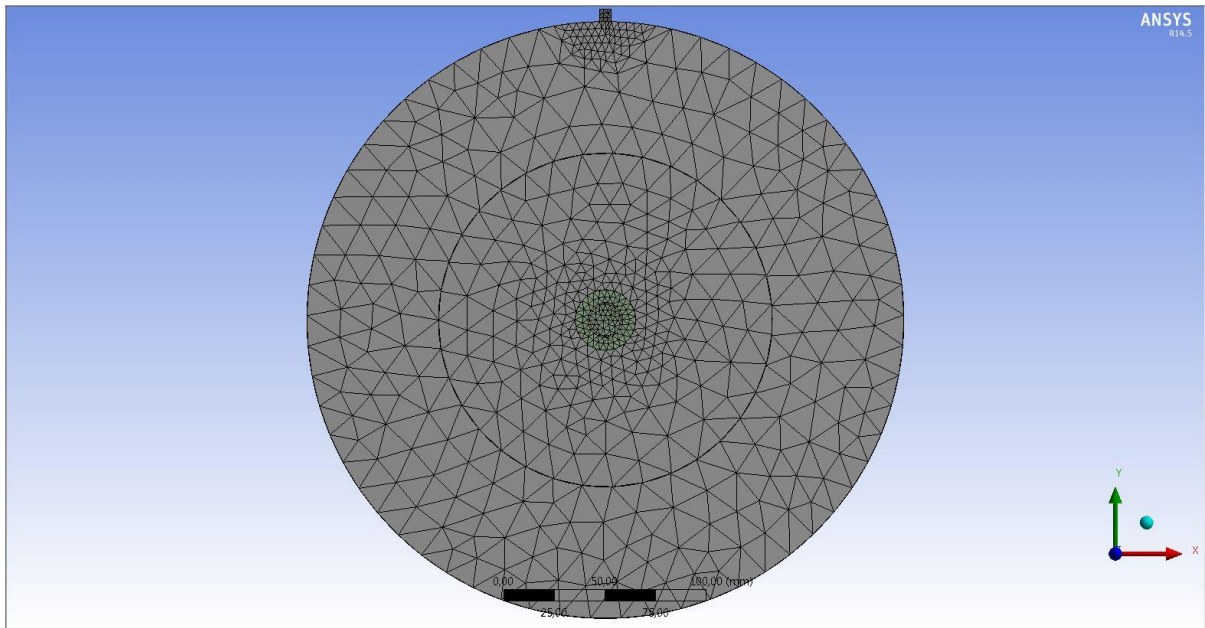


Figura 19 – Malha vista do plano XY

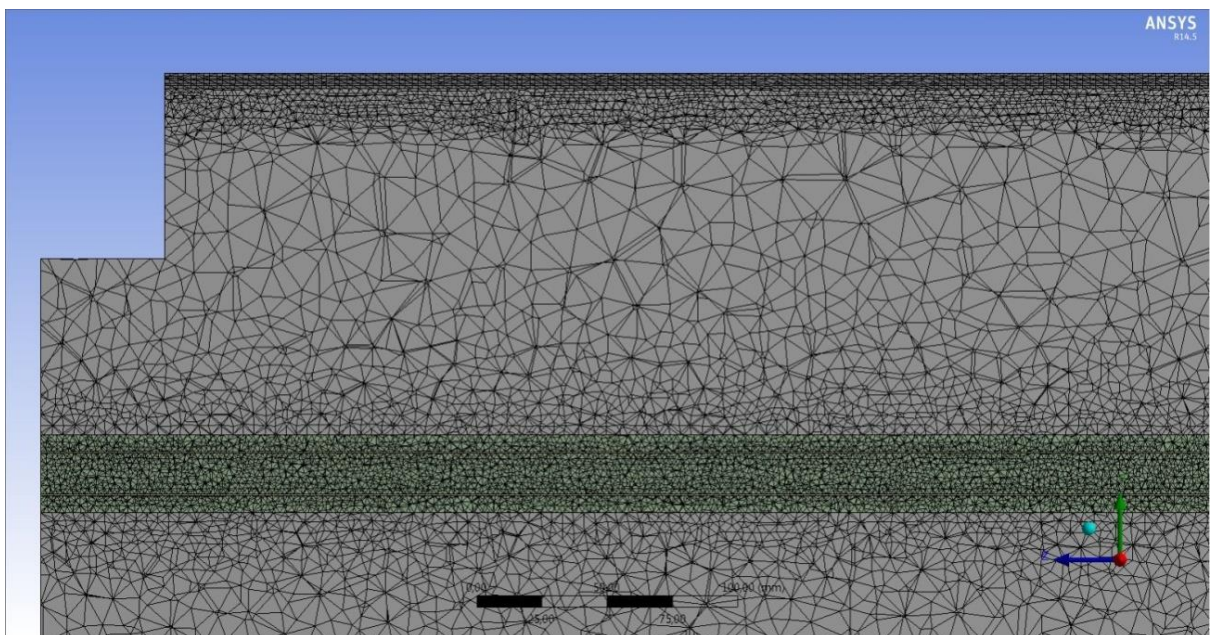


Figura 20 – Malha vista do plano YZ ampliada na entrada do fluido

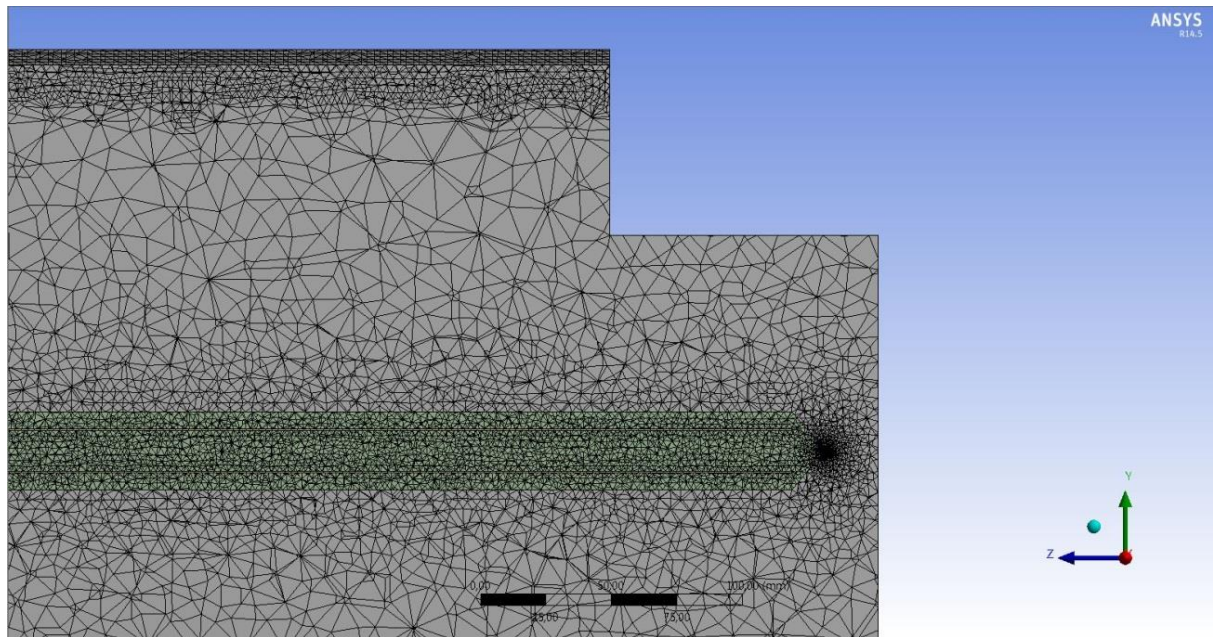


Figura 21 – Malha vista do plano YZ ampliada no final do tubo.

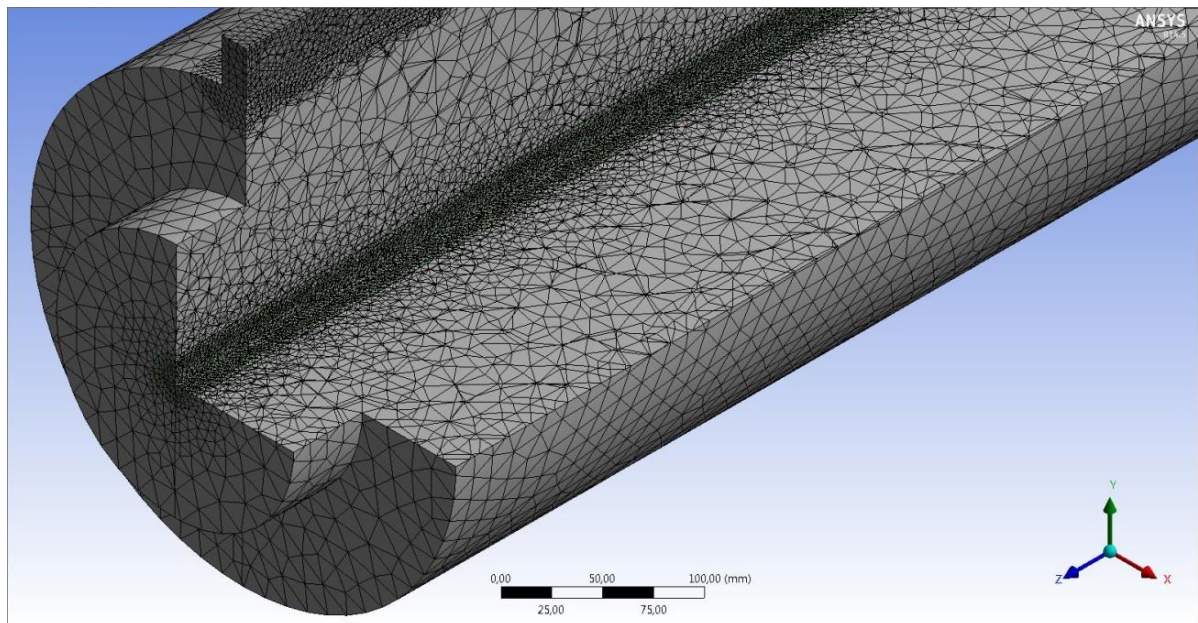


Figura 22 – Malha do rolo na visão ISO.

A malha final possui 235.167 nós e 1.052.560 elementos.

3.3- CONDIÇÕES DE CONTORNO

Segue as condições de contorno nas tabelas abaixo.

Tabela 4 – Condições de contorno do domínio fluido.

Domínio: Fluido	
Entrada	$\dot{Q} = 0.33 [Kg s^{-1}]; T_{inlet} = 40\text{ }^{\circ}C$
Saída	$P_{est.média} = 0$

Tabela 5 – Condições de contorno do domínio fonte de calor.

Domínio: Fonte de calor
$T_{fixa} = 1000\text{ }^{\circ}C$

Tabela 6 – Condições de contorno do domínio rolo.

Domínio: Rolo
Adiabático

Tabela 7 – Condições de contorno do domínio tubo.

Domínio: Tubo
Adiabático

Todos os valores das condições de contorno foram fornecidos pela ArcelorMittal Tubarão e são usados na Máquina de Lingotamento Contínuo 2 para a posição especificada.

3.4- CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais para a os domínios da simulação estão nas tabelas abaixo.

Tabela 8 – Condições iniciais do domínio fluido.

Domínio: Fluido
$P_{ref} = 0$
$T_{inicial} = 40^{\circ}C$

Tabela 9 – Condições iniciais do domínio fonte de calor.

Domínio: Fonte de calor
$T_{inicial} = 1000^{\circ}C$

Tabela 10 - Condições iniciais do domínio rolo.

Domínio: Rolo
$T_{inicial} = 250^{\circ}\text{C}$
$\omega_{rolo} = 0.13 \text{ rad/s}$

Tabela 11 - Condições iniciais do domínio Tubo.

Domínio: Tubo
$T_{inicial} = 40^{\circ}\text{C}$

Pela equação de Reynolds (18) e utilizando uma viscosidade dinâmica de $\mu = 1,003 \cdot 10^{-3}$, temos um $Re = 27028,5$ que é muito maior que 2300, o que implica que o escoamento pode ser considerado como turbulento.

CAPÍTULO 4 – RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1- VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Como é praticamente impossível a medição da temperatura do rolo que está em contato com a placa, foi feito uma medição experimental através de um termo par em contato com a superfície do rolo oposta à que está em contato com a placa. Essa medição foi feita de um rolo que compões um segmento que está localizado na posição 12 do veio 3 que faz parte da Máquina de Lingotamento Contínuo 2 da ArcelorMittal Tubarão. De acordo com a tabela 12 abaixo, temos os valores da temperatura experimental e os valores que foram obtidos na temperatura aproximada da simulação. Observamos que o erro máximo se localiza na temperatura inferior do rolo que é de 5,6%, considerável aceitável para a validação da simulação:

Tabela 12 – Comparação da temperatura experimental com a aproximada pela simulação.

	Temperatura Experimental	Temperatura Aproximada da Simulação
Parte Inf. do Rolo	282°C	297.8°C
Parte Inf. do Munhão	252°C	260.1°C

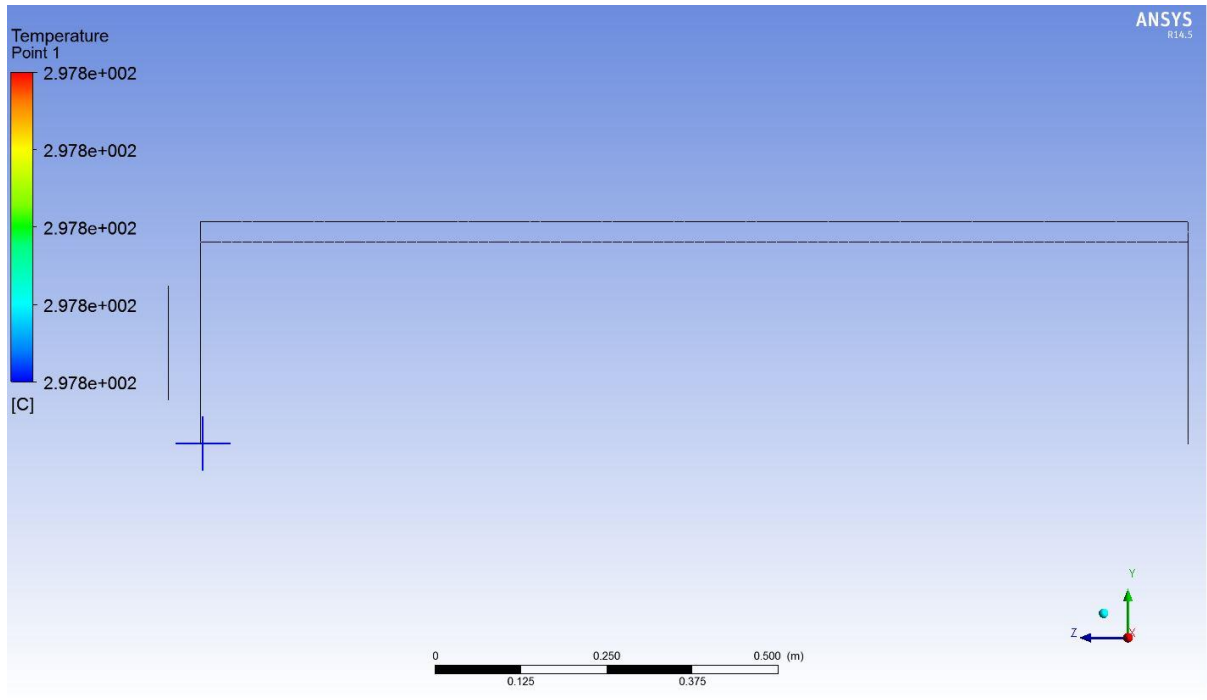


Figura 23 – Medição da temperatura da simulação no ponto inferior vista do plano YZ.

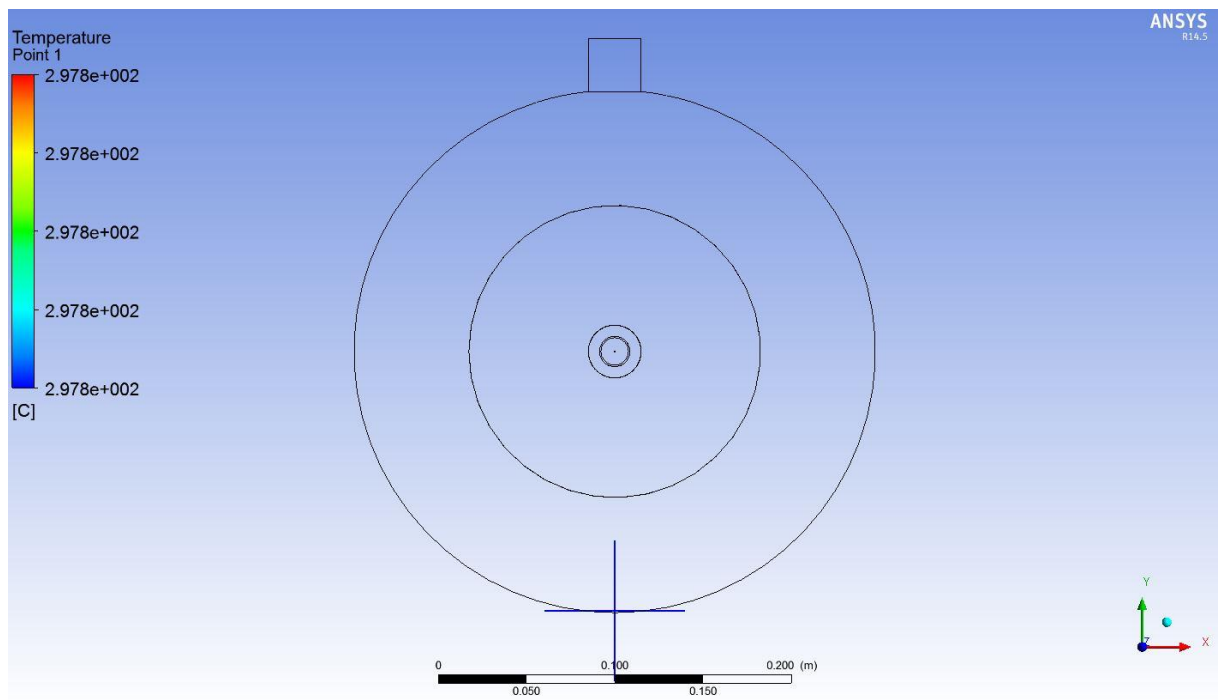


Figura 24 – Medição da temperatura da simulação no ponto inferior vista do plano XY.

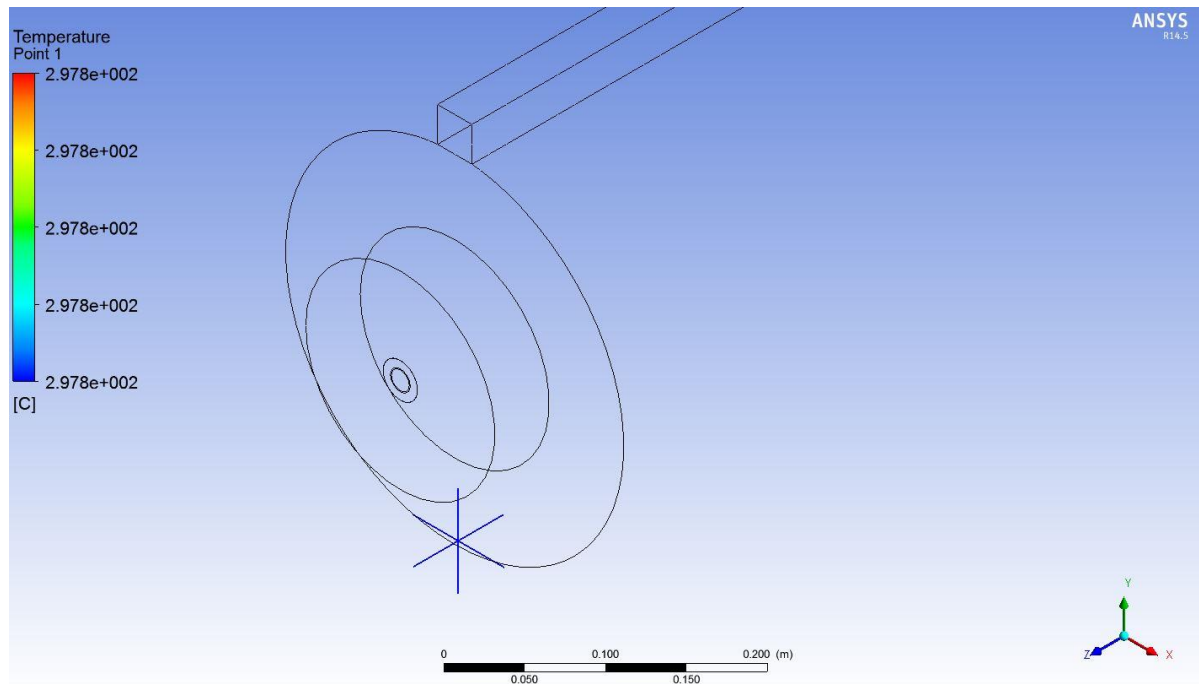


Figura 25 – Medição da temperatura da simulação no ponto inferior na visão ISO.

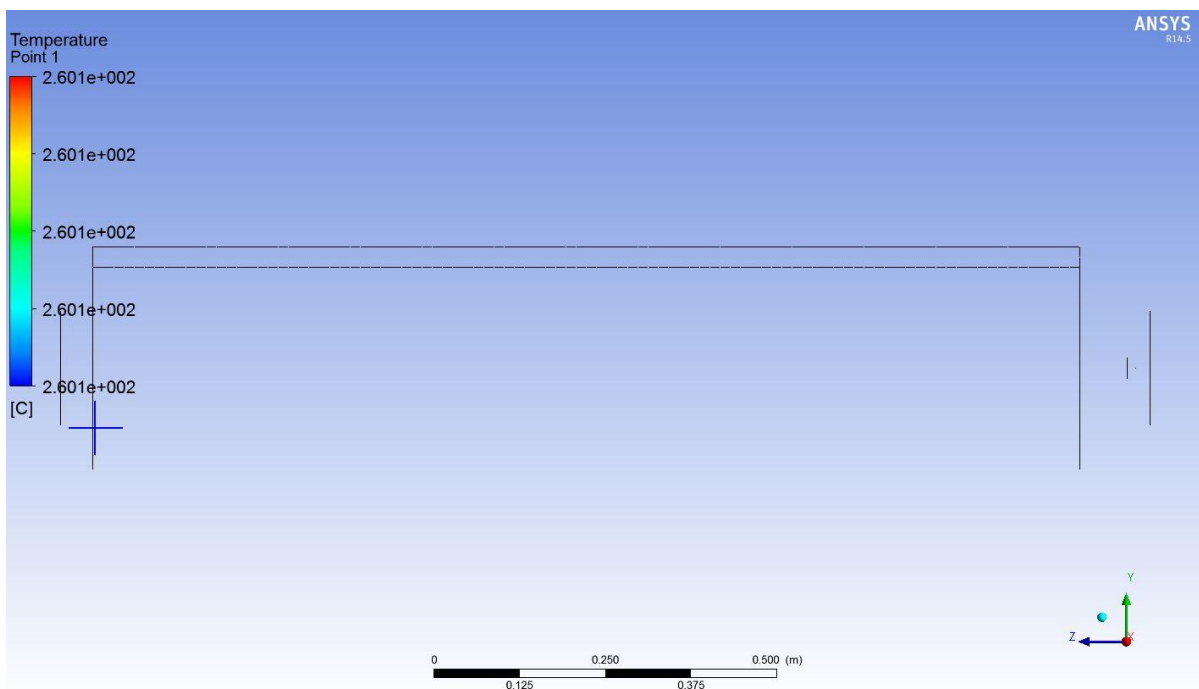


Figura 26 – Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão vista do plano YZ.

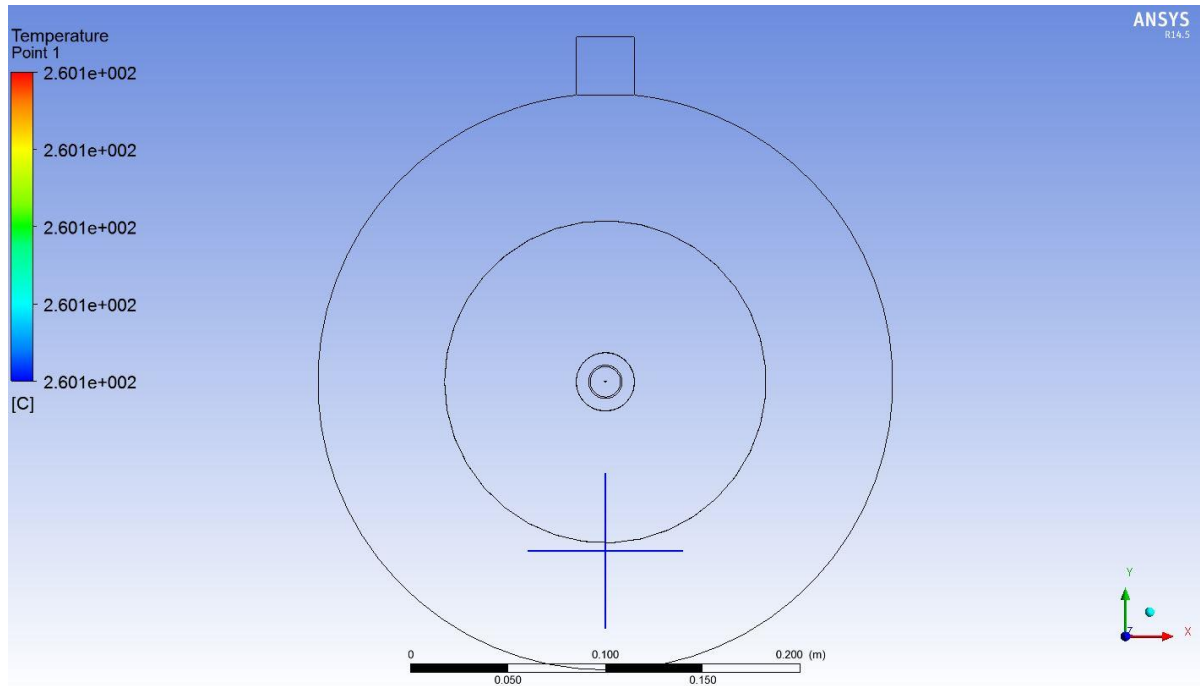


Figura 27 – Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão vista do plano XY.

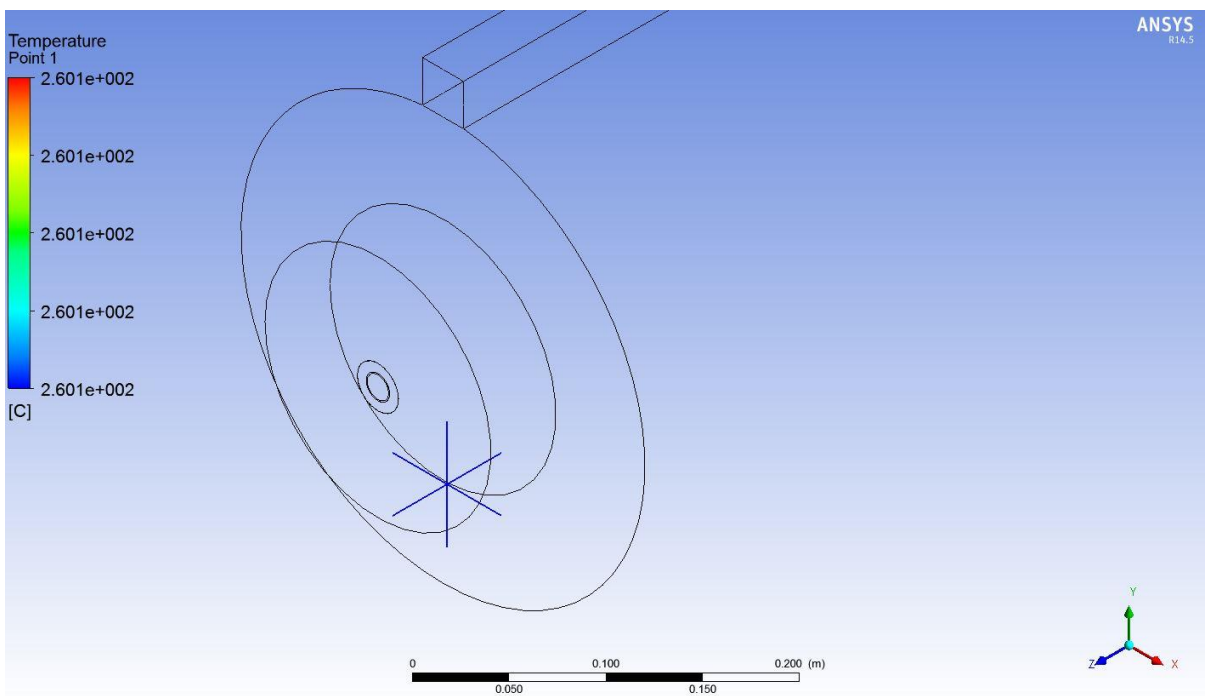


Figura 28 – Medição da temperatura da simulação no ponto próximo ao munhão na visão ISO.

4.2- RESULTADO

Após a validação da simulação, foi utilizado o CFX – Post para verificar como está a distribuição da temperatura no rolo.

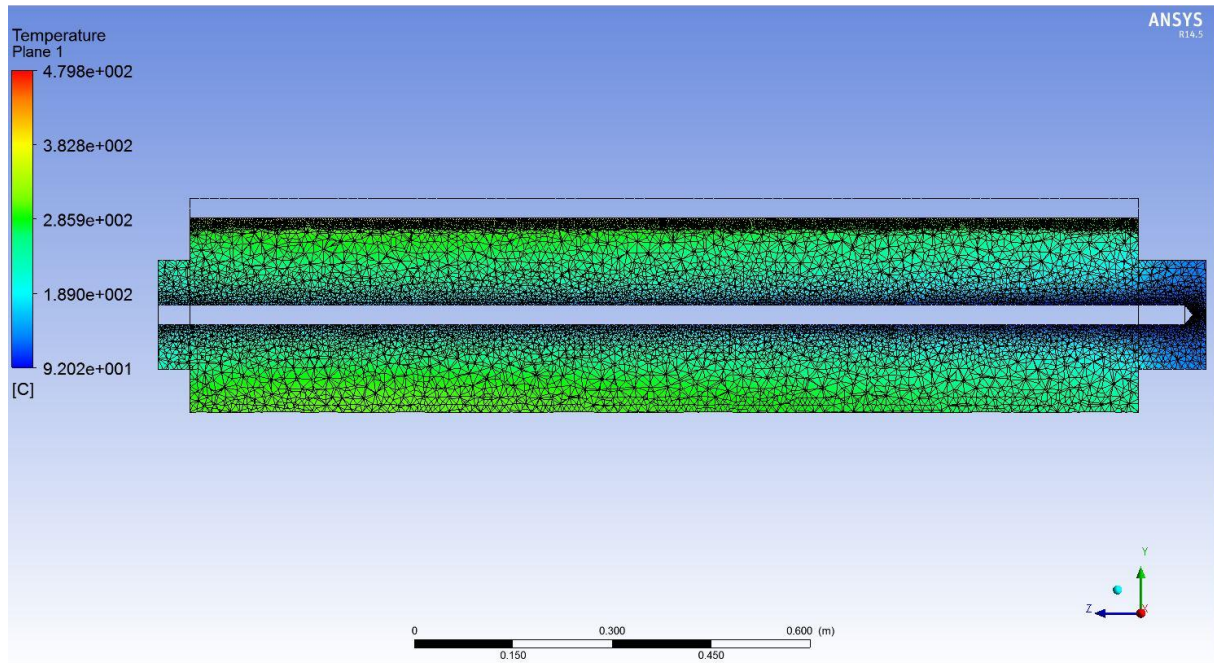


Figura 29 – Distribuição da temperatura no rolo.

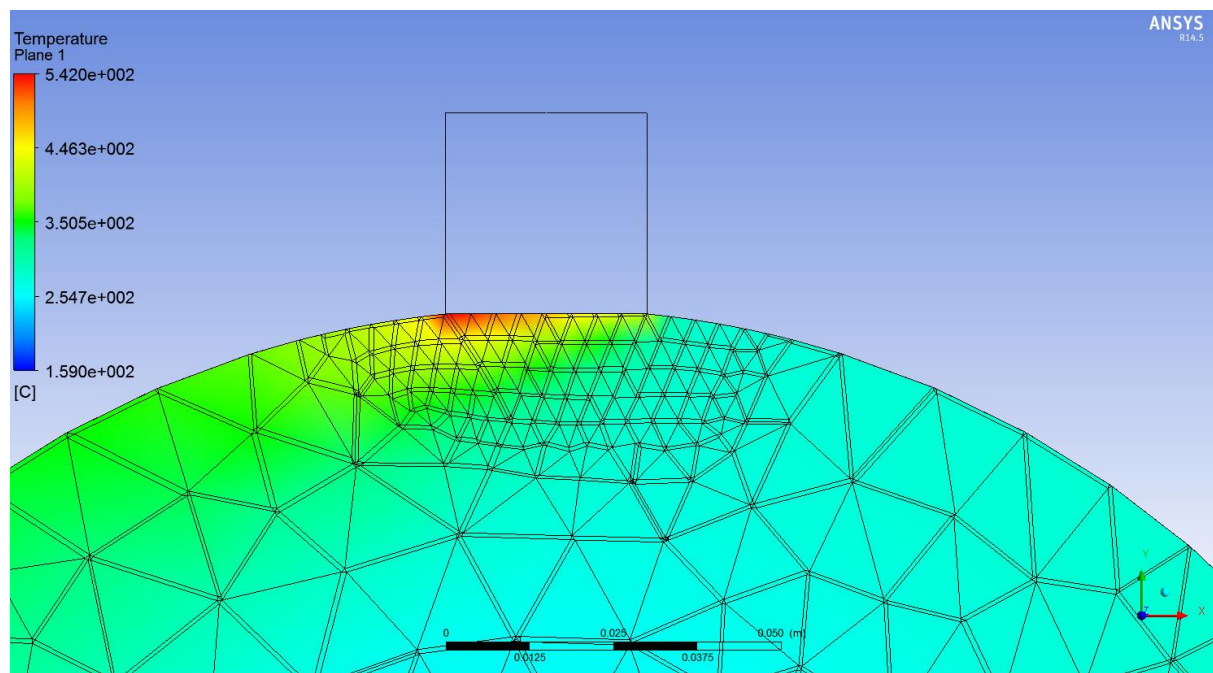


Figura 30 – Distribuição da temperatura no rolo ampliada próxima a fonte de calor.

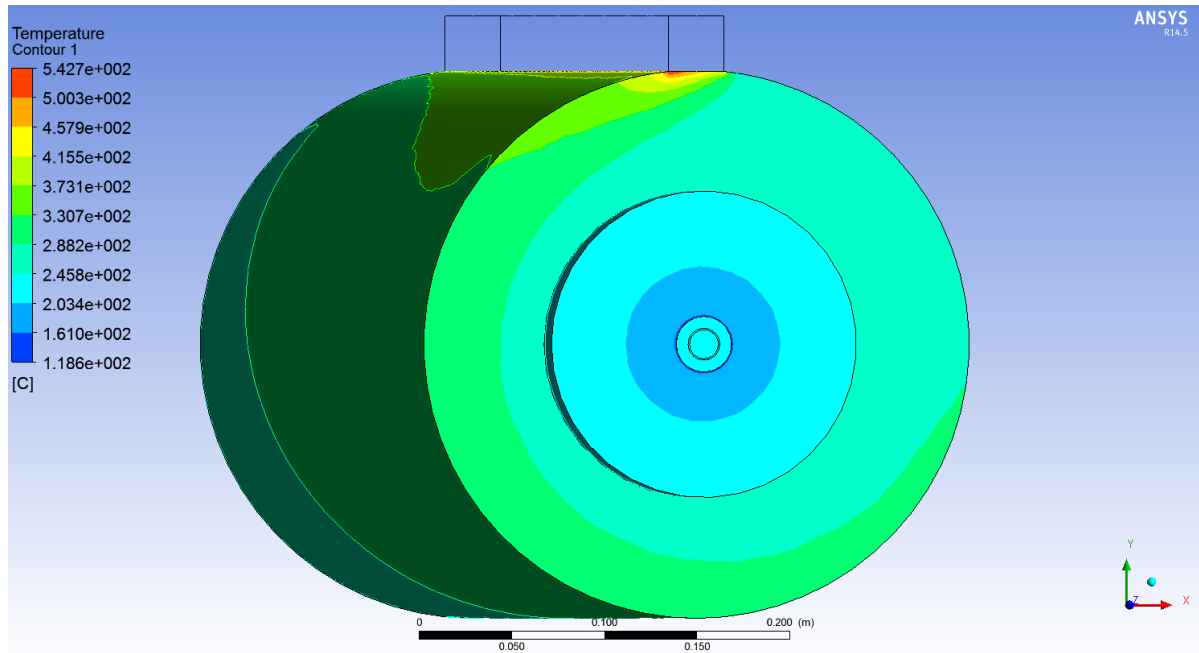


Figura 31 - Distribuição da temperatura na superfície do rolo

O resultado da simulação mostra que na área em contato com a fonte de calor e próxima a ela, a temperatura do rolo excede os 400°C. Sabe-se que a partir desta temperatura o revestimento do rolo fica vulnerável a perda de suas propriedades mecânicas e pode se desgastar com maior rapidez. Como mostrado no apêndice 1, o revestimento é liberado para trabalho com 42 HRC (412 HV como mostrado no apêndice 3) e durante a operação ele só é completamente degradado se for menor que 38 HRC (372 HV), o que estabelece uma temperatura maior que 650°C (Apêndice 2).

Portanto, o material não será completamente degradado, porém, como a temperatura máxima foi de 542,7°C a dureza sobre uma redução de aproximadamente 2,5% o que equivale a aproximadamente 41 HRC de dureza.

CAPÍTULO 5 –NOVOS RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS

5.1- PROPOSTA

Na tentativa de reduzir a temperatura superficial do rolo para um valor menor do que 400°C, será proposto um aumento da vazão da água de resfriamento interno do rolo.

5.1.1- AUMENTO DE 50% DA VAZÃO DE ENTRADA

Propomos aumentar a vazão de entrada em 50% e observamos na Figura 33 que a maior temperatura no contato do rolo com a fonte de calor é de 514.5 °C, variando a temperatura em 28.2 °C.

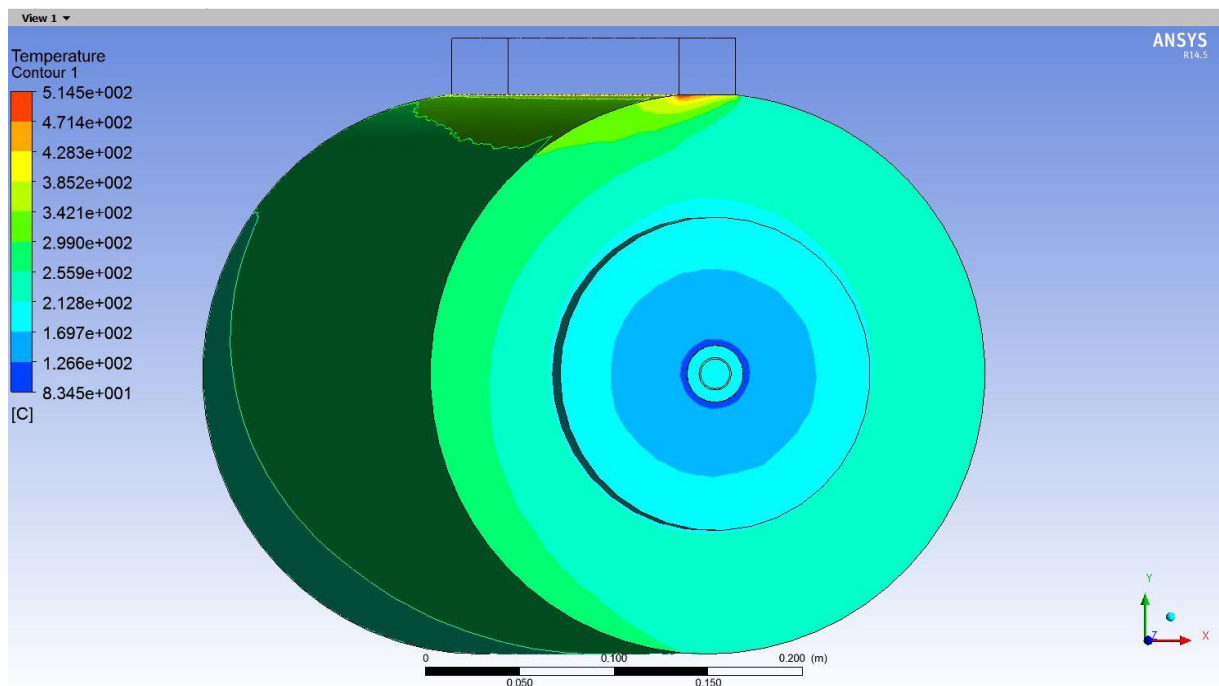


Figura 32 – Distribuição da temperatura na superfície do rolo com aumento de 50% da vazão.

Não conseguimos chegar aos 400 °C desejados, mas já podemos observar que o revestimento já está trabalhando com uma dureza próxima dos 42 HRC. Assim, ele terá uma vida útil maior.

5.1.2- AUMENTO DE 300% DA VAZÃO DE ENTRADA

Agora propomos um aumento de 300%, equivalente a 1 Kg/s, e percebemos que variação da temperatura para a proposta anterior não foi muito grande. Temos uma diferença de apenas 16.4 °C, de acordo com a figura 34.

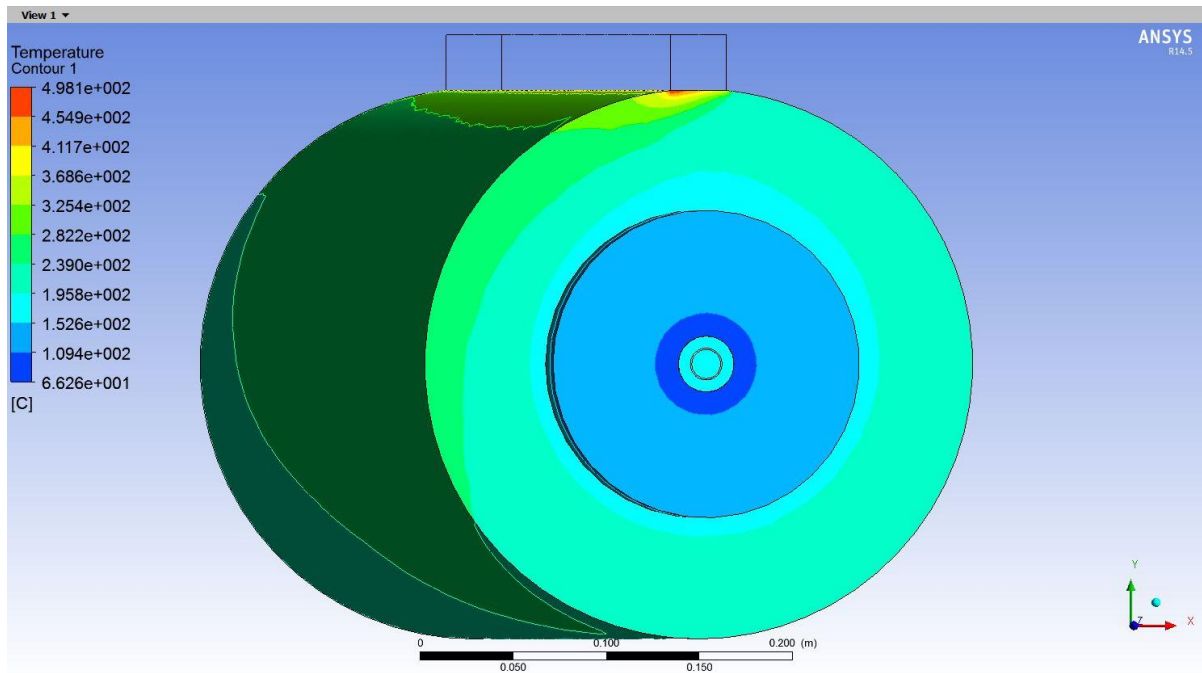


Figura 33 – Distribuição da temperatura na superfície do rolo com aumento de 300% da vazão.

5.1.3- COMPARAÇÃO

Para que possamos comparar as temperaturas superiores do rolo no projeto atual com as temperaturas superiores do rolo nas novas propostas foi feito um gráfico como mostrado na figura 35 abaixo:

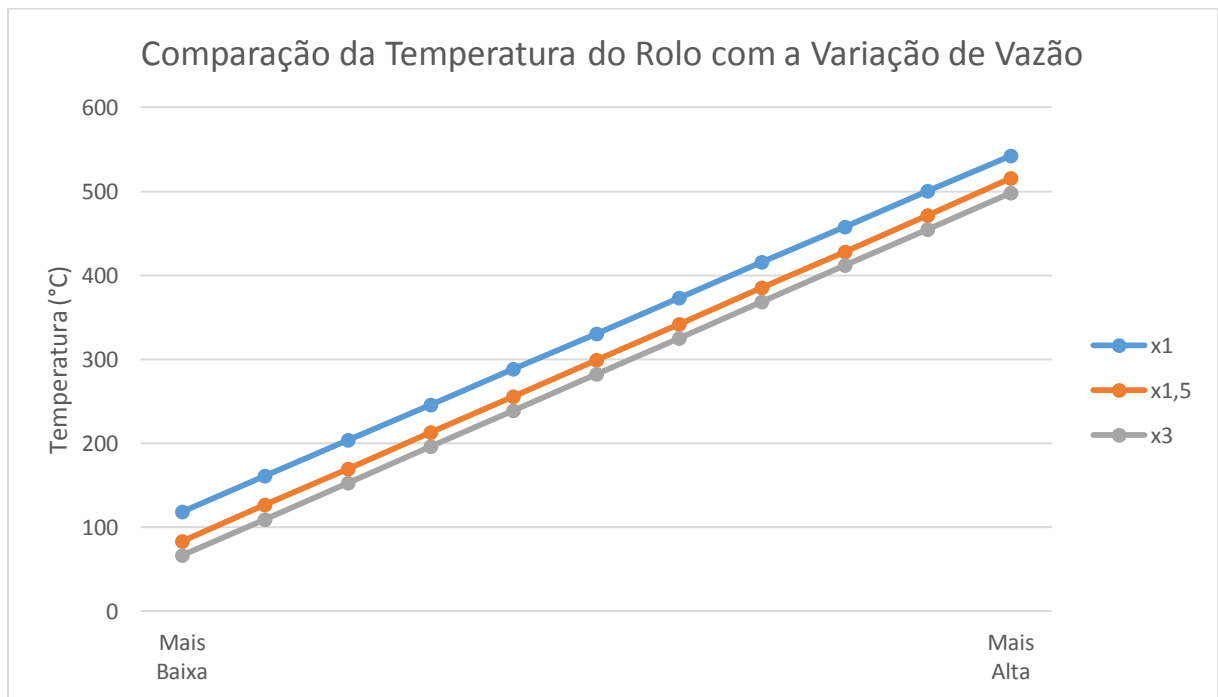


Figura 34 – Gráfico da comparação da temperatura superior do rolo no projeto atual com o das novas propostas.

Percebemos que para a temperatura máxima do rolo ficar próxima aos 400 °C temos que não só mudar a vazão, mas também testar outros modos de resfriamento. Já que a variação da redução da temperatura é muito baixa se comparada com o aumento da vazão.

5.2- TRABALHOS FUTUROS

Na tentativa de aperfeiçoar o resfriamento interno do rolo, será proposto trabalhos futuros no qual irá simular novas propostas como vazão mínima necessária para que o rolo possa manter a sua temperatura de superfície inferior à 400°C, variação das dimensões do furo interno do rolo e do tubo da junta rotativa, etc.

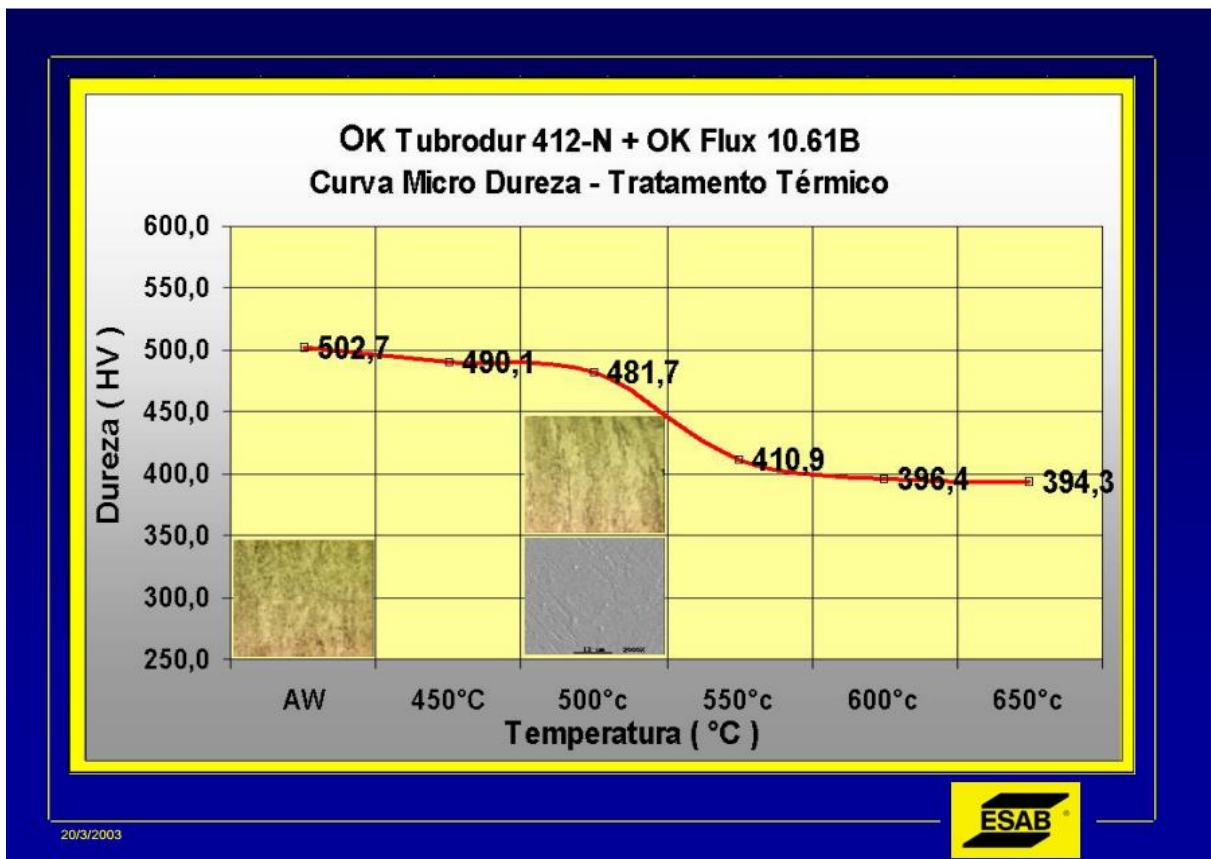
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Catálogo CARBOFOR indústria mecânica LTDA
- Catálogo ESAB – Tubrodur 412N
- Garcia, A.; Spim, J. A.; dos Santos, C. A.; Cheung, N.: Lingotamento contínuo de aços. ABM, São Paulo, 2006.
- <http://www.ansys.com/products/simulation+technology/fluid+dynamics>
- Incropera F.; DeWitt; Bergman; Lavine, 6^a ed., Fundamentos de Transferência de Calor e Massa
- Suhas V Patankar – Numerical Heat Transfer and Fluid Flow
- Rizzo, E. M. da Silveira, 2002, Introdução ao processo de lingotamento contínuo de placas de aço, CEFETES, Vitória, Espírito Santo.
- Versteeg H. K. and Malalasekera W – An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method

APÊNDICE

METAL DEPOSITADO	PROPRIED. MECÂNICAS	DIÂM. (mm)	EMBALAGEM FLUXO (kg)
C 0,05 Si 0,40 Mn 1,00 Cr 12,00 Ni 4,20 Mo 1,00 Nb 0,10 V 0,13 N 0,07	03 ou mais camadas: 42 HRc (como soldado)	3,20	25/250 OK Flux 10.61 B ou 10.93 C

Apêndice 1: Tabela de propriedades do arame Tubrodur 412N.



Apêndice 2: Gráfico Dureza (HV) X Temperatura (°C).

Dureza Rockwell "C"	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Dureza Rockwell "A"	Dureza Rockwell "B"	Dureza Rockwell "D"	Dureza Shore
HRC	HB	HV	HRA	HRB	HRD	HS
68	---	940	85,6	---	76,9	97
67	---	900	85,0	---	76,1	95
66	---	865	84,5	---	75,4	92
65	739	832	83,9	---	74,5	91
64	722	800	83,4	---	73,8	88
63	705	772	82,8	---	73,0	87
62	688	746	82,3	---	72,2	85
61	670	720	81,8	---	71,5	83
60	654	697	81,2	---	70,7	81
59	634	674	80,7	---	69,9	80
58	615	653	80,1	---	69,2	78
57	595	633	79,6	---	68,5	76
56	577	613	79,0	---	67,7	75
55	560	595	78,5	---	66,9	74
54	543	577	78,0	---	66,1	72
53	525	560	77,4	---	65,4	71
52	512	544	76,8	---	64,6	69
51	496	528	76,3	---	63,8	68
50	481	513	75,9	---	63,1	67
49	469	498	75,2	---	62,1	66
48	455	484	74,7	---	61,4	64
47	443	471	74,1	---	60,8	63
46	432	458	73,6	---	60,0	62
45	421	446	73,1	---	59,2	60
44	409	434	72,5	---	58,5	58
43	400	423	72,2	---	57,7	57
42	390	412	71,5	---	56,9	56
41	381	402	70,9	---	56,2	55
40	371	392	70,4	---	55,4	54
39	362	382	69,9	---	54,6	52
38	353	372	69,4	---	53,8	51
37	344	363	68,9	---	53,1	50
36	336	354	68,4	(109,0)	52,3	49
35	327	345	67,9	(108,5)	51,5	48
34	319	336	67,4	(108,0)	50,8	47
33	311	327	66,8	(107,5)	50,0	46
32	301	318	66,3	(107,0)	49,2	44
31	294	310	65,8	(106,0)	48,4	43
30	286	302	65,3	(105,5)	47,7	42
29	279	294	64,7	(104,5)	47,0	41
28	271	286	64,3	(104,0)	46,1	41
27	264	279	63,8	(103,0)	45,2	40
26	258	272	63,3	(102,5)	44,6	38
25	253	266	62,8	(101,5)	43,8	38
24	247	260	62,4	(101,0)	43,1	37
23	243	254	62,0	100,0	42,1	36
22	237	248	61,5	99,0	41,6	35
21	236	243	61,0	98,5	40,9	35
20	236	238	60,5	97,8	40,1	34
(18)	219	230	---	96,7	---	33
(16)	212	222	---	95,5	---	32
(14)	203	213	---	93,9	---	31
(12)	194	204	---	92,3	---	29
(10)	187	196	---	90,7	---	28
(8)	179	188	---	89,5	---	27
(6)	171	180	---	87,1	---	26
(4)	165	173	---	85,5	---	25
(2)	158	160	---	83,5	---	24
(0)	152	160	---	81,7	---	24

Apêndice 3: Tabela de Conversão de Dureza.