

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DESENVOLVIMENTO DE  
PROCESSO DE RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA

por

Diego Bueno Borges

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Porto Alegre, agosto de 2023

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Borges, Diego Bueno  
APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA  
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE RESFRIAMENTO POR  
CONVECÇÃO FORÇADA / Diego Bueno Borges. -- 2023.  
27 f.  
Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. CFD. 2. Convecção Forçada. I. Roman Centeno,  
Prof. Dr. Felipe, orient. II. Título.

Diego Bueno Borges

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DESENVOLVIMENTO DE  
PROCESSO DE RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador(a): Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno (Presidente)

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. José Antônio Mazzaferro

Porto Alegre, agosto de 2023

Borges, Diego. **Aplicação de Simulação Numérica para Desenvolvimento de Processo de Resfriamento por Convecção Forçada**. 2023. 27p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento do processo de convecção forçada via simulação numérica, para resolução de problema de transferência de calor em componentes de eixo cardan. Para uma melhor eficiência energética, aproveitando o calor de forjamento e atribuir propriedades mecânicas e metalúrgicas (dureza e microestrutura) para um aço com 0,4% de Carbono e ao Boro. Foram feitas simulações de *Computational Fluid Dynamic* - CFD para entendimento das linhas de corrente dentro de um conduto onde as peças passaram após processo de conformação a quente. Por conseguinte, com a velocidade do ar e o coeficiente convectivo extraídos das simulações, calculou-se a transferência de calor, para entendimento de quanto tempo era necessário deixar a peça exposta ao processo e qual seria a temperatura de saída. Assim sendo, foi feito um protótipo para validar os resultados experimentalmente e sua taxa de resfriamento para atender propriedades metalúrgicas (durezas de 240 Hardness Brinell e microestrutura perlita e ferrita). A diferença entre as velocidades entre protótipo e simulação foi de 3,58%. Já o coeficiente convectivo obtido na simulação de convecção foi de 43,53 W/m<sup>2</sup>K e com isso, a taxa de resfriamento calculada foi de 1,05°C/s. Esse estudo foi importante para avaliação de um protótipo construído e que resultou em durezas médias do componente mecânico de 241 HB e microestruturas perlíticas ferríticas após o processo de resfriamento.

PALAVRAS-CHAVE: CFD, Aço Microligado, Simulação de Convecção Forçada.

Borges, Diego. **Numerical Simulation Application for Forced Convection Cooling Process Development**. 2023. 27p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## ABSTRACT

This work consists of the development of the convection process tested via numerical simulation, to solve a heat transfer problem in the automotive industry. For better energy efficiency, taking advantage of forging heat and planning mechanical and metallurgical properties (hardness and microstructure) for a steel with 0.4% carbon and boron. Computational Fluid Dynamics - CFD simulations were made to understand the streamlines inside a conduit where the parts passed after the hot forming process. Therefore, with the air velocity and the convective coefficient extracted from the simulations, the heat transfer was calculated, in order to understand how long it was necessary to leave the part exposed to the process and what the outlet temperature would be. Therefore, a prototype was made to validate the results experimentally and their cooling rates to meet metallurgical properties. The difference between speeds between prototype and simulation was 3.58%. The convective coefficient obtained in the convection simulation was 43.53 W/m<sup>2</sup>K and, therefore, the calculated cooling rate was 1.05°C/s. This study was important for the evaluation of a built prototype that was tested on average hardness of the mechanical component of 241 HB and ferritic pearlitic microstructures after the cooling process.

**KEYWORDS:** CFD, Microalloyed Steel, Simulation Forced Convection.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$A$	Área de troca de calor	[m <sup>2</sup> ]
$cp$	Calor específico a pressão constante	[J/kg.K]
$F$	Força	[N]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> .K]
$k$	Condutividade térmica	[W/m.K]
$L$	Comprimento	[m]
$Pr$	Número de Prandtl	
$q$	Taxa de transferência de calor	[W]
$T$	Temperatura	[°C]
$u$	Componente da velocidade na direção x	[m/s]
$v$	Componente da velocidade na direção y	[m/s]
$w$	Componente da velocidade na direção z	[m/s]
$x$	Coordenada cartesiana	[m]
$y$	Coordenada cartesiana	[m]
$z$	Coordenada cartesiana	[m]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	[m <sup>2</sup> /s]
$\partial$	Derivada parcial	
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	[Pa.s]
$\Phi$	Dissipação viscosa	
$\nabla$	Operador gradiente	
$\varepsilon$	Emissividade superficial	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/(m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )]
$Cp$	Capacidade potencial do processo	
$Cpk$	Capacidade efetiva do processo	

### Abreviaturas e Acrônimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
HB	Hardness Brinell

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	1
2.1. OBJETIVO GERAL .....	1
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	1
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	2
3.1. EIXO DE TRANSMISSÃO .....	2
3.2. EFEITO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO .....	2
3.3. EQUAÇÃO DA ENERGIA .....	3
3.4. EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES .....	3
3.5. EQUAÇÃO DE BERNOULLI AO LONGO DE UMA LINHA DE CORRENTE3 .....	3
3.6. MODOS DE PROPAGAÇÃO DE CALOR .....	3
3.7. CONDUÇÃO .....	4
3.8. CONVECÇÃO FORÇADA .....	4
3.9. DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAL .....	5
3.10. TIPOS DE MALHA .....	5
3.11. CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO .....	6
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	6
4.1. MATÉRIA PRIMA USADA NO EXPERIMENTO .....	6
4.2. COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS - CFD .....	7
4.3. SIMULAÇÃO 1 .....	7
4.3.1 Criação de Protótipo do Conduto .....	7
4.3.2 Tipo de Malha .....	8
4.3.3 Qualidade da Malha CFD .....	8
4.3.4 Método da Solução CFD .....	9
4.4. SIMULAÇÃO 2 - EXTRAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO .....	9
4.5. SIMULAÇÃO 3 – SIMULAÇÃO DE CONVECÇÃO .....	10
4.6. CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO .....	10
<b>5. RESULTADOS</b> .....	11
5.1. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1 .....	11
5.2. VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO 1 COM PROTÓTIPO CONSTRUÍDO .....	12
5.3. ANÁLISE SIMULAÇÃO 2 .....	13
5.4. ANÁLISE SIMULAÇÃO 3 .....	13
5.5. ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	15
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	16
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	17
<b>8. APÊNDICES</b> .....	18
<b>9. ANEXOS</b> .....	21

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e a importância do consumo e produção responsáveis tornaram necessário o desenvolvimento de novos processos dentro da indústria. Segundo Button (1995), a competitividade entre as empresas em função das exigências de qualidade e a necessidade de redução de custos indiretos, tem levado a uma busca por melhoria contínua, a partir de técnicas de organização e fabricação que tornem os processos produtivos cada vez mais flexíveis, rápidos e econômicos.

Na indústria, o forjamento a quente, empregado na maior parte das peças forjadas, tem recebido grande investimento no seu desenvolvimento (REINSCH *et al.*, 2003). Após esta etapa, um dos processos que requer especial atenção é o tratamento térmico. Em termos gerais, o tratamento térmico é composto por operações de aquecimento e resfriamento controlados, considerando parâmetros de temperatura, atmosfera, tempo, velocidade de resfriamento, entre outros fatores, com objetivo de alterar as propriedades mecânicas, físicas e mesmo químicas dos aços (COSTA E SILVA; MEI, 2021). Dentre as principais alterações, Chiaverini (1986) cita o aumento de resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste; melhoria de ductibilidade, da usinabilidade e das propriedades de corte; modificação de propriedades elétricas e magnéticas.

A aplicação do resfriamento controlado, conforme cita Souza *et al.* (2009), possibilita a eliminação do desperdício de tempo e energia despendidos com o resfriamento dos forjados ao ar e reaquecimento durante a realização do processo de têmpera e revenimento, comumente realizados após o forjamento a quente.

Com isto, o presente trabalho tem como principal objetivo atingir as propriedades mecânicas e metalúrgicas de um componente de eixo cardan após forjamento a quente para o aço 34MnB5. Esse aço, por sua vez, atingirá tais propriedades devido ao processo de resfriamento por convecção forçada.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar, via simulação numérica, a resposta do coeficiente de convecção no resfriamento de peças forjadas com aço microligado, buscando atribuir dureza (resistência mecânica) aos componentes resfriados em conduto com ventilação forçada.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboração modelo fluidodinâmico para o campo de velocidades do ar [m/s] dentro do conduto de resfriamento.
- Simular a transferência de calor da peça para determinar a taxa de resfriamento [°C/s];
- Realizar análise metalúrgica para validação do protótipo construído.

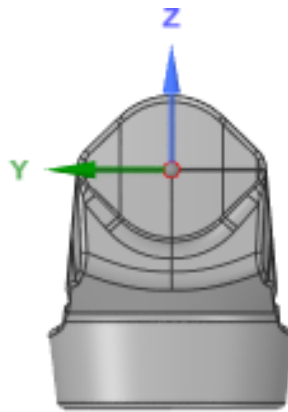


### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. EIXO DE TRANSMISSÃO

Conforme Dana (2022), o eixo cardan surgiu através da necessidade de movimentar as rodas traseiras dos veículos por meio da força gerada pelo motor dianteiro. De forma experimental, o eixo cardan foi desenvolvido pelo italiano Geronimo Cardano, do qual deu origem ao nome eixo cardan. Sua função é transmitir a energia gerada pelo motor, neste caso o torque, para o eixo diferencial do veículo, que por sua vez, irá transferir o torque para as rodas traseiras. Na Figura 1, é possível verificar o componente mecânico que faz parte da estrutura de um eixo cardan.

Figura 1 - Componente testado no processo de resfriamento

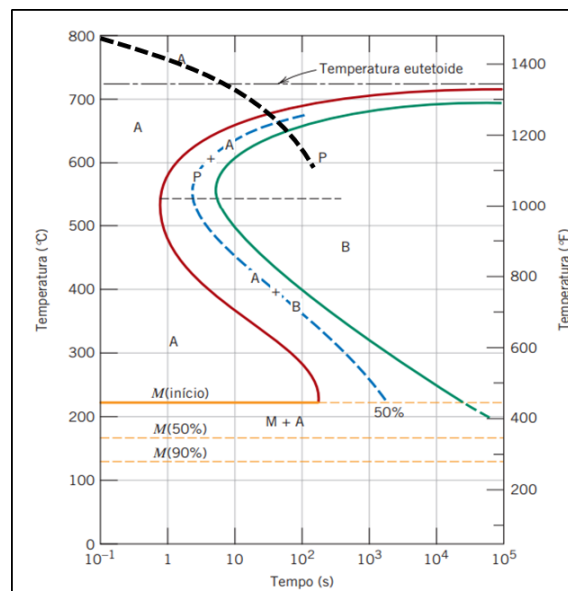


Fonte: Autor, 2023.

#### 3.2. EFEITO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

A formação da microestrutura está associada a taxa de resfriamento do aço, segundo Callister (2016). Como base teórica, usou-se o diagrama TTT (Tempo-Transformação-Temperatura) para analisar a transformação microestrutural do processo de resfriamento ao longo do tempo.

Figura 2 - Diagrama TTT (Tempo-Transformação-Temperatura)



Fonte: Callister, 2016.

Segundo Costa e Silva (2021), um aço resfriado lentamente, a partir com campo austenítico (temperaturas acima de 730°C para um aço com 0,77% de carbono conforme diagrama de equilíbrio ferro-carbono, Anexo 1), apresentará perlita e ferrita. Isso se dá a partir da movimentação e rearranjo dos átomos para formar uma nova fase (da austenita para a ferrita e perlita). A ferrita é bastante variável com a taxa de resfriamento: quando resfriado lentamente apresenta ferrita equiaxial e, se a taxa de resfriamento for mais severa, forma ferrita em forma de agulhas, ou seja, ferrita acicular.

### 3.3. EQUAÇÃO DA ENERGIA

Conforme Incropera e DeWitt (2003), a equação da energia é resultado em um volume de controle diferencial. Para exemplo de condução de calor transiente, a Equação 1 descreve uma condição importante: a conservação de energia, assim trabalhada para uma versão onde a condutividade térmica é constante.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \alpha \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

### 3.4. EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

Conforme Çengel (2007), para um fluido incompressível, a equação diferencial de Navier-Stokes descreve o escoamento de fluídos pelas forças viscosas e pela pressão que atuam sobre o escoamento. Ela descreve o escoamento de fluídos Newtonianos em que as propriedades se mantêm constantes (densidade, massa específica, viscosidade). A Equação 2 é uma equação fundamental da mecânica dos fluídos.

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

### 3.5. EQUAÇÃO DE BERNOULLI AO LONGO DE UMA LINHA DE CORRENTE

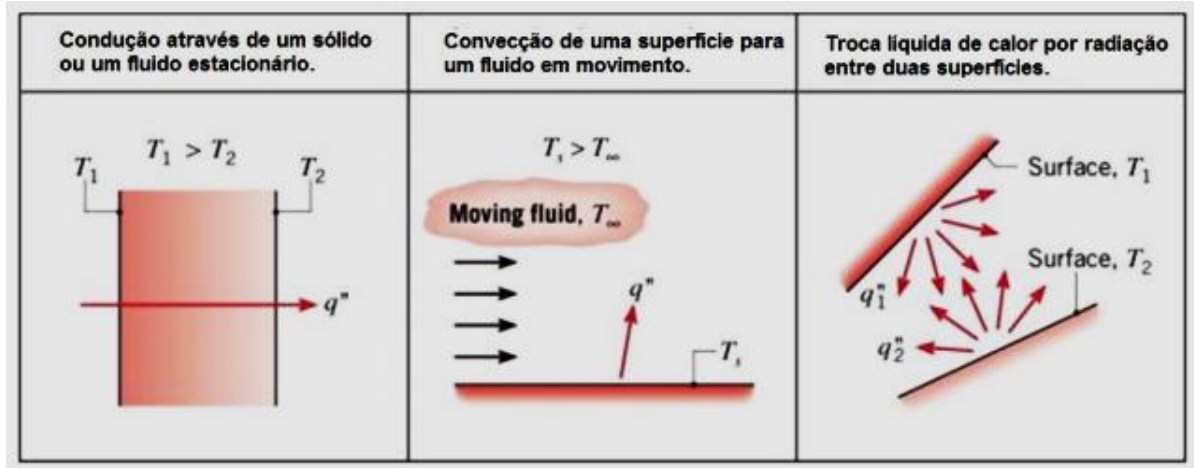
Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2016), uma aproximação para um problema de escoamento é a equação de Euler Bernoulli (Equação 5) ao longo de uma linha de corrente. Esta equação foi deduzida a partir da quantidade de movimento (segunda lei de Newton).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = Constante \quad (5)$$

### 3.6. MODOS DE PROPAGAÇÃO DE CALOR

BERGMAN *et al.* (2014), cita três formas de propagação de calor: condução, convecção e radiação, conforme Figura 3, sendo que cada modo, apesar de serem independentes, podem ocorrer simultaneamente.

Figura 3 - Modos de transferência de calor: Condução, Convecção e radiação



Fonte: Bergman *et al.*, 2014.

### 3.7. CONDUÇÃO

O processo de condução de calor, segundo Çengel e Ghajar (2012), é a transferência de calor que se dá das partículas de maior para as de menor estado energético. Isso é expresso pela Equação 6, da Lei de Condução de Calor de Fourier.

$$q_{\text{condução}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Na equação,  $k$  representa a condutividade térmica do material,  $A$  representa a área da seção a qual o calor vai fluir e  $dT/dx$  representa o gradiente de temperatura na seção. Sabe-se que o calor flui da maior temperatura para a menor, então atribui-se um sinal negativo.

### 3.8. CONVECÇÃO FORÇADA

A transferência de calor por convecção forçada, dá-se por meios externos, como por exemplo, um ventilador. Descreve-se, então, por convecção uma transferência de energia ocorrendo no interior de um fluido devido aos efeitos combinados da condução e do escoamento global ou do fluido. Sendo assim, a energia que está sendo transferida é a energia sensível, ou térmica interna, do fluido (INCROPERA; DEWITT, 2003).

A Equação 7, representa a Lei de Resfriamento de Newton, que descreve a taxa de transferência de calor ( $W$ ), a qual é a diferença entre a temperatura de uma superfície e um fluido ( $T_s - T_\infty$ ), multiplicado pela área ( $A$ ) por um coeficiente de transferência de calor  $h$  ( $W/m^2K$ ).

$$q_{\text{convecção}} = hA(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

A Figura 4 apresenta alguns exemplos de coeficientes convectivos. Para gases, o coeficiente de convecção forçada está entre 25 e 250  $W/(m^2K)$ .

Figura 4 - Valores aproximados para o coeficiente de transferência de calor por convecção  
 $h$

Processo	(W/(m <sup>2</sup> · K))
Convecção natural	
Gases	2–25
Líquidos	50–1000
Convecção forçada	
Gases	25–250
Líquidos	100–20.000

Fonte: Bergman *et al.*, 2014.

### 3.9. RADIAÇÃO

A radiação é a energia que é emitida pela matéria que está diferente de zero. Essa energia liberada, pode ser emitida na mudança de configuração eletrônica dos átomos. Tal energia, é transportada por ondas eletromagnéticas. A radiação foi negligenciada, no presente trabalho.

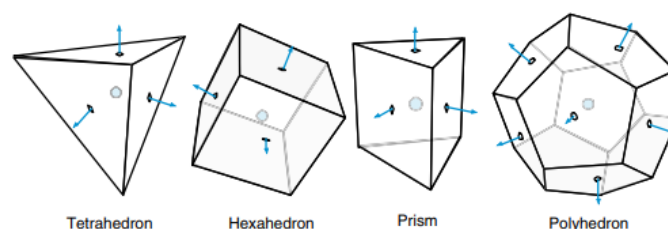
### 3.10. DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAL

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é aplicada para estudar o campo de escoamento, em forma de partículas fluidas que mostra caminhos formados por ela. Com o auxílio de simulação numérica computacional, através de softwares comerciais, é possível realizar a análise fluidodinâmica de um projeto (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2016).

### 3.11. TIPOS DE MALHA

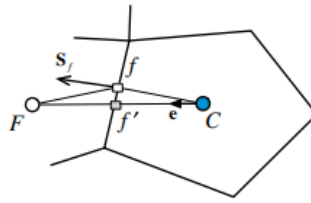
As formas mais utilizadas de malhas são: tetraédrica, hexagonal, prismática e poliédrica, conforme Figura 5. Para avaliação da qualidade da malha é usado o *Skewness*, (em português, fator de assimetria), que representa o desvio do vetor que conecta o centro dos volumes vizinhos e o centro da face conforme Figura 6 (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). O fator de qualidade de malha é determinado pela assimetria entre os elementos vizinhos, conforme figura 6. Visto que, quanto menos distorcida a malha menor é o fator de *Skewness*.

Figura 5 - Representação de malha



Fonte: Moukalled; Mangani; Darwish, 2016.

Figura 6 - Determinação do fator de assimetria entre faces e o centro dos volumes



Fonte: Moukalled; Mangani; Darwish, 2016.

### 3.12. CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

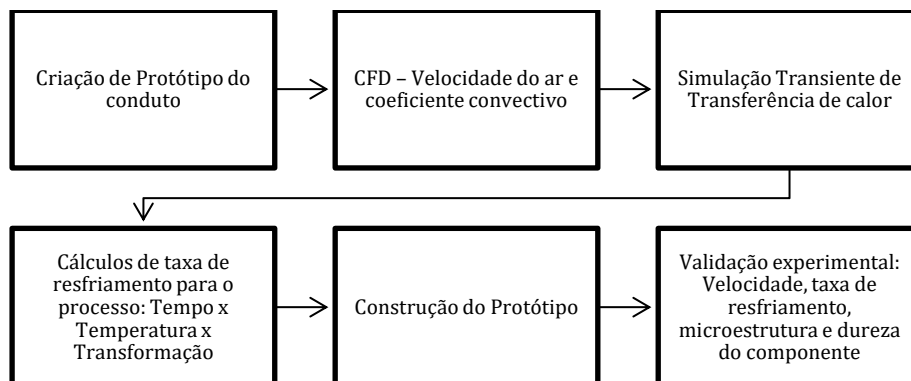
Segundo Ribeiro e Caten (2012) o CEP (Controle Estatístico do Processo) fornece uma radiografia do processo identificando sua variabilidade e capacidade ao longo do tempo, com a coleta de dados. Na indústria, é conveniente ter uma maneira simples e quantitativa para representar a capacidade do processo e isso pode ser expresso pelos índices de  $C_p$  (variação potencial do processo) e  $C_{pk}$  (localização do processo referente a seus limites superiores e inferiores). Para um processo capaz os dois índices devem ser maiores que 1. Para a análise de CEP, usou-se o *software Minitab*®.

## 4. METODOLOGIA

Este trabalho foi constituído nas seguintes etapas que compreendem: criação, simulação, cálculos, construção e validação experimental, conforme Figura 7. Estas etapas serão descritas e detalhadas nos subcapítulos que seguem e validadas nos resultados.

Foram feitas duas simulações CFD: simulação 1 (velocidade do ar ao longo do conduto) e a simulação 2, com essa velocidade do ar, aplicada sobre o componente mecânico com temperatura de 1000°C. A simulação 3, trata-se da transferência de calor transiente como o coeficiente convectivo médio, calculado na simulação 2. Com isso, é possível encontrar o tempo que a peça fica exposta e a temperatura de saída após o fim do processo. Por fim, calcular uma taxa de resfriamento para determinar qual microestrutura e dureza esse componente se encontrará após o processo de convecção forçada no conduto.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor, 2023.

### 4.1. MATÉRIA PRIMA USADA NO EXPERIMENTO

Para esse processo de convecção forçada, foi usado o aço 34MnB5. Segundo a norma ASTM 255, o índice que indica a temperabilidade do material é DI (Diâmetro Ideal). Aços ao boro,

mesmo que em pequenas porcentagens, proporcionam uma temperabilidade elevada, sendo assim possível alcançar durezas sem a necessidade de têmpera. Os intervalos de composição do aço é de 0,36-0,4 % Carbono, 1,37-1,41% Manganês e 0,002-0,005 % Boro. O DI médio para esta composição é de 4,8 polegadas.

#### 4.2. COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS - CFD

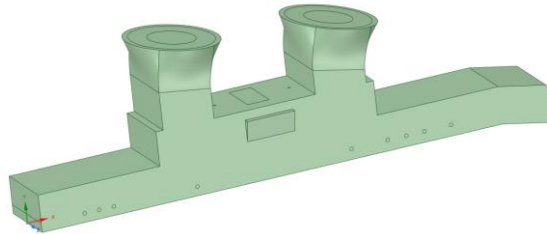
A aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) foi usada para calcular a velocidade do ar e como as linhas de correntes se distribuem no duto. Através do software comercial *Ansys®* foi possível realizar a análise das linhas de corrente, velocidades do ar e coeficiente convectivo, além da simulação de transferência de calor.

#### 4.3. SIMULAÇÃO 1

##### 4.3.1 Criação de Protótipo do Conduto

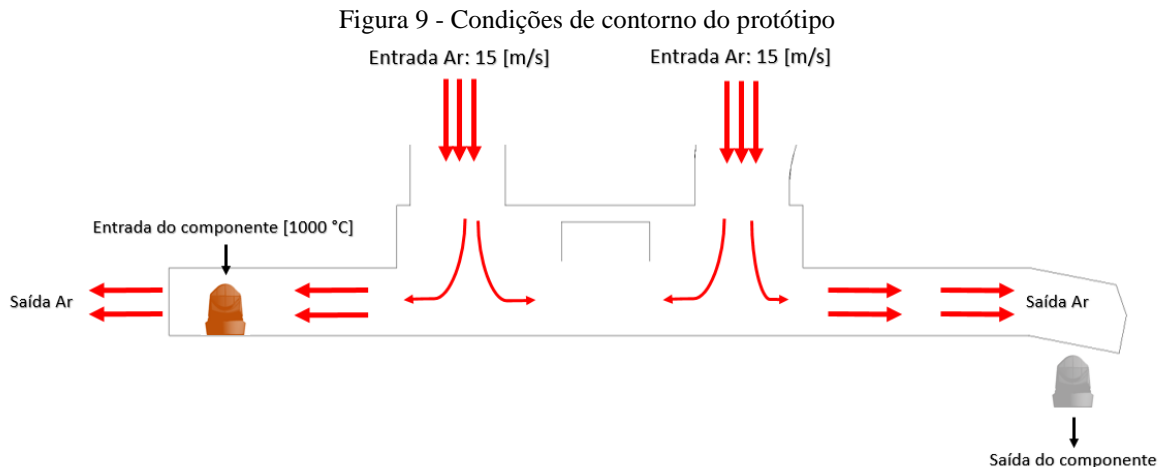
A etapa de criação do protótipo consistiu em avaliação do processo produtivo juntamente com avaliação de um conduto acoplado a uma esteira. Este processo estava com baixa eficiência no resfriamento dos componentes. Então, desenvolveu-se um conceito para avaliação CFD, conforme Figura 8.

Figura 8 - Protótipo da esteira desenvolvido no Software Ansys



Fonte: Autor, 2023.

Durante a elaboração do protótipo, também foram definidas as condições de contorno (Figura 9), considerando as duas entradas de ar a e a entrada do componente exposto à convecção forçada do ar, conforme Tabela 1 que lista também os demais parâmetros.



Fonte: Autor, 2023.

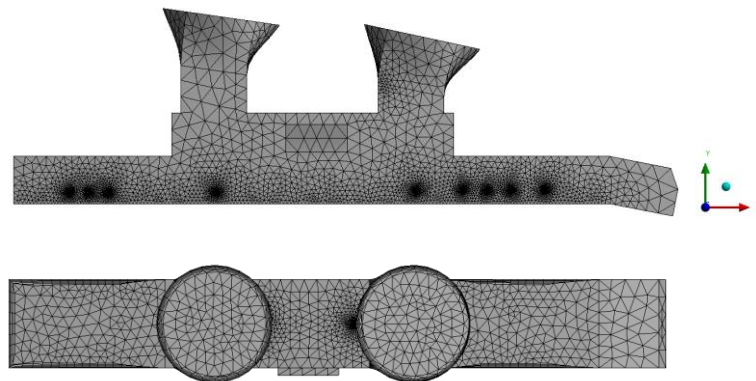
Tabela 1 - Parâmetros de Entrada da Simulação

Parâmetros de Entrada da Simulação	
Temperatura do Componente	1000°C
Temperatura Ambiente	25 °C
Velocidades de entrada do ar no conduto	15 [m/s]
Vazão dos Ventiladores	6,03 [m³/s]
Densidade do ar	1,2 [kg/m³]
Viscosidade Dinâmica do Ar	1,86 x 10 <sup>-5</sup> [N.s/m²]
Viscosidade Cinemática do Ar	1,51 x 10 <sup>-5</sup> [m²/s]
Calor específico do Ar	1000 [J/kg.K]
Calor específico do Aço	434 [J/kg.K]
Prandtl do Ar	0,7

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.3.2 Tipo de Malha

Para início dos estudos, criou-se a malha do protótipo no módulo *Fluent Solver* do *Ansys*. Foram gerados 242657 nós e 951911 elementos. Também, utilizou-se três métodos de malhas: tetraédricos em regiões mais complexas, hexaédrico em regiões mais simples e junto às paredes internas, o prismático (para melhor captura da camada limite do escoamento), conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Vista lateral e superior da malha aplicada via *Fluent Solver*

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.3.3 Qualidade da Malha CFD

O parâmetro adotado para a qualidade da malha, foi o fator de assimetria *Skewness*. Sendo o valor mais próximo de 0 o melhor, enquanto 1 representa a pior situação da malha gerada. O valor de *Skewness* médio de malha gerado foi 0,27171.

Figura 11 - *Skewness* médio dos elementos

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0,4
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,2412e-003
<input type="checkbox"/> Max	0,99869
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0,27171
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11803

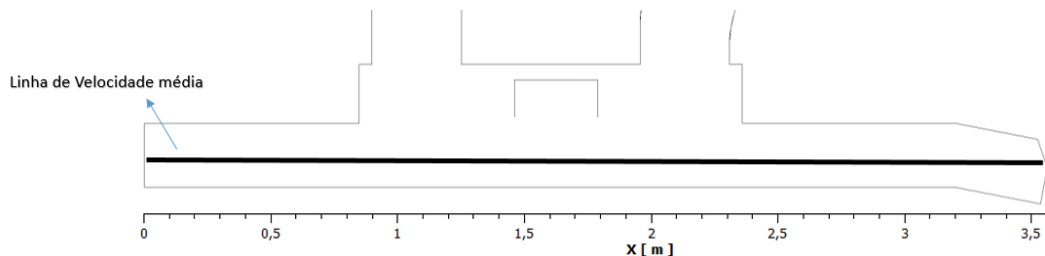
Fonte: Autor, 2023.

#### 4.3.4 Método da Solução CFD

Foi usado o parâmetro de densidade do ar constante, fluido incompressível e escoamento transiente. Para o cálculo do campo de velocidade-pressão usou-se o algoritmo *SIMPLE*. Considerou-se um modelo de turbulência *k-omega*. Resolveu-se a simulação 01 do conduto e, por conseguinte, extraiu-se a velocidade média ao longo da linha em função da posição, conforme Figura 12. Sabe-se que o número de MACH é o fator que determina se o escoamento é incompressível ou não, neste caso, adotou-se o escoamento incompressível visto que, é sabido que as velocidades dos ventiladores não ultrapassariam a velocidade do som, então o nível de velocidade foi o subsônico.

O modelo *k-omega* de turbulência de duas equações e é usado para aproximações das equações de Navier-Stokes com um número de Reynolds médio.

Figura 12 - Comprimento do conduto com a linha de velocidade média



Fonte: Autor, 2023.

#### 4.4 SIMULAÇÃO 2 - EXTRAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO

A simulação 2 foi configurada usando novamente o *Fluent Solver*, com um domínio fluido externo contendo o componente mecânico com uma temperatura inicial de 1000°C, conforme Figura 13.

A simulação 2 foi configurada como transiente. O modelo de turbulência usado foi *k-epsilon* com o tratamento de parede aprimorado e os efeitos térmicos selecionados, para um melhor refinamento na camada limite térmica entre fluido e componente. Por fim, na simulação 2 foi possível simular um coeficiente convectivo  $h$  em função da velocidade média do escoamento. Esse modelo é utilizado para simular a turbulência cinética específica ( $k$ ) que representa a energia turbulenta e ( $\epsilon$ ) que resolve a energia dissipada devido a viscosidade do fluido.



Figura 13 - Condições de contorno de convecção forçada

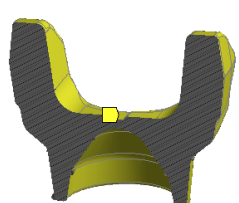


Fonte: Autor, 2023.

#### 4.5 SIMULAÇÃO 3 – SIMULAÇÃO DE CONVECÇÃO

A última simulação numérica, tratou de um modelo transiente de transferência de calor, usando o *Transient Thermal Ansys*®. O coeficiente convectivo médio, calculado pela simulação 2, é parâmetro de entrada junto a um tempo estimado, para assim, descobrir uma taxa de resfriamento. Foram usados 378940 nós e 1947161 elementos de malha tetraédricos. O parâmetro de qualidade de malha usado, foi *Skewness* médio de 0,25. A Tabela 2 apresenta as condições de contorno utilizadas para o cálculo de convecção forçada para a simulação 3.

Tabela 2 - Condições de contorno da simulação de convecção transiente

Parâmetros da Simulação de Convecção Transiente		
<p>A: Transient Thermal Convection Time: 300, s 16/08/2023 21:54</p> <p>Convection: 25, °C, 43,58W/m²*°C</p> 	Temperatura Inicial do Componente	1000 °C
	Temperatura ambiente	25 °C
	Coefficiente convectivo médio calculado	W/m²K
	Tempo de simulação	350 segundos

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.6 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

Com base nos resultado de simulações, construiu-se o protótipo do conduto, conforme Figura 14. Para os testes experimentais, na medição das velocidades do ar, usou-se de um Anemômetro, conforme Anexo 2. Na medição de temperaturas, de entrada e saída das peças, no processo de resfriamento por convecção, usou-se um Pirômetro, conforme Anexo 3.

Após o resfriamento das peças, verificou-se a dureza e microestrutura dos componentes. Para medir durezas em escala *Brinell* (HB), foi utilizado um durômetro, conforme Anexo 4, para cumprimento da norma ISO 6506 (Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza *Brinell*). Já na verificação da microestrutura, fez-se uso de um microscópio metalográfico com aumento de 100 vezes (conforme Anexo 5).

Figura 14 - Protótipo de convecção forçada para resfriamento de aço microligado



Fonte: Autor, 2023.

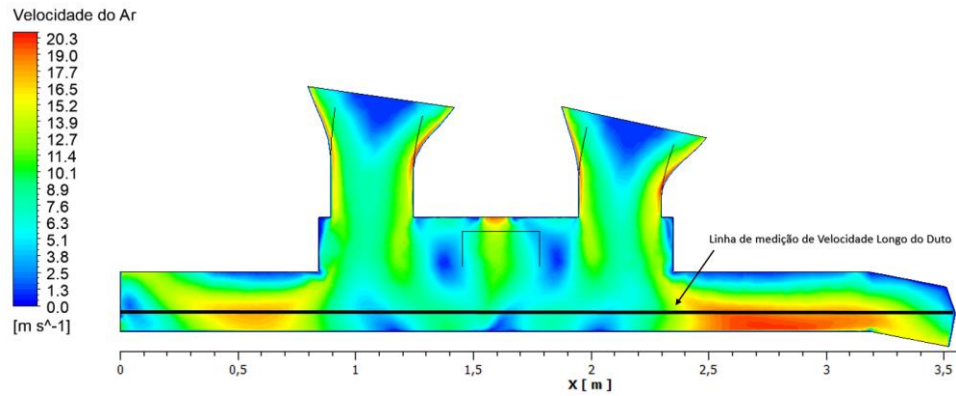
## 5. RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO 1

Com a análise numérica realizada no *Fluent* da *Ansys*® encontrou-se uma velocidade média de 11,41 m/s (Apêndice 1) ao longo da linha preta indicada, conforme Figura 15. A posição ou disposição das peças foram aleatórias, pois entram no conduto senod arremçadas pelo processo de forjamento. A Figura 16 ilustra a distribuição da velocidade ao longo do conduto e observou-se que as velocidades máximas se encontram no domínio 0,5m e 2,5m pois a pressão, nesses pontos do conduto, são menores. Já onde a pressão dentro do conduto é maior, como em 1,6m dentro do domínio, a velocidade é a mínima calculado.

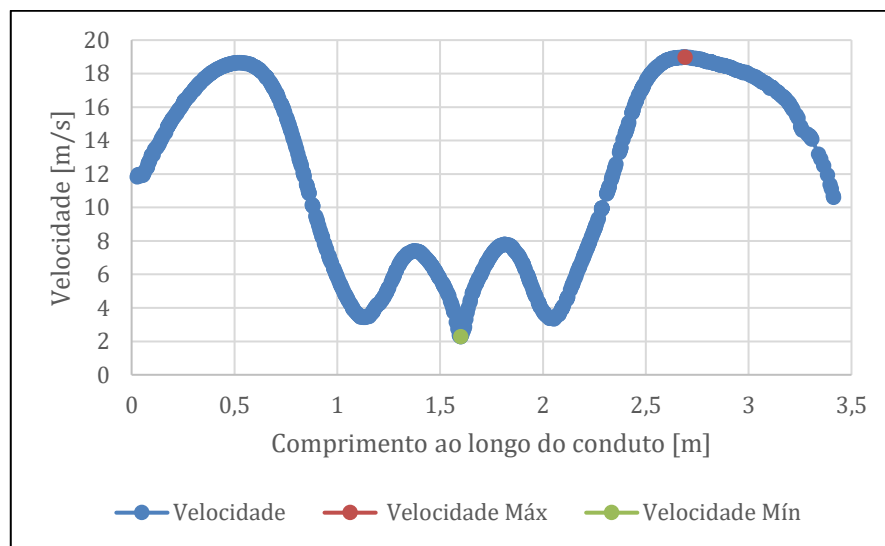
Esse resultado é validado pela Equação 5, Bernoulli ao longo de uma linha de corrente, visto que quando a pressão cai e a velocidade aumenta ou quando a pressão aumenta a velocidade diminui.

Figura 15 - Simulação 3D do campo de velocidades



Fonte: Autor, 2023.

Figura 16 - Velocidade ao longo da linha do conduto

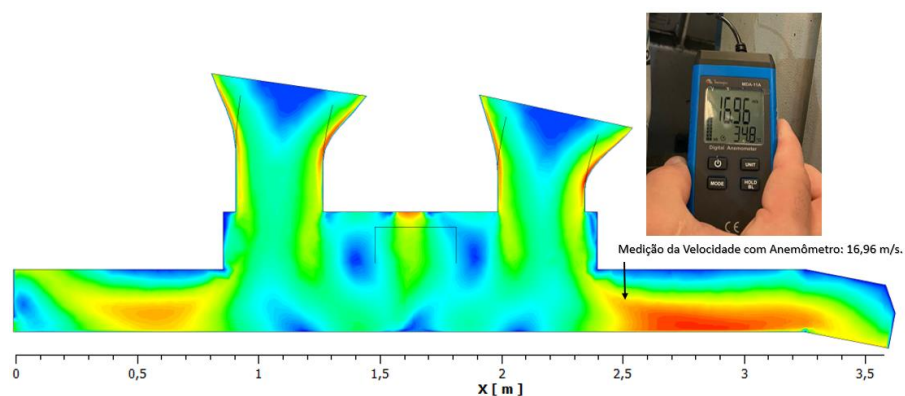


Fonte: Autor, 2023.

## 5.2 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO 1 COM PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

Após a construção do protótipo, verificou-se a velocidade do ar com anemômetro (Anexo 1) de 16,96 m/s. A medição foi feita na distância de  $x = 2,5$  m conforme indicado na Figura 17.

Figura 17 - Validação da velocidade do ar



Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 3 apresenta o resultado comparativo entre a medição do anemômetro e a simulação numérica pós a construção do protótipo. Verificou-se a velocidade do ar com anemômetro (Anexo 2) de 16,96 m/s.

Tabela 3 - Comparativo de velocidades: simulação x anemômetro

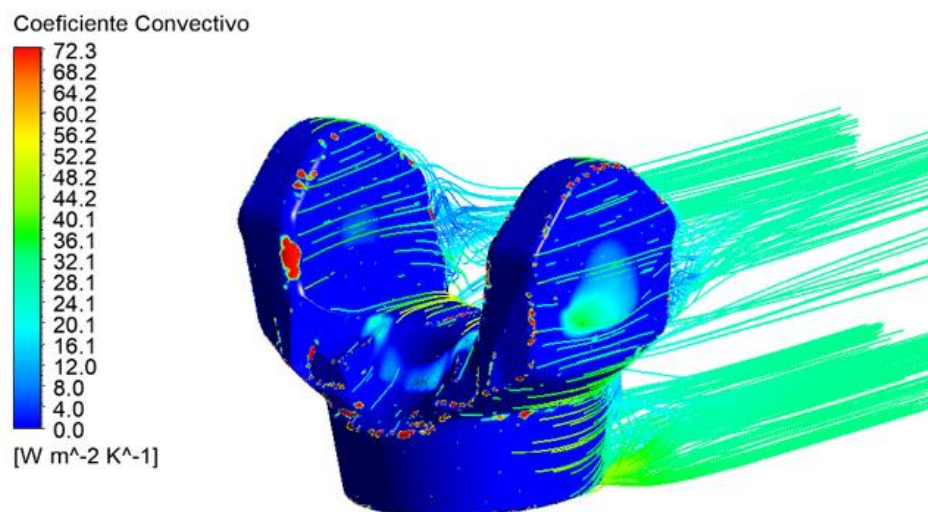
Comparativo de Velocidades: Simulação x Anemômetro		
Velocidade Anemômetro [m/s]	Velocidade Simulação [m/s]	Diferença %
16,96	17,59	3,58

Fonte: Autor, 2023.

### 5.3 ANÁLISE SIMULAÇÃO 2

Com a análise numérica realizada na simulação 2, na qual foi usado o valor de velocidade média obtido na simulação 1 (11,41 m/s) como condição de contorno de entrada, para assim a verificação do coeficiente convectivo médio ( $h$ ) de 43,53 W/m<sup>2</sup>K, conforme Figura 18. A simulação foi feita com o *Fluent* da *Ansys*®. Esse resultado, segundo Bergman *et al.* (2014), está dentro da faixa de transferência de calor via convecção forçada para gases de 25-250 W/m<sup>2</sup>K. A orientação espacial desta peça na simulação não é padronizada, pois, no processo real, as peças entram no conduto de forma aleatória.

Figura 18 - Simulação da convecção forçada

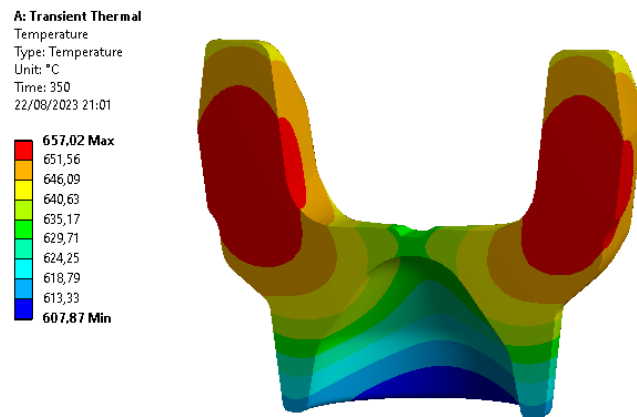


Fonte: Autor, 2023.

### 5.4 ANÁLISE SIMULAÇÃO 3

Analisou-se a simulação 3, usando o *Transient Thermal* do software *Ansys*®. As condições de contorno desta simulação foram: o coeficiente convectivo (43,53 W/m<sup>2</sup>K), temperatura inicial a 1000°C, temperatura ambiente de 25°C e o um tempo de 350 segundos. Tais parâmetros de entrada, geram os dados de saída, conforme Figura 19. Através dos resultados obtidos, conforme Tabela 4, foi possível calcular uma taxa de resfriamento de 1,05 °C/s, a partir da curva de resfriamento, indicada na Figura 20.

Figura 19 - Simulação da taxa de resfriamento



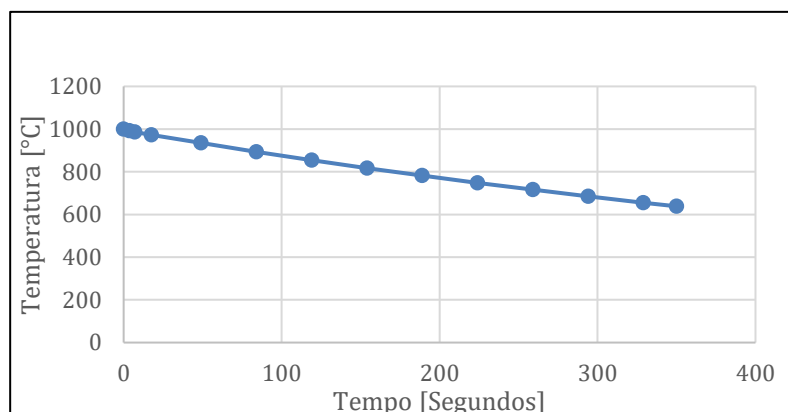
Fonte: Autor, 2023.

Tabela 4 - Parâmetros da Simulação 3

Parâmetros da Simulação 3	
Temperatura Inicial do Componente	1000°C
Temperatura Final do média	632°C
Tempo de processamento	350 segundos
Taxa de resfriamento	1,05 °C/s

Fonte: Autor, 2023.

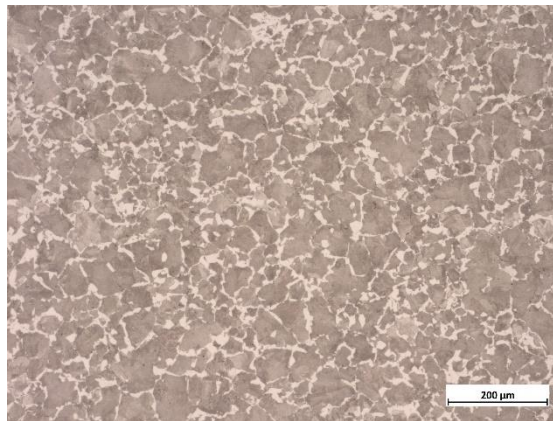
Figura 20 - Curva de Resfriamento Simulada



Fonte: Autor, 2023.

Foi averiguado, via microscopia optica, a microestrutura resultante dos testes feitos. A Figura 22, mostra a microestrutura resultante do processo de resfriamento Perlita, grãos mais escuros e Ferrita grãos claros. O tamanho de grão verificado foi de 5-8, seguindo norma ASTM E 112. Para tal taxa de resfriamento, segundo Colpaert (2008), de 1°C/s, observa-se a formação da perlita, conforme Anexo 6.

Figura 21 - Imagem ampliada 100x. Ataque nital 3%. Microestrutura perlita e ferrita.



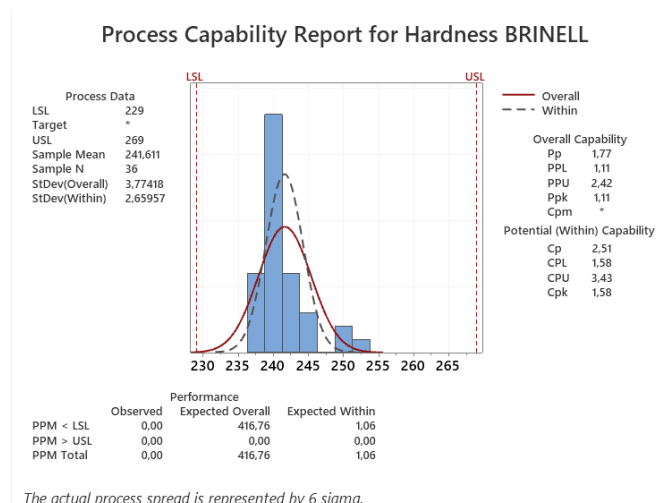
Fonte: Autor, 2023.

## 5.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foram feitos centenas de componentes testes, para validar o protótipo. E para análise do controle estatístico, foram preparados 36 corpos de prova que são mostrados conforme Apêndice 4. Na figura 21, observa-se o controle estatístico do processo, com  $C_p$  2,51 e  $C_{pk}$  1,58. Tais resultados, dão ao processo capacidade de se manter estável e com segurança, segundo Ribeiro e Caten (2012).

Com a taxa de resfriamento calculada, foi possível verificar uma dureza média, nos componentes, de 241 HB. Os dados da análise estão indicados na Tabela 5.

Figura 22 - Análise de Capacidade Estatística do Processo



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5 - Controle Estatístico do Processo

Controle Estatístico do Processo	
Dureza média	241,6 HB
Desvio padrão	3,77 HB
$C_p$	2,51
$C_{pk}$	1,58

Fonte: Autor, 2023.

## 6. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho foram atendidos. Com o ensaio experimental, evidencia-se a importância da análise de simulações numéricas para a predição de fenômenos físicos, assim podendo desenvolver e otimizar processos.

Os resultados encontrados nas simulações foram o norte para desenvolver o processo de resfriamento controlado no aço 34MnB5, para componentes de eixo cardan. Comprovou-se que, a velocidade do ar é um fator determinante ao coeficiente convectivo, e que melhorada a taxa de transferência de calor, foi possível atingir os resultados de resistência mecânica propostos ao produto (241 HB).

A simulação 1, teve como objetivo verificar a velocidade média do ar ao longo de uma linha aproximada de onde as peças passam no processo de resfriamento. O resultado da velocidade média encontrada, através da simulação numérica foi de 11,41m/s, que foi a condição de contorno para a simulação 2. Para validar o modelo de simulação, em um mesmo ponto de 2,5m no conduto, foi analisada a velocidade do ar via simulação numérica, com resultado de 17,59m/s, e via experimento medido com anemômetro de 16,96m/s que apresentou uma baixa diferença percentual de 3,58% entre as velocidades.

Utilizando o resultado da velocidade média da simulação 1, foi possível calcular um coeficiente convectivo médio ao longo do conduto com a peça a 1000°C. Para tais condições de contorno, a simulação 2 apresentou como resultado o coeficiente convectivo de 43,53 W/m<sup>2</sup>K. Sendo o  $h$  em convecção forçada para gases de 25 a 250 W/m<sup>2</sup>K o resultado foi satisfatório pois se encontra dentro desse intervalo.

Para a simulação 3, fez-se um cálculo numérico de transferência de calor transiente utilizando as condições de contorno: coeficiente convectivo calculado da simulação 2 de 43,53W/m<sup>2</sup>K aplicada no componente mecânico a 1000°, temperatura ambiente do ar de 25°C e 350 segundos de tempo para resfriamento. Tais dados de entrada, geraram uma taxa de resfriamento de 1,05°C/s.

Para validação dos resultados, fez-se o estudo estatístico do processo. Foram preparados 36 corpos de prova dos lotes testes para validar microestrutura e durezas. A dureza média encontrada foi de 241 HB com desvio padrão de 3,77 HB e microestrutura perlítica ferrítica. Para controle do processo, verificou-se um Cp de 2,51 (que avalia a capacidade do processo) e Cpk de 1,58 (que avalia a distância média do processo às especificações mais próximas dessa média).

Por fim, conclui-se a partir das simulações realizadas, da análise experimental e do estudo estatístico que o processo de resfriamento por convecção forçada opera de forma previsível e capaz. Tal afirmação se dá de acordo com as especificações de Cp maior que 1,33 e Cpk maior que 1, na indústria, referente aos resultados de medição de durezas após o processo de resfriamento das peças.

## 7. REFERÊNCIAS

BERGMAN, Theodore L. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BUTTON, S. T.; Lima, C. A., **Sistemas flexíveis de ferramental**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, 1995.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. aum. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 860 p. ISBN 978-85-216-3103-3.

ÇENGEL, Yunus A. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2007.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COSTA E SILVA, Andre Luiz V. da; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2021.

DANA. **Vida longa aos eixos cardan**. Disponível em: <https://dana.com.br/dana-informa/vida-longa-aos-eixos-cardan/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

DANA. **Cardans: entendendo os eixos cardans**. Disponível em: [https://spicer.com.br/downloads/Spicer\\_Manual\\_Entendendo\\_Cardan.pdf](https://spicer.com.br/downloads/Spicer_Manual_Entendendo_Cardan.pdf). Acesso em: 28 ago. 2023.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Fluid Mechanics and Its Applications). v. 113 *E-book*. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-16874-6>. Acesso em: 27 ago. 2023.

REINSCH, Steffen *et al.* Advanced manufacturing system for forging products. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 138, n. 1, IMCC2000, p. 16–21, 2003.

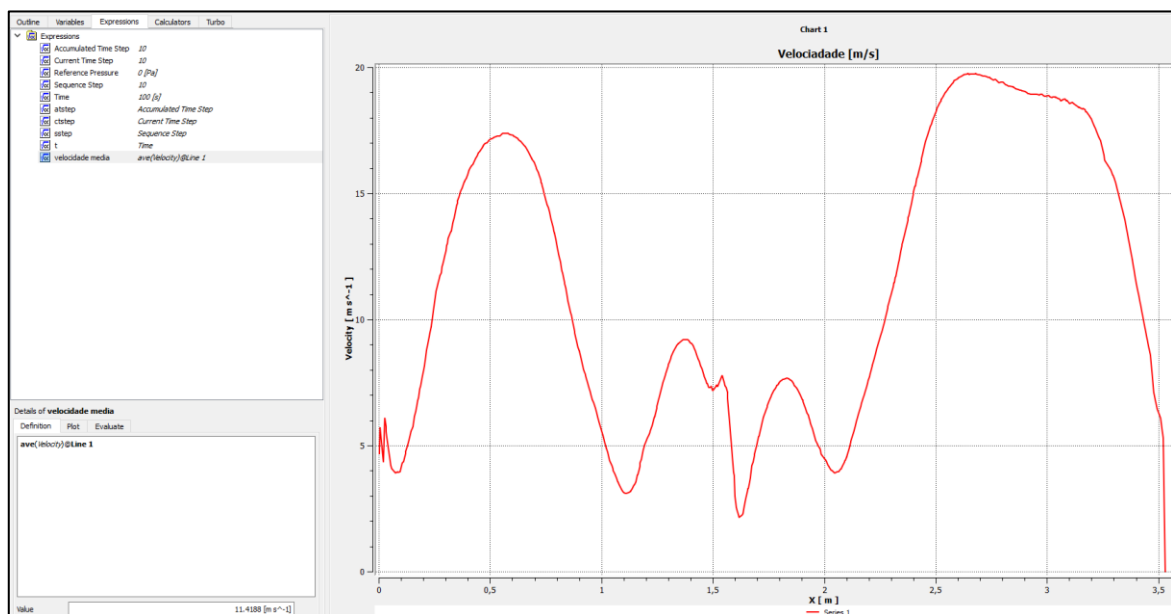
RIBEIRO, Jose Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber ten. **Série Monográfica Qualidade: Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012.



SOUZA, Edilson Guimarães *et al.* Determinação do Lote Crítico de Forjados a Quente, por Meio de Análise Térmica, Visando Reduzir o Consumo de Energia em Tratamento Térmico. [s. l.], 2009.

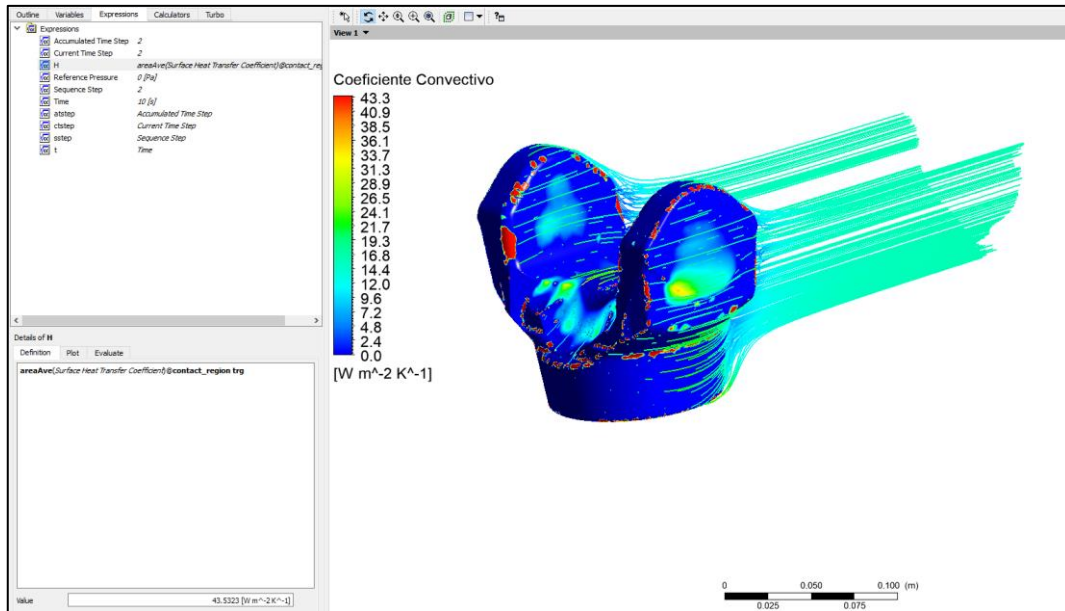
## 8. APÊNDICES

Apêndice 1 – Resultado gráfico da simulação 1, referente a velocidade do ar ao longo do duto e a velocidade média ao longo de uma linha, extraída com o comando `ave(velocity)@Line1` no software Ansys.



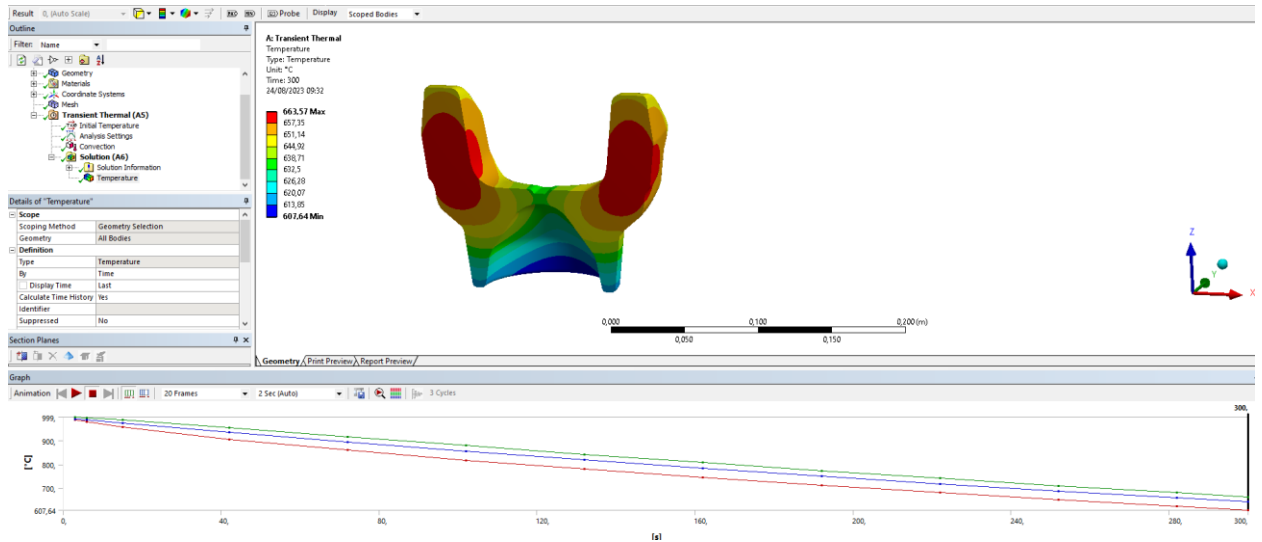
Fonte: Autor, 2023.

Apêndice 2 – Resultado da simulação 2, referente ao coeficiente convectivo médio ao longo do duto extraído com o comando `AreaAve(Surface Heat Transfer Coefficient)@contact_region trg` no software Ansys.



Fonte: Autor, 2023.

Apêndice 3 – Resultado da simulação 3, referente a taxa de resfriamento no software Ansys.



Fonte: Autor, 2023.

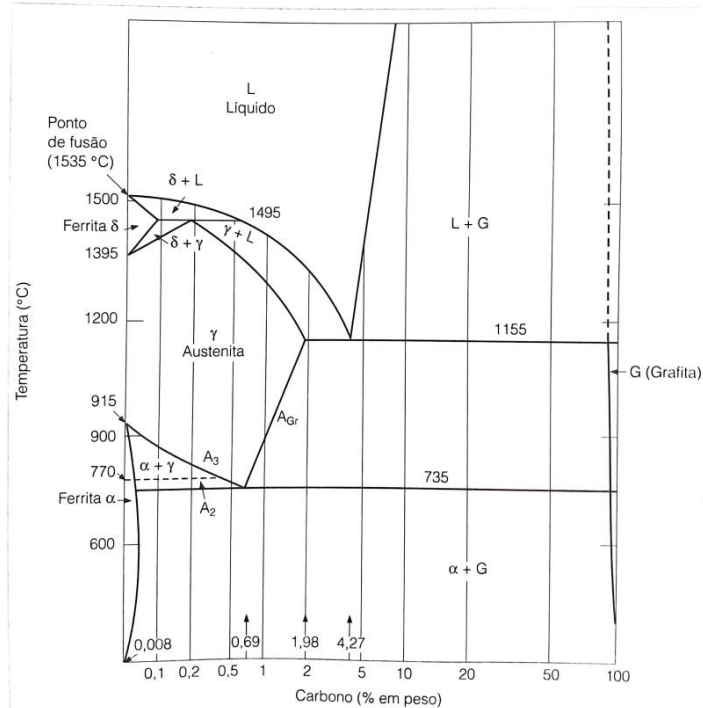
Apêndice 4 – 36 corpos de prova preparados para análise metalográfica e controle estatístico do processo.



Fonte: Autor, 2023.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1 – Diagrama de Equilíbrio ferro-grafita.



Fonte: Costa e Silva (2021).

Anexo 2 - Anemômetro MDA-11 da Minipa é o equipamento utilizado para medição de velocidades do ar do protótipo para os experimentos de convecção forçada.



Fonte: Minipa do Brasil, 2023.

Anexo 3 - Pirômetro Digital Raytek Raynger 3i Plus é o equipamento utilizado para medição de temperaturas para os experimentos de convecção forçada.



Fonte: Fluke Company, 2015.

#### Anexo 4 – Durômetro Brinell



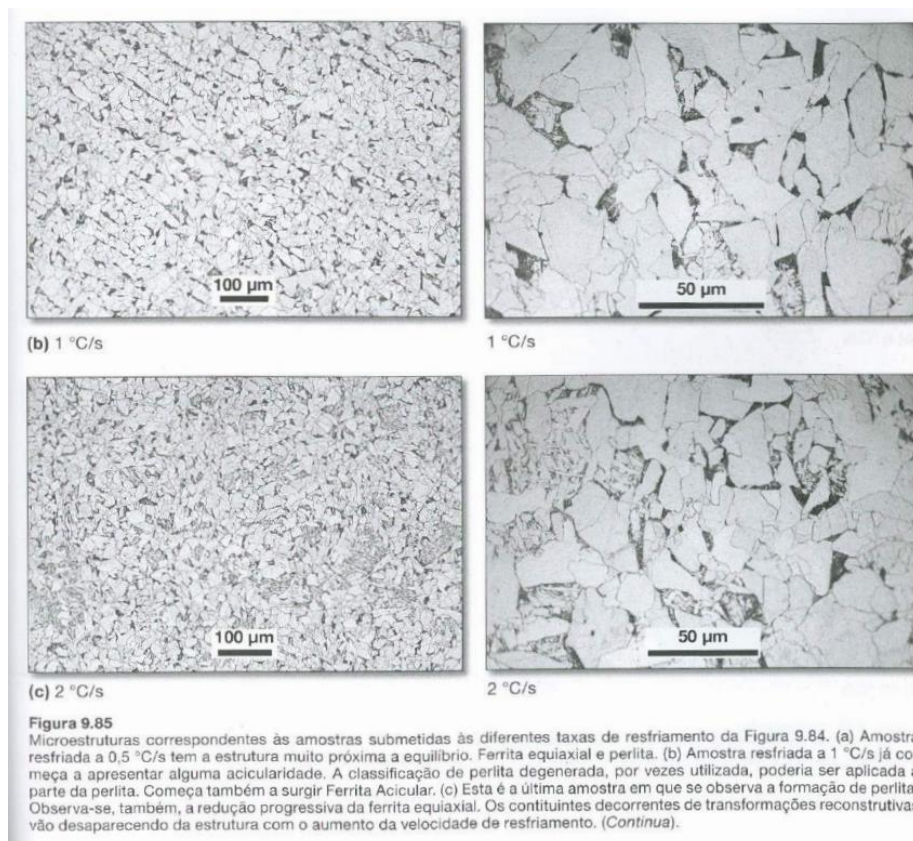
Fonte: Digimess, 2023.

#### Anexo 5 – Microscópio metalográfico usado para validação das microestruturas.



Fonte: Teclago, 2023.

Anexo 6 – Foto de microestrutura perlita e ferrita formada em um aço com taxa de resfriamento entre  $1^{\circ}\text{C/s}$  e  $2^{\circ}\text{C/s}$ .



Fonte: Colpaert 2008.