

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

PAULO ANDRÉ BOSCHI BOSSARDI

**ANÁLISE DA TROCA TÉRMICA APÓS FORJAMENTO DOS EIXOS DE
ACIONAMENTO DE FREIO EM ESTEIRA DE RESFRIAMENTO**

CAXIAS DO SUL

2022

PAULO ANDRÉ BOSCHI BOSSARDI

**ANÁLISE DA TROCA TÉRMICA APÓS FORJAMENTO DOS EIXOS DE
ACIONAMENTO DE FREIO EM ESTEIRA DE RESFRIAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290)
apresentado à Universidade de Caxias do Sul
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico. Área de concentração:
Engenharia Térmica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

CAXIAS DO SUL

2022

PAULO ANDRÉ BOSCHI BOSSARDI

**ANÁLISE DA TROCA TÉRMICA APÓS FORJAMENTO DOS EIXOS DE
ACIONAMENTO DE FREIO EM ESTEIRA DE RESFRIAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290)
apresentado à Universidade de Caxias do Sul
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico. Área de concentração:
Engenharia Térmica.

Aprovado em 12/12/2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini – UCS

Prof. Dra. Camila Baldasso – UCS

Me. Eng. Giovanni Matheus Rech – Convidado

RESUMO

O processo de forjamento de metais é muito antigo e vem passando por diversas modificações ao longo dos anos. As empresas buscam otimizar esse processo, com o intuito de diminuir o tempo de ciclo de fabricação de uma peça, tornando-o mais eficiente. Para isso e visando um aumento produtivo, surgem no mercado algumas soluções robotizadas. Em uma célula robotizada de forjamento, um dos principais pontos de atenção é o método de resfriamento da peça, que impacta diretamente no tempo do ciclo de fabricação. Esse estudo tem como objetivo analisar a troca térmica após o forjamento dos eixos de acionamento de tambor de freio. Desse modo, foi observado o eixo em uma esteira de resfriamento, onde dois métodos de transferência de calor foram avaliados. A convecção natural com a peça inicialmente a uma temperatura aproximada de 950 °C, sendo o intervalo de temperatura requerido em torno de 450 °C. Posteriormente, foi analisada a convecção forçada, de modo que o eixo saia do processo com temperatura inferior a 50 °C, sem os processos subsequentes. Com isso, foi realizada análise dimensional, levando em consideração o comportamento do eixo de acionamento de freio após o aquecimento, para que, dessa forma, possa ser definido o comprimento efetivo da esteira responsável por todo processo. Para a efetividade do trabalho foram realizados testes e ensaios práticos envolvendo o eixo de acionamento de freio, comparando-se os resultados obtidos nesses ensaios com aqueles encontrados no estudo analítico (Método da Capacitância Global e Integração convecção-radiação) e em simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) do processo de resfriamento. Como houve alguma discrepância entre as análises efetuadas, baseou-se nos resultados dos ensaios práticos para a definição do comprimento da esteira. Nos ensaios práticos, o tempo total de resfriamento considerando os dois processos envolvidos foi de 37,5 min, sendo 13 min para o resfriamento através da convecção natural e 24,5 min para a convecção forçada. Diferente dos resultados encontrados via simulação CFD e analiticamente através de cálculos, onde o tempo encontrado para o resfriamento em convecção natural através do Método da Capacitância Global ficou 38% maior do encontrado na simulação prática e pelo método da integração 45% menor. Já na simulação CFD, o tempo foi concordante com o encontrado na prática. Para os cálculos envolvendo a convecção forçada, o resultado obtido pelo Método da Capacitância Global ficou 30% maior que o encontrado na prática e considerando o método da integração, a diferença caiu para 6% apenas. Na simulação CFD a diferença foi 63% maior que o encontrado na prática. Com base nisso e considerando dessa forma os resultados encontrados em ensaio prático a esteira chegou a definição dimensional de 9 m de comprimento.

Palavras-chave: Forjamento; Eixos de tambor de freios; Esteira de resfriamento; Convecção natural; Convecção forçada, CFD.

Áreas de conhecimento: Engenharia Térmica; Transferência de Calor;

ABSTRACT

The process of forging metals is ancient and has been undergoing change over the years. They seek to optimize this process, as more efficient companies in order to reduce the manufacturing cycle time of a part. For this, and sometimes more productive, there is no market for robotic solutions. In a robotic forging cell, one of the main points of attention is the cooling of the part, this method directly impacts the manufacturing cycle time. This study aims at the thermal exchange after the drive axles of the brake drum, this way the axle will be observed in a cooling mat, where two methods of heat download was received. Natural cooling with a partial part at a temperature of approximately 950 °C, whose temperature range required for the process is around 50 °C and then the compensation which must act so that the part must act in the process with a temperature later below 50 °C and does not affect the other subsequent processes. With this, a dimensional analysis was carried out, taking into account the behavior of the brake drive shaft after the assembly, to define the effective length of the belt for the whole process. Thus, a dimensional analysis was carried out, taking into account the behavior of the brake drive shaft after heating, so that, in this way, the effective length of the mat responsible for the entire process could be defined. For the effectiveness of the work, tests and practical tests were carried out involving the brake drive shaft, comparing the results obtained in these tests with those found in the analytical study (Global Capacitance Method and Convection-Radiation Integration) and in CFD simulations (Computational Fluid Dynamics) of the cooling process. If there was any discrepancy between the analyzes carried out, it was based on the results of the practical tests to define the length of the mat, whose total cooling time considering the two processes involved was 37.5 min, with 13 min for cooling through the natural convection and 24.5 min for forced convection. Unlike the results found via CFD simulation and analytically through calculations, where the time found for cooling in natural convection through the global capacitance method was 38% higher than that found in the practical simulation and by the integration method 45% lower, already in the simulation CFD time closed with that found in practice. For the calculations involving forced convection, the result obtained by the global capacitance method was 30% greater than that found in practice, considering the integration method, this difference decreased by only 6% greater. In the CFD simulation, this value was extrapolated and reached 60% higher than that found in practice. Based on this and considering the results found in a practical test, the mat reached the dimensional definition of 9 m in length.

Keywords: Forging; Brake drum axles; Cooling conveyor belt; Natural convection; Forced convection; CFD.

Areas of knowledge: Thermal Engineering; Heat transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de forjamento a quente em matriz fechada com rebarba na peça.	17
Figura 2 – Sistema de forjamento onde: (1) Tarugo cortado; (2) Ferramental; (3) Interface ferramenta/material; (4) Zona de deformação; (5) Equipamento de forjamento; (6) Produto final; (7) Folha 2D.	18
Figura 3 – Recalcagem em duas extremidades com cinco passes.	20
Figura 4 – Demonstração de matrizes de forja. Matriz aberta (open-die); Matriz fechada (closed-die).	21
Figura 5 – Sistema de freio a tambor tipo s came.	23
Figura 6 – Desenvolvimento de camada-limite na transferência de calor por convecção em placa plana	25
Figura 7 - Layout 3D da célula de forjamento do eixo de acionamento de freio	34
Figura 8 - Eixo s modelo 16,5qp diâmetro de 39,67 mm e comprimento de 460 mm. ...	35
Figura 9 – Fluxograma de atividades	37
Figura 10 - Eixos testados no banho de sal	38
Figura 11 - Disposição dos eixos nos ensaios de resfriamento	39
Figura 12 - Aparelho medidor de temperatura dos eixos	40
Figura 13 - Resfriamento dos eixos em convecção natural	40
Figura 14 - Resfriamento dos eixos em convecção forçada	41
Figura 15 - Resfriamento dos eixos em convecção natural seguido de convecção forçada	42
Figura 16 - Volume do eixo modelo 16,5 qp.....	44
Figura 17 - Área superficial do eixo modelo 16,5 qp.....	44
Figura 18 - Domínio do eixo modelado com elementos poliédricos.....	48
Figura 19 - Domínio do ar envolvente ao eixo.....	48
Figura 20 - Malha no ar na proximidade imediata ao eixo.....	49
Figura 21 - Malha aumentada no ar próximo	49
Figura 22 - Resultados da simulação na convecção natural	50
Figura 23 - Tempo de resfriamento na cabeça do eixo “s”	50
Figura 24 - Domínio do ar envolvente ao eixo com círculo representando ventilador ..	51
Figura 25 - Malha de elementos ao redor do eixo e no espaço destinado ao ventilador	52

Figura 26 - Resultados da simulação CFD para o resfriamento com convecção forçada	52
Figura 27 - Transporte dos eixos pela esteira transportadora	54
Figura 28 - Representação da esteira com ventiladores a partir de um corte no seu eixo	56
Figura 29 - Representação da esteira com ventiladores em 3D.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de transferência de calor por convecção para algumas situações	26
Tabela 2 - Resultados obtidos em processo.....	53

LISTA DE SIGLAS

ASM	<i>American Society for Metals</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrada
CFC	Cúbica de Face Centrada
RTS	<i>Randon Tech Solutions</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>

SIMBOLOGIA

qx''	Fluxo térmico (W/m ²)
k	Condutividade térmica (W/(m·K))
T_2	Temperatura final (°C)
T_1	Temperatura inicial (°C)
L	Largura da parede ou sólido (mm)
ΔT	Varição de temperatura (°C)
\dot{q}_x	Taxa de transferência de calor na direção x (W)
A	Área superficial da parede plana (m ²)
q''	Fluxo de calor por convecção (W/m ²)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² ·K)
T_s	Temperatura superficial (K)
T_∞	Temperatura do fluido (K)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ε	Emissividade
E	Poder emissivo
$ Fo$	Número de Fourier
$ Bi$	Número de Biot
$ G$	Irradiação
$ G_{abs}$	Irradiação absoluta
$ \alpha$	Absortividade
$ h_r$	Coefficiente de transferência de calor por radiação (W/m ² ·K ⁴)
$ T_{viz}$	Temperatura da vizinhança (K)
$ \rho$	Massa específica (kg/m ³)
$ \dot{E}_{sai}$	Taxa de transferência de energia para fora do volume de controle (W)
$ \dot{E}_{acu}$	Taxa de aumento da energia acumulada no interior de um volume de controle (W)
$ V_c$	Volume do corpo (m ³)
$ L_c$	Comprimento característico (m)
$ t$	Tempo (s)

Q Transferência de energia (kJ)

θ Diferenças de temperaturas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 PROCESSO DE FORJAMENTO	16
2.1.1 Corte de matéria prima.....	17
2.1.2 Aquecimento de <i>blank</i>	18
2.1.3 Recalque de <i>blank</i>	19
2.1.4 Forjamento de <i>blank</i>.....	20
2.1.5 Rebarbação e calibração de <i>blank</i>.....	22
2.1.6 Jato de granalha	22
2.2 EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO.....	23
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
2.3.1 Condução.....	24
2.3.2 Convecção.....	24
2.3.3 Radiação	26
2.4 CONDUÇÃO TRANSIENTE.....	27
2.4.1 Método da Capacitância Global.....	28
2.4.2 Número de <i>Biot</i>	29
2.4.3 Análise geral via capacitância global.....	30
2.5 RESFRIAMENTO CONTROLADO EM PEÇAS FORJADAS	32
2.6 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA	32

3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 CÉLULA DE FORJAMENTO DO EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO ...	34
3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO	35
3.3 PROPOSTA DE CÁLCULOS E SIMULAÇÃO	36
3.4 INSTRUMENTAÇÃO DE MEDIÇÃO	36
3.5. FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 TESTE PRÁTICO E COLETA DE DADOS	38
4.2 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAL	40
4.3 RESULTADOS ANALÍTICOS	43
4.4 RESULTADOS SIMULADOS VIA CFD	47
4.5 EXPERIMENTO PRÁTICO NO <i>LAYOUT</i> FÍSICO	53
4.6 ESTIMATIVA DIMENSIONAL DE ESTEIRA E VENTILADORES	54
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A troca térmica de materiais aquecidos pode ser considerado um risco na engenharia em virtude dos processos que a antecedem ou os processos posteriores. O próprio método de resfriamento pode mudar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais ou até mesmo ocasionar fraturas e trincas nos mesmos.

A conformação mecânica é uma área da engenharia que se divide em trabalhos a quente e a frio, em que o forjamento de materiais a altas temperaturas é um processo delicado, em que o mínimo de tempo hábil para manipulação de peças pode gerar perdas em um ciclo de trabalho.

Os mecanismos de transferência de calor são comuns em métodos que exigem aquecimento em elevadas temperaturas. Dentre os três principais mecanismos de transferência, a convecção frequentemente pode ser visualizada em processos industriais, porém, nem sempre é o método mais eficaz e produtivo para esse segmento.

O presente trabalho analisa o projeto de uma esteira que tem como objetivo o resfriamento após o forjamento dos eixos de acionamento de freio em uma célula de robotização com diferentes estágios de conformação a quente.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Fundada em outubro de 2020, a *Randon Tech Solutions* ou *RTS Industry* está localizada na Rua João Meneghini número 489, Bairro Interlagos em Caxias do Sul. É uma empresa do grupo Randon com o intuito de implementar automação industrial aos processos das empresas do grupo, baixando o custo em mão de obra e aumentando a produtividade final dos produtos, assim visando a qualidade nos processos de fabricação.

A empresa atua desde a solução implícita solicitada pela empresa contratante, cliente, com projetos conceituais e esboços iniciais, prevendo a necessidade para o processo em análise. A partir disso, elabora o projeto mecânico se necessário, a integração de automação com toda a programação vinculada, a fabricação mecânica, o *try out* internos e externos e a entrega técnica com documentos de aceite. Os projetos elaborados pela empresa possuem uma ampla variedade de aplicações, podendo ser gabaritos e dispositivos mecânicos, ferramentas manuais e de máquinas, máquinas especiais e células robotizadas.

O trabalho apresentado neste TCC é uma demanda vinda da empresa Master Sistemas Automotivos, onde a *RTS* participa da integração de uma célula robotizada para forjamento dos

eixos tipo “s” e “z” do tambor de freio. Com isso, a empresa entregará a solução autônoma vinculada aos robôs, solução mecânica com agregados internos e fabricação de duas esteiras de entrada e de saída com sistema de resfriamento dos eixos. Além disso, a *RTS* deverá entregar toda a instalação elétrica e segurança da célula robotizada, com *try outs* e validação do processo dentro da Master.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Master não possui processos de fabricação do eixo s e z, que são adquiridos por fornecedores externos à empresa. Isso inviabiliza a produção em massa do componente para atender os clientes da empresa e até mesmo a comercialização do produto de forma avulsa. Desse modo, a Master elaborou a implementação de uma célula robotizada para fabricação do componente internamente, com a capacidade de produção de uma peça a cada 28 segundos, totalizando em um ciclo produtivo de 8 horas, em torno de 1028 peças produzidas por dia.

O eixo s possui esse nome pelo formato semelhante ao da letra “S”, o qual é responsável pelo comando de freio e quando o sistema de frenagem é acionado, o eixo s movimenta os patins, gerando atrito entre o tambor e a lona de freio. Por esse motivo, esse componente é de extrema importância para o conjunto de freio de uma carreta rodoviária. Se este produto não for fabricado de forma adequada ou com o material apropriado para o trabalho, poderá ocasionar na perda do freio de um veículo em movimento. Sendo assim, esse componente é tratado como um item de segurança do conjunto de freio de um veículo motorizado.

Posto isto, é de suma importância para o projeto conhecer todo o processo de forjamento desse componente e entender quais são os requisitos para o resfriamento do mesmo após o ciclo de fabricação. Isso serve para definir os componentes necessários para o transportador no processo de resfriamento. Além disso, garantir o dimensional necessário para abranger as necessidades do eixo no processo, fazendo com que saia da esteira com no máximo de 50 °C e não tenha complicações para a gravação posterior e o jateamento como acabamento final.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o processo de resfriamento dos eixos de fricção de freio após processo de forjamento, respeitando a formação da microestrutura do

material, e levantando as informações necessárias para implementação de uma esteira de transporte dos eixos ao longo do seu resfriamento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Com base no objetivo geral são definidos alguns objetivos específicos para dar sequência a esse TCC:

- a) caracterizar o processo de forjamento e posterior resfriamento, de eixos tipo s e z;
- b) identificar os fenômenos de transferência de calor envolvidos no resfriamento dos eixos;
- c) estimar analiticamente o tempo de resfriamento dos eixos;
- d) avaliar experimentalmente o tempo de resfriamento dos eixos para verificar as propriedades metalográficas do material;
- e) definir a seção da convecção forçada das peças em estudo, através da esteira transportadora;
- f) avaliar o processo final de resfriamento para verificação das análises obtidas e definição dimensional da esteira.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE FORJAMENTO

Forjamento é um processo muito antigo existente na engenharia de conformação mecânica de materiais, frequentemente relacionado ao processo de fabricação de espadas ou lâminas por antigos ferreiros em séculos passados. (ALTLAN, 2005) destaca que “o forjamento é uma tecnologia orientada para a experiência. Ao longo dos anos, muitos *know-how* acumularam ainda mais a experiência neste campo, em grande parte por métodos de tentativa e erro”.

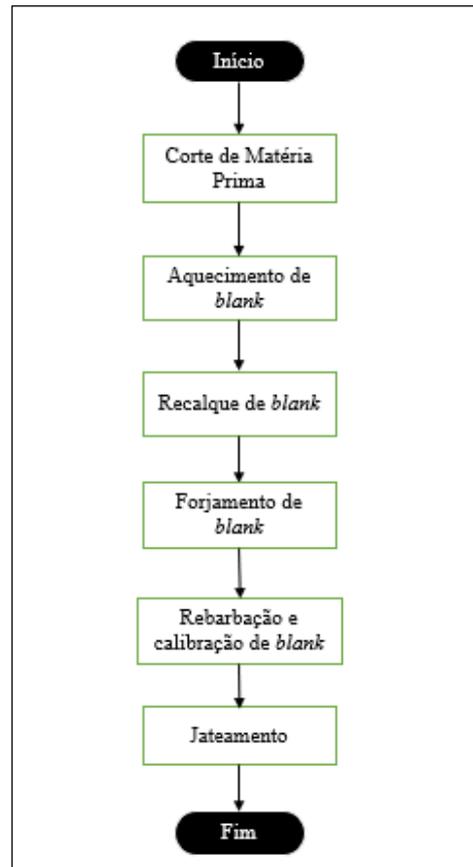
O processo consiste na transformação de matéria-prima ou blank em um produto útil com uma grande variedade de geometria gerada. Esse processo ocorre por meio de deformação plástica através de prensagem ou martelagem. A prensa utilizada nesse processo pode ser mecânica ou hidráulica e a geometria desejada é definida com o auxílio de matrizes usinadas com material específico. Frequentemente, o processo de forjamento ocorre com peças aquecidas, chamando-se então de forjamento a quente, porém existem alguns materiais que podem ser forjados a frio. (GUINSBURG, 2021).

A matriz ou estampo de um forjamento pode ser aberta, fechada ou livre, dependendo da aplicação, da complexidade e da característica da peça desejada. Matrizes abertas e livres tendem a ser utilizadas em geometria ligeiramente mais simples que em matrizes fechadas, essas matrizes ainda possuem uma capacidade maior de utilização em peças grandes. Os estágios de fabricação são praticamente iguais entre um tipo de matriz e outro, variando conforme o estampo a ser utilizado e as características finais da peça.

Comparadas com outros processos de engenharia e conformação mecânica, as peças forjadas possuem fibras orientadas. Isso eleva consideravelmente a resistência mecânica do material e gera grãos com uma estrutura mais fina em seu acabamento final, eliminando, dessa forma, a existência de porosidades nessas peças.

A Figura 1 apresenta um fluxograma de um processo de forjamento a quente, em matriz fechada com rebarba. No fluxograma são identificadas as etapas do processo de forjamento, as quais são tratadas posteriormente.

Figura 1 – Etapas do processo de forjamento a quente em matriz fechada com rebarba na peça.

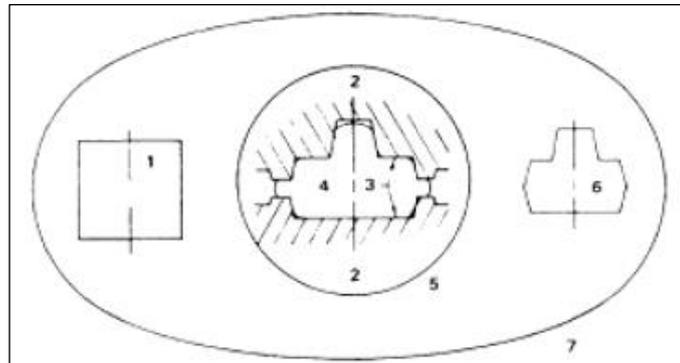


Fonte: O Autor (2022).

2.1.1 Corte de matéria prima

Atlan (2005), em sua obra *Cold and Hot Forging*, destaca as principais características de um *billet* (tarugo) para forjamento, as quais são primordiais para a realização da deformação plástica e a qualidade do produto final. A Figura 2 apresenta os diferentes componentes do sistema de forjamento, caracterizando a importância do *blank* e suas variáveis para o processo.

Figura 2 – Sistema de forjamento onde: (1) Tarugo cortado; (2) Ferramental; (3) Interface ferramenta/material; (4) Zona de deformação; (5) Equipamento de forjamento; (6) Produto final; (7) Folha 2D.



Fonte - Adaptado de Altan (2005).

A matéria prima em geral depende do produto final desejado, sendo frequentemente utilizadas para forjamento, barras redondas laminadas de aço ou outro material conforme necessidade. As características do material devem ser especificadas em projeto, bem como as dimensões de corte para forjamento.

Existem inúmeros métodos de processar o corte de um *blank* para forjamento, normalmente esse método é definido pela empresa a qual leva em conta a qualidade do corte, o tempo de processamento e o custo do maquinário necessário. Todo e qualquer método possui vantagens e desvantagens em seu processo.

O corte por cisalhamento geralmente tende a ser o mais rápido, porém, possui uma qualidade superficial e tolerâncias dimensionais menores comparado aos demais métodos. As serras fitas ou circulares de alto desempenho, são métodos comuns no setor industrial e dependendo o modelo de máquina escolhida para o processo, pode ser considerado um processo de baixo custo, porém, possui qualidade inferior entre os demais equipamentos. A tolerância de serras circulares automáticas é muito boa e relevante para corte de matéria prima semi-acabada.

2.1.2 Aquecimento de *blank*

Como ocorre no processo de corte de matéria prima, o aquecimento depende dos parâmetros adotados e definidos pela empresa. Existem inúmeros equipamentos e fornos específicos para atender as necessidades do processo e da mesma maneira que nas máquinas de corte, esses equipamentos possuem peculiaridades (GUINSBURG, 2021).

A temperatura de aquecimento depende do material utilizado para forjamento, o tipo de aço ou liga utilizada, o ponto de fusão desse material junto ao aquecimento, o tipo de forno utilizado, devendo a temperatura ser adequada para facilitar a deformação do material.

A escolha da temperatura de austenitização deve levar em consideração as necessidades de processo, no caso do forjamento a quente, precisam ser altas o suficiente para garantir ao aço tenacidade e ductilidade, sem que ocorra um crescimento excessivo do tamanho de grão austenítico (CHIAVERINI, 1998).

Quando aquecido de forma contínua até elevadas temperaturas, o ferro passa por uma transformação de fase. A transformação ocorre no retículo cristalino do ferro, passando de uma estrutura CCC (cúbica de corpo centrado) para uma estrutura CFC (cúbica de face centrada) (REICHEL, 2021).

2.1.3 Recalque de *blank*

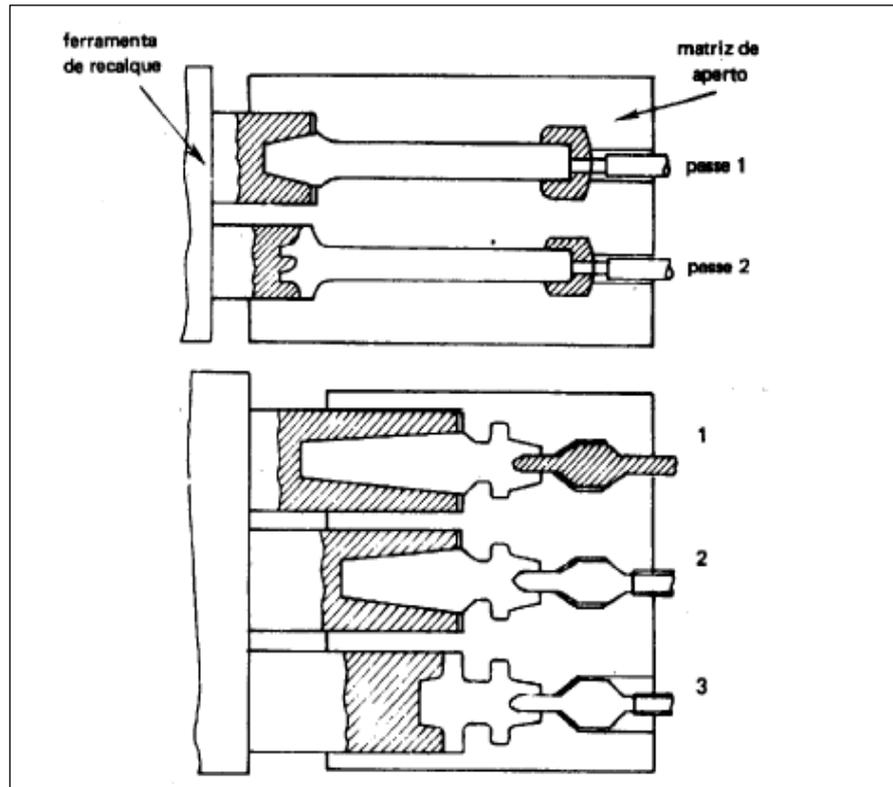
O recalque compõe, essencialmente, um processo de forjamento à quente, este pode ser considerado um estágio da forja, onde uma barra, tubo ou demais *blanks* de seção uniforme - normalmente circulares - têm sua geometria alongada ou reconformada em seu comprimento.

Como ocorre na conformação dentro do processo de forjamento, o estágio de recalque também necessita de uma matriz e uma prensa para realização da compressão do eixo em uma de suas extremidades, concentrando dessa forma o material para a posterior conformação.

A temperatura de aquecimento do material para ser recalcado, depende da natureza deste e das especificações técnicas determinadas pela empresa. As máquinas necessárias para recalcar normalmente são horizontais de um eixo principal com uma transmissão excêntrica.

Na Figura 3 é ilustrado o ferramental para recalque duplo, ou seja, nas duas extremidades de uma barra. A operação consiste em cinco passes, os dois primeiros numa matriz dupla com duas ferramentas de recalque e os três últimos numa matriz tríplice com três ferramentas e recalque.

Figura 3 – Recalcagem em duas extremidades com cinco passes.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

Para ambos os casos o processo, a diferença é a quantidade de etapas ou passes em cada matriz. Na primeira matriz são necessários dois estágios de recalque para formação do volume de conformação ideal para forjamento e a matriz tríplice necessita de três processos para recalcagem.

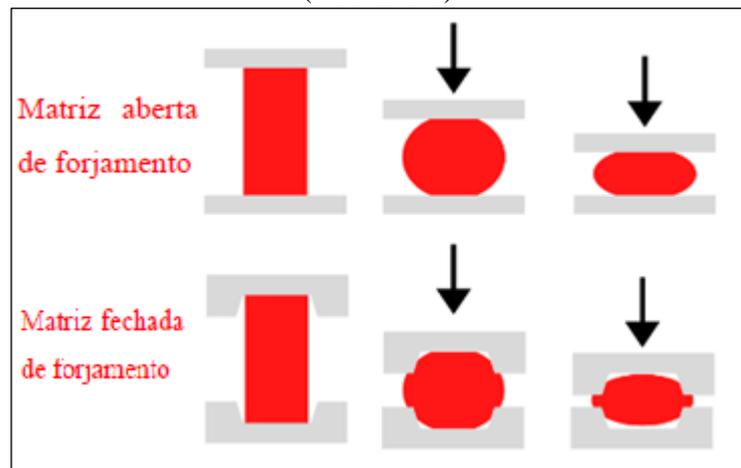
2.1.4 Forjamento de *blank*

Atualmente o processo de forjamento vem evoluindo cada vez mais dentro da indústria metalúrgica. O processo de forjar um *blank* deve ser tratado com extremo cuidado pois o ciclo entre aquecer e conformar acontece em tempo específico (geralmente em segundos), que se excedido pode ocasionar a perda de uma ou mais peças no processo. Com isso, e com a necessidade de produzir cada vez mais em menos tempo priorizando a saúde e o bem estar dos funcionários, as empresas vêm adotando com frequência os sistemas de automação industrial para seus processos.

Na essência, independente do processo de fabricação, o forjamento gera deformação plástica através da conformação mecânica. Normalmente a conformação ocorre por duas

matrizes, uma “puncionadora” (martelo) e outra apoiadora, a base do material. Na prática o conjunto de matrizes existe em dois modelos: matriz aberta e matriz fechada. A Figura 4, demonstra os dois tipos de matrizes em forjamento.

Figura 4 – Demonstração de matrizes de forja. Matriz aberta (*open-die*); Matriz fechada (*closed-die*).



Fonte - Adaptado de Milwaukee Forge (2022).

2.1.4.1 Forjamento em matriz aberta

O forjamento em matriz aberta é a arte de moldar o metal martelando ou pressionando-o entre matrizes de contorno planas ou simples, enquanto manipula a peça de trabalho quente entre cada golpe do equipamento (MILWAUKEE FORGE, 2022).

Segundo *ASM Metal Handbook* (1993), o forjamento em matriz aberta também conhecido como forjamento manual, é escolhido dentre outras opções quando a peça a ser forjada é muito grande para ser produzida em matriz fechada. Em suma, essa seria a principal ocasião para optar pelo processo, porém, em alguns materiais a prevalência pelas propriedades mecânicas leva vantagem e em alguns casos estas só podem ser obtidas por matrizes abertas. O custo e o prazo para fabricação de matrizes desse tipo são baixos comparados com as complexas matrizes fechadas, tendo em vista que dependendo da demanda de produção não é conveniente o investimento para produzir esse ferramental.

Como em todo processo de forjamento, a forja em matriz aberta deve seguir os requisitos para deformação do *blank* em processo, no qual devem ser identificados e alcançados os limites de temperatura de aquecimento ou de forja. As tolerâncias de forjamento e a capacidade de deformação devem ser identificadas na máquina utilizada.

2.1.4.2 Forjamento em matriz fechada

Diferente do processo de forjamento por matriz aberta, em matriz fechada a complexidade do molde fabricado é ligeiramente maior, as peças produzidas são de geometria menores e o ciclo de fabricação do produto é menor.

A qualidade do produto final normalmente é agradável, prevalecendo as propriedades mecânicas do material, justificando o alto investimento para fabricação dos moldes de forjamento para produção das peças desejadas.

2.1.5 Rebarbação e calibração de *blank*

Normalmente essa etapa é uma das mais importantes em um estágio de forjamento, pois nela são ajustados de forma definitiva os parâmetros físicos finais da peça forjada. Na produção, o corte da rebarba do forjamento é tão importante quanto outras operações de forjamento. A operação de desbaste pode ser usada para fornecer o “dimensionamento” final do forjamento acabado. O corte inadequado pode causar defeitos e/ou distorções que não podem ser reparadas (MILWAUKEE FORGE, 2022).

Os estágios de rebarbação e calibração de *blank* são etapas de um processo de forjamento em matriz fechada. O escoamento da rebarba em matrizes fechadas, diferentemente de matrizes abertas, se torna algo complexo pelo fato de internamente existir obstáculos para a saída do cavaco da peça.

2.1.6 Jato de granalha

O jateamento é um processo comum para realizar limpeza em superfícies de peças semi-acabadas oriundas de outros processos, como o forjamento. O intuito principal do jateamento é a remoção da carepa encontrada na peça após a forja.

A carepa que a peça forma no forjamento pode ser prejudicial para os demais processos que envolvem o produto, em casos de tratamento térmico pode resultar na queima das resistências do forno de aquecimento. No caso de uma usinagem sucessiva, pode prejudicar a fixação da peça na máquina e deformar a própria peça no processo, em virtude de não possuir uma geometria completamente definida.

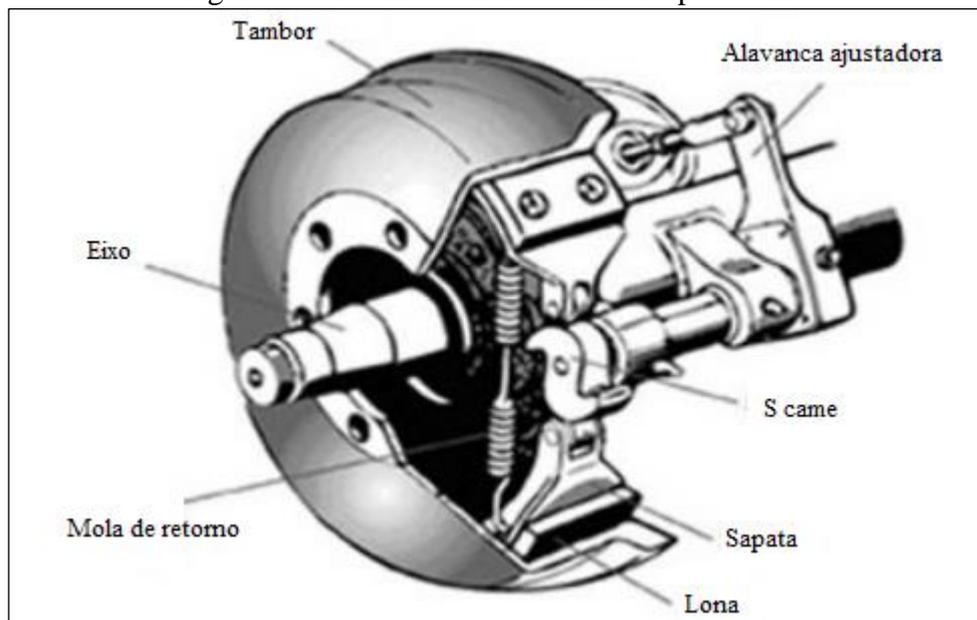
Além de realizar a retirada das impurezas ocasionadas pelo processo de forjamento nas peças, o jateamento produz um acabamento superficial relativamente bom à peça processada, o produto fica visivelmente mais atraente.

2.2 EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO

O eixo de acionamento de freio, também conhecido como eixo “s come” ou “z come”, possui essa designação pois tem o formato semelhante ao das letras s e z. Além disso, esses eixos trabalham da mesma maneira que um came tradicional dentro da engenharia.

A principal função desse tipo de eixo é comprimir as sapatas, gerando atrito entre essas e o tambor de freio, fazendo com que o carro reduza velocidade por frenagem e venha a parar com o decréscimo dela. O acionamento desse eixo ocorre pelo pedal de freio através da catraca de freio. O sistema de freio a tambor tipo “s come” pode ser identificado na Figura 5.

Figura 5 – Sistema de freio a tambor tipo s come.



Fonte: Adaptado de Longhi (2013).

O processo de fabricação do eixo s come depende das especificações da empresa. Pode ser um item fabricado por usinagem, fundição ou forjamento. Dentre todos os processos citados, apesar do tempo de resfriamento ser ligeiramente elevado, o processo de forjamento do eixo s ou z ainda assim tende a ser mais rápido e adequado para produções em alta escala. Com isso, além do ótimo acabamento vindo da forjaria, o custo de fabricação dessa peça tende a diminuir, deixando o preço final do produto, com menor custo.

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A abordagem sobre a transferência de calor é importante para fundamentar o processo de resfriamento que é estudado na sequência do processo de forjamento empregado nesse trabalho.

Transferência de calor é a energia térmica em trânsito em razão de uma diferença de temperaturas no espaço, podendo estar relacionada à capacidade de um corpo em absorver ou liberar calor. Os diferentes tipos de transferência de calor são chamados de modos e são fundamentados pelos mecanismos físicos do tema. Os três principais mecanismos são tratados na sequência (INCROPERA, 2019).

2.3.1 Condução

A condução caracteriza a transferência de calor entre partículas onde aquelas mais energizadas transferem calor para as que contêm menos energia térmica. Sendo assim, a transferência de calor por condução deve ocorrer no sentido decrescente de temperatura entre dois corpos. Esse mecanismo de transferência de calor envolve partículas sólidas em contato com outras partículas sólidas ou fluidas a diferentes temperaturas.

Os mecanismos de transferência de calor são regidos por equações de taxa, onde é mensurado a taxa de calor transferida por unidade de tempo. A Equação (1) descreve a taxa que rege o mecanismo de transferência de calor por condução térmica, também conhecida como *lei de Fourier* e expressa pela Equação (1).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

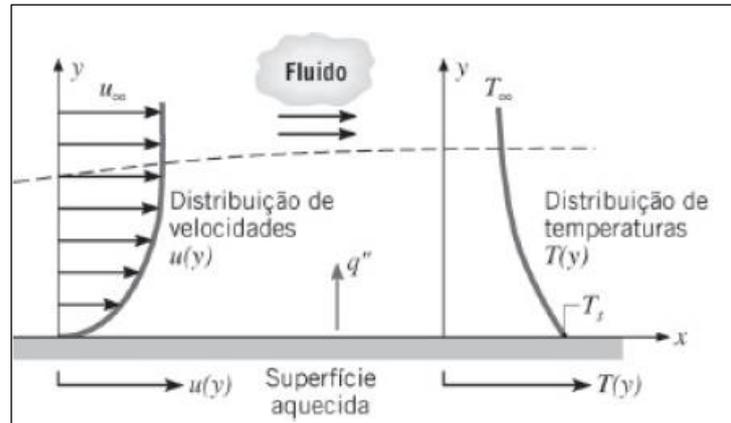
onde, q_x'' é o fluxo de transferência de calor em (W/m^2), k é a condutividade térmica do material em ($W/m \cdot K$).

2.3.2 Convecção

Este modo de transferência de calor abrange dois mecanismos, o mecanismo da transferência de energia pelo movimento molecular aleatório (difusão) e o da transferência de

energia pelo movimento global do fluido. Figura 6 caracteriza o desenvolvimento de uma camada-limite na transferência de calor por convecção.

Figura 6 – Desenvolvimento de camada-limite na transferência de calor por convecção em placa plana



Fonte – Adaptado de Incropera (2019).

A transferência de calor por convecção é naturalmente associada ao contato do fluido em movimento com uma superfície ou um corpo com uma temperatura diferente daquela do fluido. Normalmente nesse tipo de mecanismo a energia que é transferida é a energia sensível, ou energia interna do fluido. Em alguns casos de transferência de calor por convecção ocorre a mudança de fase de vapor para líquido do fluido em estudo, nesses casos ocorre a troca térmica por calor latente.

Transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Uma convecção forçada, é quando meios externos estão agindo para movimentar o fluido em contato com a superfície em análise. Um exemplo disso é o uso de ventiladores e bombas. Já na convecção livre ou natural o fluido escoar por forças de empuxo que têm origem a partir de diferenças de massas específicas, as quais geram variações nas temperaturas dos fluidos.

A equação da taxa de transferência de calor por convecção segue a forma descrita na Equação (2), onde a taxa de calor é proporcional a diferença de temperatura da superfície e o meio fluido. Essa equação é conhecida como a *lei do resfriamento de Newton*.

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

onde q'' é o fluxo de calor por convecção ou a taxa de transferência de calor por convecção em (W/m^2); T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido e h é o coeficiente convectivo em ($W/m^2 \cdot K$). O fluxo de calor transferido pode ocorrer da superfície para o meio fluido e ao contrário. A Tabela 1 apresenta alguns valores típicos de coeficiente convectivo de acordo com a aplicação em que se encontra.

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de transferência de calor por convecção para algumas situações

Processo		h ($W/(m^2 \cdot K)$)
Convecção natural	Gases	2-25
	Líquidos	50-1000
Convecção forçada	Gases	25-250
	Líquidos	100-20000
Convecção com mudança de fase	Ebulição ou condensação	2500-100000

Fonte - Adaptado de Incropera (2019).

2.3.3 Radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero. Esse meio de propagação de calor emite energia em corpos sólidos, fluidos e gases. Diferentemente de outros mecanismos de transferência de calor, na radiação o calor não necessita de um meio material para se propagar, sendo até mais eficiente vácuo esse processo.

O fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado pela Equação (3).

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

onde ε é uma propriedade radiante da superfície conhecida como emissividade, T_s é a temperatura absoluta da superfície em (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann onde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$. A emissividade (ε) possui valores entre 0 e 1. Como uma grandeza adimensional, essa propriedade fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro.

A absorvidade é uma propriedade radiante da superfície que determina a taxa de energia absorvida por unidade de área da superfície em análise. Uma porção ou toda a

irradiação, pode ser absorvida pela superfície, aumentando dessa forma a energia térmica do material. A absorptividade é determinada pela Equação (4).

$$G_{abs} = \alpha \cdot G \quad (4)$$

onde G é a irradiação da superfície, com $0 \leq \alpha \leq 1$. Se $\alpha < 1$ e a superfície é opaca, porções da irradiação são refletidas. Se a superfície é semitransparente, porções da irradiação podem ser transmitidas.

De maneira geral, com todos os conceitos básicos que envolvem radiação dentro do estudo de transferência de calor, define-se a taxa líquida de transferência de calor por radiação saindo da superfície, expressa por unidade de área conforme Equação (5).

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_n(T_S) - \alpha G = \varepsilon \alpha (T_S^4 - T_{VIZ}^4) \quad (5)$$

Para expressar a troca líquida de calor por radiação pode-se seguir com a Equação (6).

$$q_{rad} = h_r \cdot A \cdot (T_S - T_{VIZ}) \quad (6)$$

na equação (6) h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação e pode ser expresso pela equação (7).

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_S + T_{VIZ}) \cdot (T_S^2 + T_{VIZ}^2) \quad (7)$$

2.4 CONDUÇÃO TRANSIENTE

Como o processo de resfriamento dos eixos forjados estudado nesse trabalho é essencialmente transitório, envolvendo os três mecanismos de transferência de calor descritos anteriormente, especialmente a condução, é dado a seguir o devido um breve trato à condução transiente.

Muitos problemas de transferência de calor são dependentes do tempo, em geral, esses problemas não estacionários, ou transientes, ocorrem quando as condições de contorno de um sistema são mudadas.

Os métodos desenvolvidos a seguir, determinam a dependência da distribuição de temperaturas no interior de um sólido em relação ao tempo, durante um processo transiente.

2.4.1 Método da Capacitância Global

A essência do método da capacitância global é a hipótese de que a temperatura do sólido é espacialmente uniforme, em qualquer instante durante o processo transiente. Essa hipótese implica que os gradientes de temperatura no interior do sólido sejam desprezíveis. (INCROPERA, 2019).

Através de um volume de controle ao redor do sólido em análise e um balanço de energia global no sólido, esse balanço deve relacionar a taxa de perda de calor na superfície com a taxa de variação da energia interna. Dessa forma pela Equação (8).

$$\begin{aligned}\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g &= \dot{E}_{acu} \\ -\dot{E}_{sai} &= \dot{E}_{acu}\end{aligned}\quad (8)$$

Sabendo que a perda de calor do sólido para o meio externo ocorre por convecção, determina-se que $\dot{E}_{sai} = q_{conv}$ e substituindo a energia acumulada na Equação (9), tem-se.

$$\begin{aligned}-h \cdot A_s \cdot (T - T_\infty) &= cp \cdot \frac{dT}{dt} \\ cp &= \rho \cdot V \cdot c\end{aligned}\quad (9)$$

Definindo a diferença de temperaturas como $\theta = T - T_\infty$ e se T_∞ for constante, reconhece-se que $(d\theta/dt) = (dT/dt)$ substituindo e integrando tem-se a partir da Equação (10) e determinando $\theta_i = T_i - T_\infty$, tem-se.

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left[-\left(\frac{h \cdot A_s}{\rho \cdot V \cdot c}\right) \cdot t\right]\quad (10)$$

Para determinar a energia total transferida Q até algum instante de tempo, utiliza-se a Equação (11).

$$Q = (\rho \cdot V \cdot c) \cdot \theta_i \cdot [1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_t}\right)] \quad (11)$$

onde

$$\tau_t = \left(\frac{1}{h \cdot A_s}\right) \cdot (\rho \cdot V \cdot c) = R_t \cdot C_t \quad (12)$$

onde R_t é a resistência à transferência de calor por convecção e C_t é a capacitância térmica global do sólido.

2.4.2 Número de *Biot*

O método da capacitância global pode ser utilizado na resolução de problemas transientes de aquecimento e resfriamento simples e convenientes. Nem sempre esse método é eficaz para problemas de condução que envolvem efeitos convectivos nas superfícies. (INCROPERA, 2019).

Para desenvolver um critério apropriado para solução de problemas dessa magnitude, normalmente estima-se o número de *Biot*, o qual fornece uma medida da queda de temperatura no sólido em relação à diferença de temperaturas entre a sua superfície e o fluido.

Se condição na Equação (13) for satisfeita, o erro associado à utilização do método da capacitância global é pequeno.

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} < 0,1 \quad (13)$$

onde, L_c é o comprimento característico cuja definição é dada pela razão entre o volume sólido e sua área superficial, $L_c = V/A_s$.

Da mesma forma que o número de *Biot*, o número de *Fourier* é um tempo adimensional e caracteriza problemas de condução transiente. Esse número é identificado pela simbologia Fo e identificado pela Equação (14).

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \quad (14)$$

com isso, a Equação (10), pode ser resumida na Equação (15).

$$\frac{\theta}{\theta_i} = (T - T_{\infty}) / (T_i - T_{\infty}) = \exp(-Bi \cdot Fo) \quad (15)$$

2.4.3 Análise geral via capacitância global

As condições térmicas no interior de um sólido podem ser influenciadas simultaneamente por convecção, radiação e pela aplicação de um fluxo em sua superfície e geração interna de energia.

A partir de um volume de controle ao redor do sólido e aplicando a conservação de energia para qualquer instante, o balanço de energia adicionado da radiação é determinado pelas Equações (16) e (17).

$$q''_s A_{s,a} + \dot{E}g - (q''_{conv} + q''_{rad}) A_{s(c,r)} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (16)$$

$$q''_s A_{s,a} + \dot{E}g - [(h \cdot (T - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{VIZ}^4))] \cdot A_{s(c,r)} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (17)$$

2.4.4 Método dos Efeitos Espaciais ou Cartas de Heilser

Com frequência, surgem situações nas quais o número de *Biot* é maior ou igual 0,1 e tem-se que enfrentar o fato de os gradientes de temperatura no meio não serem mais desprezíveis. Desse modo o método da capacitância global se torna ineficiente e incorreto, sendo necessário utilizar outro meio para a resolução do problema que envolve a condução de calor transiente.

Em muitos problemas como o que envolve uma parede plana, somente uma coordenada espacial é necessária para descrever a distribuição interna de energia, como mostrada na Equação (18).

$$\frac{\partial^2 \cdot T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

Para esta equação a variável α representa difusidade térmica. Aplicando as condições de contorno necessárias e fazendo as devidas simplificações da equação. Pode-se considerar a

variável T dependente, se a diferença de temperaturas for dividida pela máxima diferença de temperaturas como mostra a Equação (19).

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (19)$$

Consequentemente, θ^* deve estar em um intervalo entre $0 \leq \theta \leq 1$. Uma coordenada espacial adimensional pode ser definida pela Equação (20).

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (20)$$

Na qual L é metade da espessura da parede plana, isso sempre que houver troca dos dois lados, e um tempo adimensional t^* pode ser definido pela Equação (21), onde t^* pode ser definido ainda como adimensional número de *Fourier*.

$$t^* = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} = Fo \quad (21)$$

substituindo as grandezas dimensionais na Equação (18), obtemos a equação do calor (22).

$$\frac{\partial^2 \cdot \theta^*}{\partial \cdot \theta^{*2}} = \frac{\partial \cdot \theta^*}{\partial \cdot Fo} \quad (22)$$

2.4.5 Solução Aproximada para Método da Parede Plana com convecção

A equação que rege a solução exata para esse método é a Equação (23).

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \cos(\xi_n x^*) \quad (23)$$

Para valores de $Fo > 0,2$ a solução exata apresentada na Equação (23), pode ser aproximada pelo primeiro termo da série, $n = 1$. Com isso θ^* , se torna a Equação (24).

$$\theta^* = C_1 \cdot \exp(-\xi_1^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\xi_1 \cdot x^*) \quad (24)$$

Ou

$$\theta^* = \theta_0^* \cdot \cos(\xi_1 \cdot x^*)$$

$$\theta^* = C_1 \cdot \exp(-\xi_1^2 \cdot Fo) \quad (25)$$

2.5 RESFRIAMENTO CONTROLADO EM PEÇAS FORJADAS

Resfriamento controlado pode ser definido como: resfriamento de um material aquecido a altas temperaturas de forma que, a sua taxa de resfriamento é controlada com o intuito de prevenir a formação de fases duras, trincas, defeitos internos ou para atingir propriedades mecânicas ou microestruturas desejadas (ASM, 1991).

O resfriamento consiste em reduzir a temperatura do forjado após o rebarbamento, até atingir a temperatura ambiente (na maioria dos casos). A taxa de resfriamento combinada com o TGA e composição química, controlarão a decomposição da austenita em diferentes fases, com grande influência na microestrutura e propriedades mecânicas finais, tornando esta etapa uma das mais importantes do processo (BUCHMAYR, 2016; SILVEIRA et al., 2020). Contudo, se após o forjamento houver tratamentos térmicos, os quais vão alterar a microestrutura novamente, ainda é necessário controlar o resfriamento, porém, de uma forma menos cautelosa.

Normalmente em processos de forjamento a temperatura da peça acabada requer uma baixa significativa comparada com sua temperatura de aquecimento inicial. Isso, além de estar diretamente ligado as propriedades mecânicas finais da peça, envolve também os processos posteriores em que o produto passará.

O método comumente usado em peças após o forjamento é do resfriamento por convecção natural, ($2 \leq h \leq 15$ (W/m².K)), até que a sua temperatura fique abaixo do ponto eutetoide não formando grãos martensíticos em sua microestrutura e, após essa fase, direcionar o fluido para resfriar o material por convecção forçada e então atingir a temperatura ideal para a fase de processamento seguinte. (INCROPERA, 2019).

2.6 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA

A transferência de calor em processos de forjamento ou estampagem a quente pode ocorrer após o *blank* ser retirado do forno de aquecimento, conforme a manipulação da peça, pode ocorrer convecção natural ou forçada. Muvunzi (2017) diz que durante o estágio de

transferência da peça, a perda de calor do *blank* depende principalmente da área da superfície do *blank* e do método pelo qual ele é transferido do forno para a ferramenta de conformação. Dependendo da configuração do processo, pode ser necessário considerar a convecção forçada. Um exemplo disso são os processos robotizados em que as peças são transferidas de cada etapa, por robôs.

O resfriamento controlado após o forjamento determina as variáveis impactantes no acabamento final da peça. No que envolve microestrutura e propriedades mecânicas, Souza (2011) salienta que para permitir a formação de perlita e ferrita semelhante à obtida por normalização em processo industrial, é relevante determinar o tempo de resfriamento que a peça forjada gastou para atingir a temperatura crítica para que o material tenha uma microestrutura austenítica quando colocada em processo de resfriamento controlado.

Com base em resultados obtidos, Souza (2011) afirma que as taxas de resfriamento na superfície e nas regiões fechadas são maiores do que as fornecidas para as peças forjadas internas e conferem à formação da microestrutura com morfologia e dureza distintas ao longo do material mesmo que contenham qualitativamente apenas perlita e ferrita.

Materiais de grande difusividade térmica ($9,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ – alumínio, por exemplo) respondem rapidamente a mudanças em seu ambiente térmico, enquanto materiais de pequena difusividade térmica ($1,35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ – mármore) respondem mais lentamente, levando mais tempo para atingir uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA, 2019).

A taxa de ar que entra no resfriamento, área do transportador, resulta em um fluxo de fluido e, eventualmente, em uma distribuição de calor em condições de transferência. Além de possibilitar a geração de um fluxo turbulento, o aumento da taxa de ar tem um impacto no coeficiente de transferência de calor (APOSTOŁ; SKUBISZ; ADRIAN, 2022).

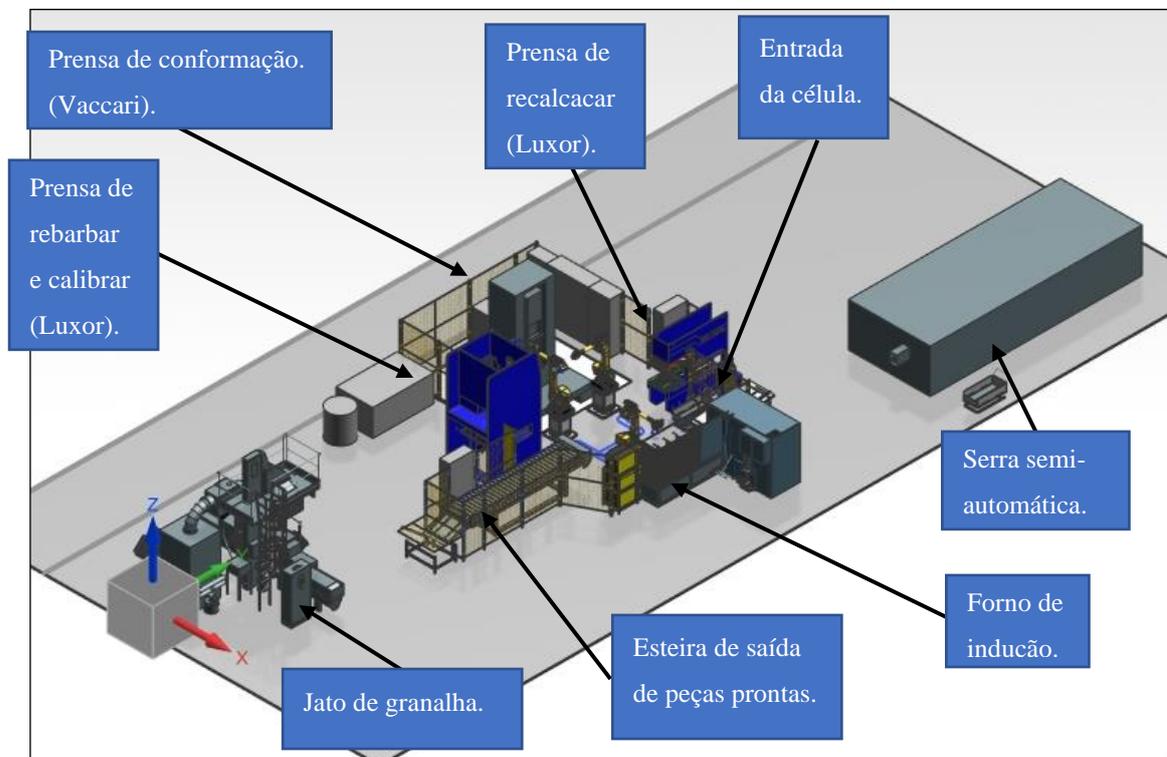
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é mostrada uma abordagem geral da célula de forjamento do eixo de acionamento de freio, identificando dessa forma os estágios de forjamento tratados no capítulo 2. Posteriormente é apresentada a proposta de uma esteira para resfriamento da peça forjada, com os ciclos de queda de temperatura, entrada da peça em 950 °C até 500 °C em convecção natural e de 500 °C até aproximadamente 50 °C em convecção forçada, para ambas as situações foi considerado a análise com ou sem a adição do efeito de perda por radiação.

3.1 CÉLULA DE FORJAMENTO DO EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO

A célula de forjamento do eixo de acionamento de freio foi projetada para trabalhar em um ciclo produtivo de 25 segundos, para isso, com o auxílio do *software* de simulação *Tecnomatix plant simulation (TX)* da Siemens, versão 2016, foi destinada a implementação de três robôs e duas esteiras transportadoras. A Figura 7 apresenta o layout da célula projetada no *software* de modelagem 3D NX, da Siemens, versão 2019.

Figura 7 - Layout 3D da célula de forjamento do eixo de acionamento de freio



Fonte: O Autor (2022).

No layout consta um forno de indução de cinco bobinas, da marca *Inductotherm* uma prensa de recalcar com três estágios de acionamento, da marca *Luxor*, uma prensa de conformar de 45 toneladas da marca *Vaccari*, uma prensa de rebarbar e calibrar da marca *Luxor*, três robôs *Fanuc*, modelo *mi710ic*, com capacidade de 70 kg e uma esteira de aproximadamente 4,5 metros de comprimento por 1 metro de largura com uma velocidade de aproximadamente 6 m/min.

3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EIXO DE ACIONAMENTO DE FREIO

Como em outros processos que envolvem forjamento, para fabricação dos eixos s e z o *blank* é cortado em uma serra semi-automática com disco circular da marca *Franho*. A bitola dos eixos possui quatro variações de diâmetro, ou seja, de 35, 39, 41 e 45 mm e o comprimento é diversificado com medidas entre 325 a 804 mm.

O comprimento da peça é fixado no início do processo, com isso as peças cortadas são posicionadas em uma rampa de armazenagem e entrada dos *blanks* na célula, posteriormente os robôs atuam manipulando os tarugos em cada processo.

O primeiro robô com garra dupla alimenta as cinco bobinas do forno de indução, que aquece a peça em um intervalo de temperatura entre 1250 °C e 1280 °C. A temperatura das peças é conferida após o aquecimento e estas são posicionadas na prensa para recalagem. O segundo robô manipula o tarugo quente nos estágios de recalque e, posteriormente, até a prensa de conformação. A peça conformada é transportada pelo terceiro robô para as fases finais de forjamento que envolvem rebarbação e calibração e, por fim, para a esteira de saída dos eixos. A Figura 8 ilustra um eixo s modelo “16,5 qp”, diâmetro 39,67 mm e comprimento 460 mm.

Figura 8 - Eixo s modelo 16,5qp diâmetro de 39,67 mm e comprimento de 460 mm.



Fonte: Master Freios (2022).

3.3 PROPOSTA DE CÁLCULOS E SIMULAÇÃO

A Master Freios tem o interesse de implementar um sistema independente na célula de forma que a esteira de saída de peças forjadas seja integrada com a máquina de jateamento. O objetivo geral da esteira, além de transporte do eixo é resfriar as peças através de dois mecanismos distintos.

A peça é posicionada na esteira com uma temperatura de aproximadamente 950 °C e deverá ser resfriada por convecção natural, com um coeficiente convectivo estimado entre o intervalo [$2 \leq h \leq 25$ (W/m²·K)] (essa determinação referente ao coeficiente convectivo foi feita por tentativa e erro, ou seja, o mesmo não foi calculado) até 500 °C, após esse processo a peça entrará em uma câmara de resfriamento, onde ventiladores forçarão a perda de calor do eixo por convecção forçada até a temperatura de 50 °C, temperatura ideal para jatear as peças forjadas.

Para isso, foi feita uma análise dimensional compondo os cálculos de troca de calor e relacionando estes com o comprimento efetivo para a esteira, fazendo um comparativo e arquivando os dados encontrados para uma concretização do projeto futuro.

Em paralelo a isso a intenção desse trabalho é a realização de uma análise analítica, compondo cálculos de transferência de calor para estimar o comprimento ideal da esteira, o tempo de resfriamento em convecção natural e forçada, para atender dessa forma a necessidade esperada pela Master.

Além disso, o trabalho teve a intenção de fazer uso de outras ferramentas tal como a simulação CFD, contribuindo para uma análise mais crítica do eixo de acionamento de freio e, dessa confrontando os resultados obtidos analiticamente e através dos ensaios realizados. A realização dos cálculos analíticos e simulações em *software* de análises de transferência de calor tomará como base os dados obtidos em testes feitos pela Master e a análise dos tempos e temperatura encontrados no layout físico observando as peças que saem da esteira conforme layout apresentado anteriormente.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO DE MEDIÇÃO

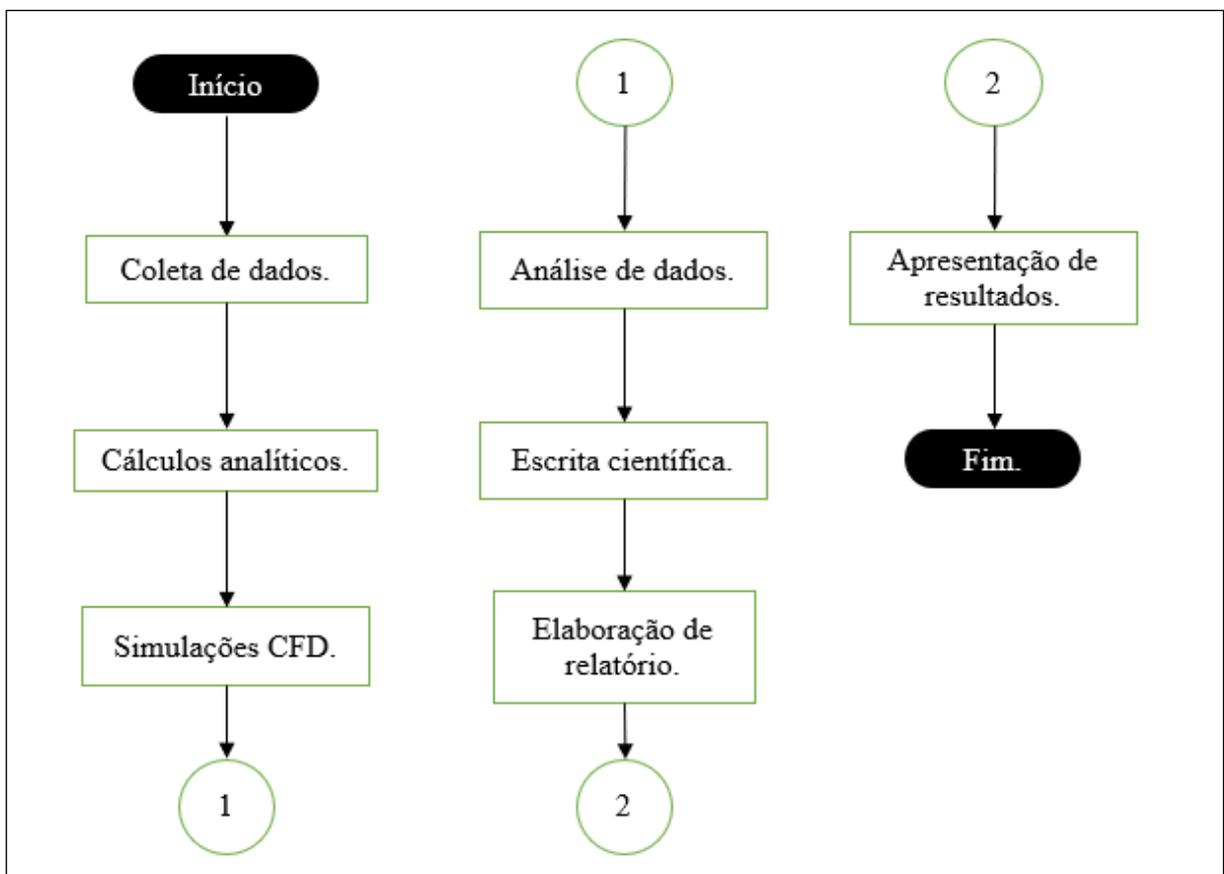
Os seguintes instrumentos de medição foram utilizados na obtenção dos dados para realização dos cálculos necessários para o trabalho. Um pirômetro, termômetro ótico digital para altas temperaturas, marca Optris ms pro pyrometer, para auxiliará na obtenção da temperatura da peça na entrada e saída da esteira. Para a obtenção do tempo de ciclo de cada

peça posicionada na esteira e tempo completo da peça em cima desta, foi utilizado um cronômetro digital da marca Technos, modelo yp2151.

3.5. FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

O fluxograma de atividades destaca as etapas do processo que foram realizadas no decorrer do semestre, sendo mostrado na Figura 9 o fluxograma de atividades.

Figura 9 – Fluxograma de atividades



Fonte: O Autor (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são abordados os temas primordiais deste trabalho acadêmico, evidenciando desta forma os testes elaborados com os eixos de fricção de freio. Os dados experimentais obtidos auxiliaram a análise analítica e numérica, para o desenvolvimento dos cálculos que definiram as dimensões necessárias para a esteira de resfriamento.

4.1 TESTE PRÁTICO E COLETA DE DADOS

Com o intuito de obter dados reais para a assertividade no projeto e elaboração da esteira de resfriamento, foi feito um ensaio de aquecimento e resfriamento em um dos modelos de eixo de fricção. O ensaio foi realizado na Termo Aço de Caxias do Sul, empresa prestadora de serviços em tratamentos térmicos. O modelo de eixo utilizado foi o 16,5 qp com um diâmetro bruto de 39,67 mm e um comprimento de peça de aproximadamente 460 mm. Esse modelo de eixo, possui uma variação em seu comprimento entre 460 e 805 mm.

Para este ensaio foram utilizadas peças já forjadas, com todas as etapas do forjamento concluídas, porém, não tendo como simular as condições reais, as peças foram aquecidas para obtenção dos dados necessários para o dimensionamento da esteira de resfriamento. Dessa forma, foram utilizadas nove peças de eixo, as quais foram aquecidas ao mesmo tempo em um forno de banho de sal (normalmente utilizado para realização de tratamento térmico de materiais), devido ao fato desse ser o único equipamento de aquecimento disponível na empresa Termo Aço, como mostrado na Figura 10, até a temperatura de 950 °C. A partir disso, foram realizados ensaios de resfriamento com três condições de coleta dos dados finais.

Figura 10 - Eixos testados no banho de sal



Fonte: o autor (2022).

Para cada teste realizado foram utilizadas três peças de eixo. Primeiramente foi realizado um ensaio com o resfriamento de 3 eixos em convecção natural desde a temperatura de 950 °C até a temperatura de 50 °C. O segundo ensaio, utilizando outros 3 eixos e um ventilador axial, caracterizou um resfriamento total obtido pela convecção forçada, até a temperatura de 50 °C. Por fim, para evidenciar as condições normais em que as peças serão submetidas, foi realizado o teste com mais 3 eixos para o resfriamento em convecção natural até 500 °C e, ato contínuo, a convecção forçada por ventilador até a temperatura final de 50 °C.

Na Figura 11 identifica-se a disposição das peças para serem resfriadas. Na condição da foto é mostrado o ventilador exposto atrás dos eixos posicionados na vertical. E essa disposição dos eixos foi considerada em todos os 3 ensaios, porém, nos dois últimos ensaios houve o acionamento do ventilador.

Figura 11 - Disposição dos eixos nos ensaios de resfriamento



Fonte: o autor (2022).

A temperatura nos eixos foi registrada a cada trinta segundos e os dados obtidos foram anotados para comprovação dos resultados e elaboração de curva de temperatura por tempo. A medição da temperatura foi realizada de forma digital (Figura 12) com o auxílio de um termopar tipo k embutido em cada um dos eixos, até o centro da cabeça do eixo, região onde o resfriamento é ligeiramente mais lento. A temperatura nos eixos foi acompanhada e registrada até a temperatura de 50 °C.

Figura 12 - Aparelho medidor de temperatura dos eixos

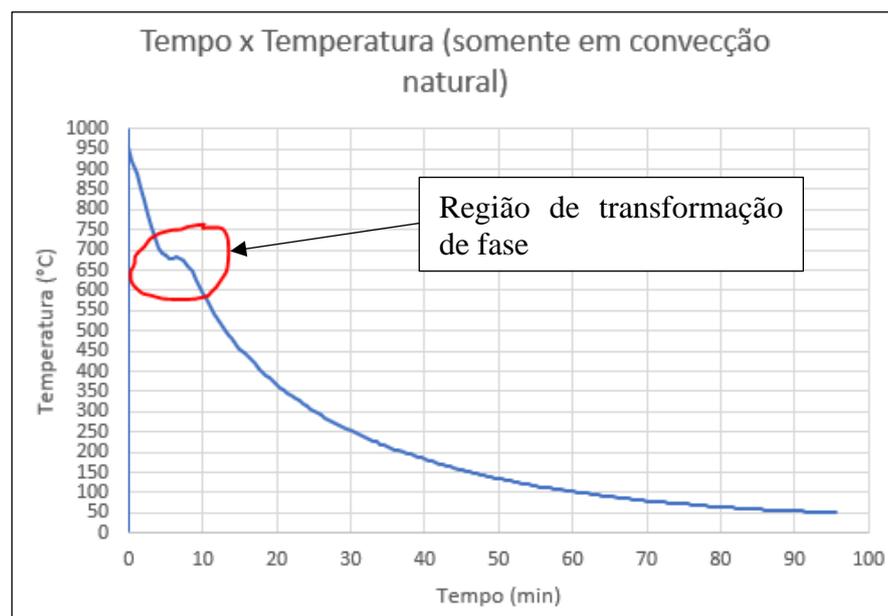


Fonte: o autor (2022).

4.2 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAL

Como comentado anteriormente os resultados práticos foram obtidos a partir da coleta dos dados apresentados no medidor. Esses resultados foram organizados em uma planilha Excel, gerando assim os gráficos para comparação das curvas obtidas. A Figura 13 apresenta a curva obtida para o primeiro ensaio realizado, resfriamento em convecção natural até a temperatura de 50 °C, a partir do aquecimento em banho de sal em 950 °C. O ensaio totalizou um tempo de resfriamento para essa diferença de temperatura de quase 95 minutos.

Figura 13 - Resfriamento dos eixos em convecção natural

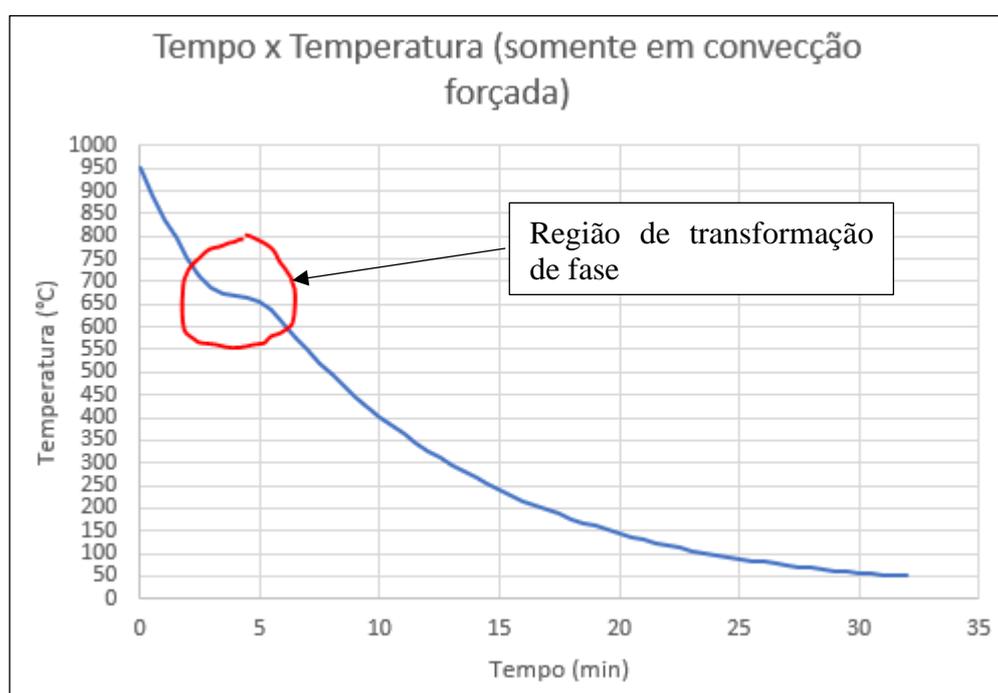


Fonte: o autor (2022).

A curva em azul representa a queda de temperatura de acordo com o tempo de resfriamento, o marco referente a transformação de fase ocorre em aproximadamente 680 °C, a microestrutura obtida não impacta nas propriedades desejadas pelo cliente final.

Já para o resfriamento em convecção forçada, com o auxílio de ventilador axial, até a temperatura de 50 °C a redução no tempo de resfriamento é ligeiramente considerável, chegando dessa forma a 32 minutos para atingir a temperatura requerida, conforme identificado na Figura 14.

Figura 14 - Resfriamento dos eixos em convecção forçada



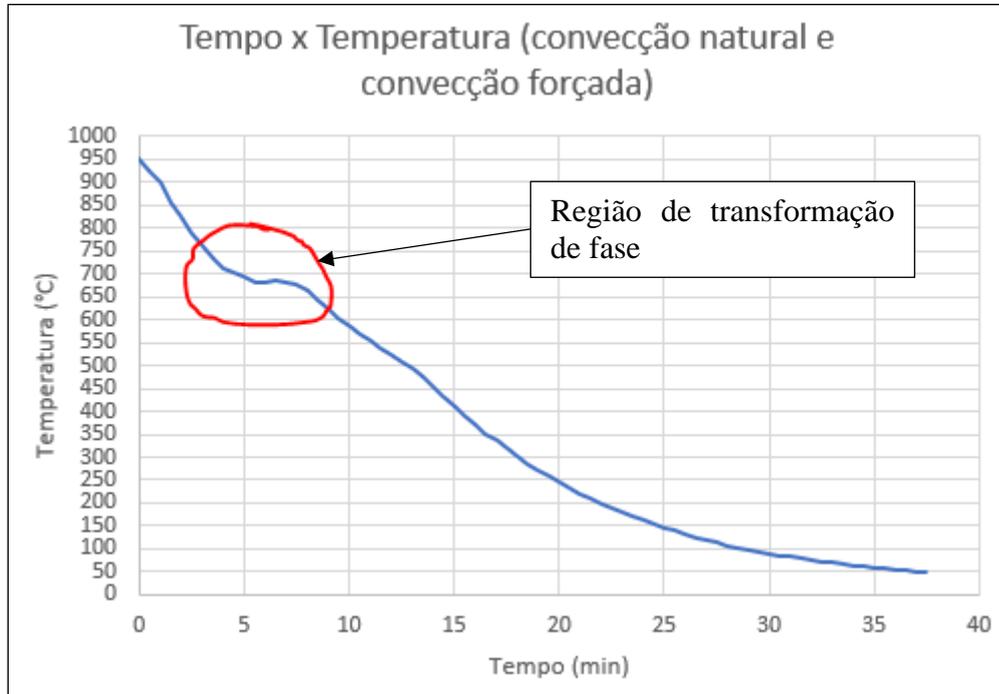
Fonte: o autor (2022).

A curva em laranja determina a queda de temperatura de acordo com o tempo de resfriamento em convecção forçada, até a temperatura de 50 °C. Novamente é destacado a região de transformação de fase, região crítica para a mudança das propriedades do aço em processo de resfriamento após o forjamento, porém nessa simulação não teve impactos direcionados as propriedades do aço. A partir do gráfico gerado é possível identificar que o comportamento da curva não muda muito em relação ao obtido através do resfriamento em convecção natural, que é realizado como esperado em um tempo maior (no caso, praticamente 3 vezes maior que em convecção forçada).

Por fim, é destacado na Figura 15 o comportamento da curva de resfriamento referente a transferência de calor a partir do aquecimento em 950 °C até a temperatura de 500 °C e, dessa

temperatura, com o auxílio de ventilador para forçar o ar através dos eixos até a temperatura final de 50 °C.

Figura 15 - Resfriamento dos eixos em convecção natural seguido de convecção forçada



Fonte: o autor (2022).

O tempo destinado para esse ensaio ficou em torno de 38 minutos, contabilizando dessa forma um total de aproximadamente 13 minutos para o resfriamento em convecção natural e 25 minutos, para a convecção forçada até os 50 °C desejados. A região de destaque da transformação de fase não afeta das propriedades finais desejadas pelo cliente.

Conforme mostra o gráfico, o comportamento da curva para esse ensaio não ficou muito diferente dos demais. Conforme a literatura indica, a partir do diagrama de transformação isotérmica para o aço SAE 1045, a região crítica para a formação da bainita é a temperatura de 600 °C. Por isso, se torna necessário o resfriamento lento até os 500 °C, pois a partir dessa temperatura o material não tem mais condições de transformação bainítica em sua microestrutura, o que fragiliza a peça em operação, não indicado para materiais de segurança como um eixo de fricção de freio (CHIAVERINI, 1986).

Sabendo que o tempo total de resfriamento de uma peça até a temperatura de 50 °C ficou em torno de 37,5 min, para um ciclo de produção de 25 segundos 90 peças seriam forjadas, com isso e considerando um espaçamento entre eixos de 100 mm (0,1 m) o comprimento final para a esteira seria de 9000 mm (9 m). Como o tempo de resfriamento em convecção natural

até a temperatura de 500 °C ficou em torno de 13 min, 32 peças seriam produzidas nesse tempo, com isso o comprimento da esteira para o resfriamento em convecção natural seria de 3200 mm (3,2 m) e o resfriamento em convecção forçada com um comprimento de 5800 mm (5,8 m), comprimento ligeiramente maior para a região de convecção forçada, devido ao tempo de resfriamento para esse processo ser maior em 24,5 min.

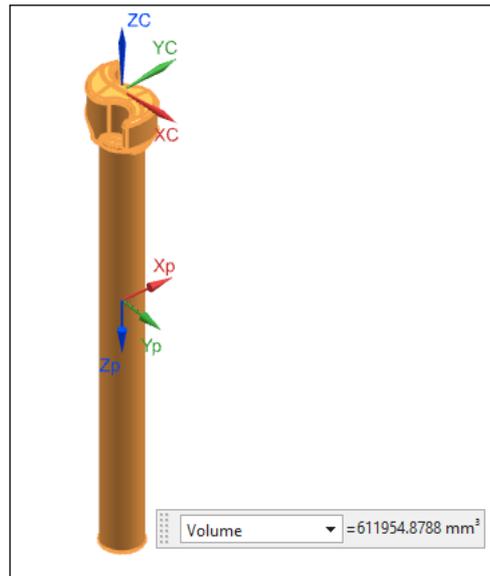
4.3 RESULTADOS ANALÍTICOS

A partir das conclusões obtidas com os ensaios práticos realizados, foi feita uma comprovação dos resultados obtidos com a resolução dos cálculos analíticos, tendo como dados de entrada as especificações de temperatura inicial, intermediária e final para o processo de resfriamento.

Para os cálculos foi considerado o modelo de eixo 16,5 qp, cujo código de denominação interna para controle junto a Master possui a seguinte numeração 100000014373. O eixo considerado foi de dimensões iguais ao do estudo experimental, ou seja, diâmetro de 39,67 mm e comprimento de 460 mm. Os cálculos foram divididos em dois momentos, um especialmente para a convecção natural até os 500 °C e outro para a convecção forçada dos 500 °C até os 50 °C.

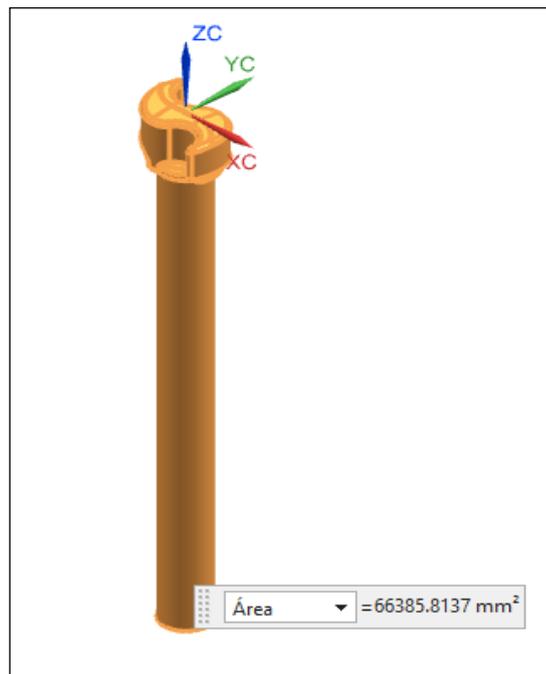
Sabendo que o material do eixo é aço SAE 1045, define-se as principais variáveis para esse aço, segundo Bergman et al. (2019): coeficiente de condutividade $k = 50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; calor específico $c = 450 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; e massa específica $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$. Além disso, foi considerada uma temperatura ambiente (T_∞) de 25 °C e as demais temperaturas, conforme descrito nos ensaios realizados, sendo dessa forma a temperatura inicial (T_i) de 950 °C e a temperatura final intermediária (T_{fi}) de 500 °C. O volume e a área da peça foram extraídos diretamente do *software* de projeto usado *NX*, conforme indicado nas Figuras 16 e 17, ou seja, o volume encontrado foi de 611954,8788 mm³ ($6,1195 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) e área superficial 66385,8137 mm² ($0,066385 \text{ m}^2$), respectivamente.

Figura 16 - Volume do eixo modelo 16,5 qp



Fonte: o autor (2022).

Figura 17 - Área superficial do eixo modelo 16,5 qp



Fonte: o autor (2022).

Com os dados de entrada estimados, a única variável a ser definida foi o coeficiente de convecção para a convecção natural, o qual foi estimado através de tentativa e erro, em $20 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$, valor que parece alto, mas em função de que as peças estão em movimento junto com a esteira, isso pode induzir algum movimento do ar através das mesmas. Com isso,

aplicando o Método da Capacitância Global, o número de *Biot* foi calculado, a partir da Equação (13), conforme mostrado a seguir.

$$Bi = \frac{h \cdot V}{k \cdot A_s} = \frac{20 \cdot 611954,8788}{50 \cdot 66385,8137 \cdot 1000} = 3,7 \cdot 10^{-3} < 0,1$$

Método da Capacitância Global pode ser utilizado para fomentar os cálculos de transferência de calor envolvidos no processo de resfriamento dos eixos de fricção. Para isso, foi utilizado a Equação (10) para se chegar no tempo de resfriamento, como mostrado na sequência.

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A_s} \cdot \ln \frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty}$$

Ou seja,

$$t = \frac{7800 \cdot 611954,8788 \cdot 450}{20 \cdot 66385,8137 \cdot 1000 \cdot 60} \cdot \ln \frac{950 - 25}{500 - 25} \cong 18,0 \text{ min}$$

Para coeficientes convectivos inferiores ao estimado, o número de *Biot* continuava abaixo de 0,1, porém o tempo ficava ainda mais disperso do encontrado, por isso foi estimado o coeficiente convectivo de $20 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Como observado nos cálculos o valor para o tempo de resfriamento do eixo em convecção natural até a temperatura de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ficou acima do valor encontrado nos testes práticos ($\approx 13 \text{ min}$). Porém, se for utilizado um valor menor para o h , o tempo se afasta ainda mais do valor prático obtido, pois o t é inversamente proporcional ao coeficiente convectivo.

Considerando que além dos mecanismos de transferência de calor por convecção e condução, o eixo sofre também perda por radiação. Nesse caso, a equação para o cálculo do tempo t envolvendo convecção e radiação é dado pela solução da integral a seguir mostrada, segundo Bergman et al. (2019).

$$t = -\frac{\rho \cdot V \cdot c}{A_s} \cdot \int_{T_i}^{T_f} \frac{dT}{h(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_{viz}^4)}$$

Para o processo entre 950 °C e 500 °C, usando os valores de ρ, c, V e A_s mencionados antes, e admitindo um valor de $h = 2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, uma emissividade (ε) de 0,85, constante de Stefan-Boltzmann (σ) de $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $T_\infty = T_{\text{viz}} = 25 \text{ °C}$, obtém-se o valor de t pelo calculador *WolframAlpha Computational intelligence* (www.wolfram.com) como segue

$$t = \frac{7800 \cdot 611954,9 \cdot 450}{66385,8 \cdot 1000 \cdot 60} \cdot \int_{1223}^{773} \frac{dT}{2 \cdot (T - 298) + \frac{0,85 \cdot 5,67 \cdot (T^4 - 298^4)}{10^8}} \cong 5,9 \text{ min}$$

Valor esse um pouco mais da metade do valor prático obtido ($\approx 13 \text{ min}$). Observa-se da equação acima, que o aumento do coeficiente convectivo, faz diminuir ainda mais o tempo t .

Aplicando as mesmas equações para o processo que envolve a transferência de calor por convecção forçada entre os 500 °C até os 50 °C, considerando para isso um coeficiente de convecção (h) de $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, tem-se os seguintes resultados, primeiramente aplicando o Método da Capacitância Global, tem-se

$$Bi = \frac{h \cdot V}{k \cdot A_s} = \frac{50 \cdot 611954,8788}{50 \cdot 66385,8137 \cdot 1000} \cong 0,0092 < 0,1$$

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A_s} \cdot \ln \frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty}$$

$$t = \frac{7800 \cdot 611954,8788 \cdot 450}{50 \cdot 66385,8137 \cdot 1000 \cdot 60} \cdot \ln \frac{500 - 25}{50 - 25} \cong 31,8 \text{ min}$$

Valor esse, 27,2% maior que o valor prático obtido ($\approx 25 \text{ min}$). Pelo cálculo da integral envolvendo convecção e radiação, o valor de t resulta como segue.

$$t = \frac{7800 \cdot 611954,9 \cdot 450}{66385,8 \cdot 1000 \cdot 60} \cdot \int_{773}^{323} \frac{dT}{50 \cdot (T - 298) + \frac{0,85 \cdot 5,67 \cdot (T - 298^4)}{10^8}} \cong 26,0 \text{ min}$$

Esse valor representa 4,0% maior que o valor prático obtido. Observa-se ainda, que um aumento no coeficiente convectivo ($\approx 52 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), diminui o valor da integral acima para 25,0 min.

Para o cálculo que envolve a convecção forçada é visível que a radiação afeta a transferência de calor do eixo, uma vez que o resultado do cálculo que considera a perda de

calor por radiação ficou mais próximo do valor obtido nos testes práticos. Entretanto, reconhece-se que o processo de troca térmica na esteira é mais complexo do que apenas um eixo no ar envolvente. Isso porque, há a influência da proximidade entre os eixos e da troca de calor por condução dos mesmos em contato com a esteira em movimento.

4.4 RESULTADOS SIMULADOS VIA CFD

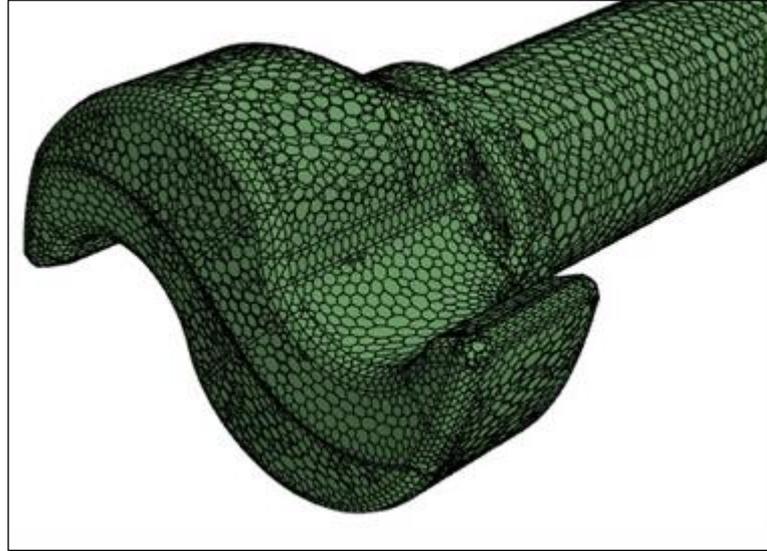
Com o intuito de comprovar e comparar os dados obtidos em testes e simulações práticas foi realizada uma simulação CFD junto ao *software Ansys*. Para a simulação foi considerado o eixo modelo 16,5 qp com diâmetro de 39,65 mm e comprimento de 460 mm. Para isso, algumas considerações foram levantadas afim de obter uma condição de contorno ideal com a observada na prática.

Dessa forma foram feitas duas simulações CFD, uma para comparar os dados práticos referentes ao resfriamento em convecção natural e outra para representar e comparar os dados referentes a convecção forçada.

Para a convecção natural, foi considerada a temperatura ambiente (T_{∞}) de 27 °C e a temperatura alvo no centro da cabeça do eixo. O coeficiente convectivo (h) adotado para os testes numéricos foi de $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Diferente do resultado encontrado analiticamente para a análise numérica, também através de métodos de tentativa e erro o coeficiente convectivo ideal para encontrar o tempo necessário de resfriamento ficou em $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. As propriedades que envolvem o aço 1045H, aço utilizado para o forjamento do eixo, são descritas a partir da bibliografia também da seguinte forma: massa específica (ρ) de 7870 kg/m^3 ; coeficiente de condutividade (k) de $51,9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; e calor específico do aço (c_p) $486 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

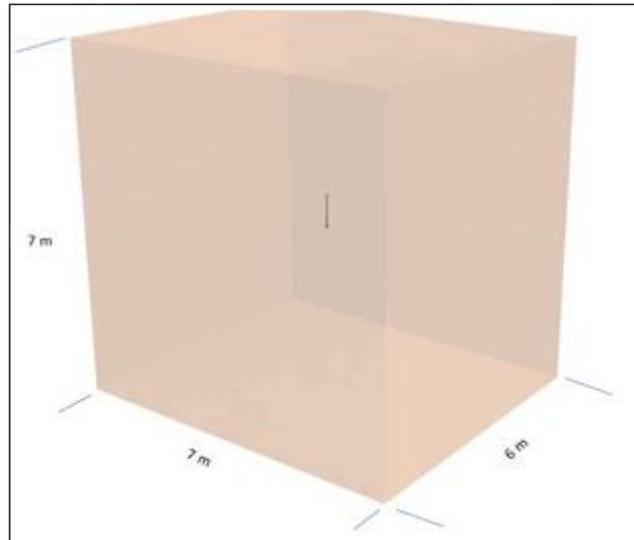
Além disso foi considerada uma malha poliédrica com 177.044 elementos, conforme identificada na Figura 18, sendo que o eixo se encontra centralizado no domínio mostrado na Figura 19, representando o *farfield* do desenvolvimento, ou seja, foi considerado essas dimensões para a expansão do ar a partir do eixo, com uma grandeza de 3,5 m.

Figura 18 - Domínio do eixo modelado com elementos poliédricos



Fonte: o autor (2022).

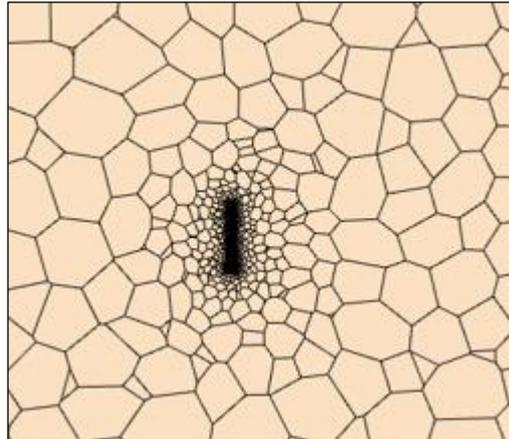
Figura 19 - Domínio do ar envolvente ao eixo



Fonte: o autor (2022).

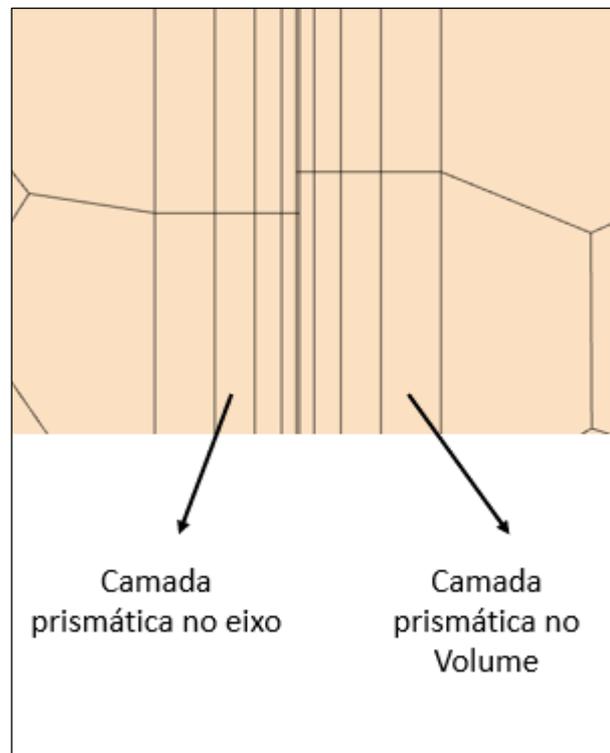
Como mostrado na Figura 20, junto do eixo e no lado do ar foi gerada uma malha mais refinada de algumas camadas de elementos prismáticos em virtude dessa região ser representada pela camada limite, região onde ocorrem os processos mais relevantes de transferência de calor. Um pouco mais distante do eixo, também no lado do ar, gerou-se uma malha menos refinada de volumes maiores para não gerar tantos elementos. Isso é visto com mais detalhes na Figura 21, mostrando dessa forma do lado esquerdo uma representação aproximada do eixo e no lado esquerdo do ar.

Figura 20 - Malha no ar na proximidade imediata ao eixo



Fonte: o autor (2022).

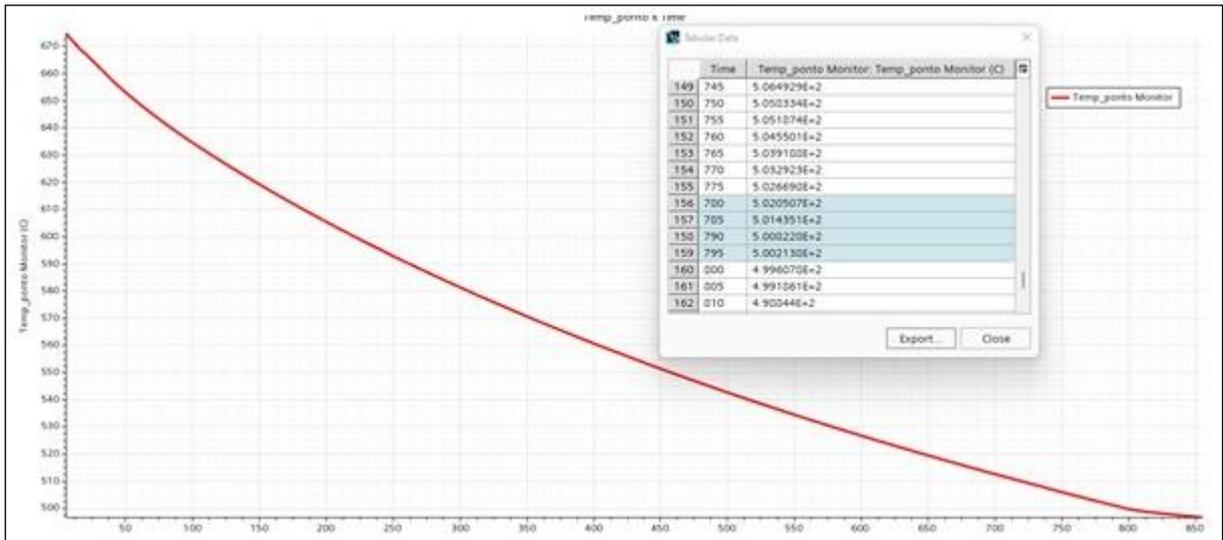
Figura 21 - Malha aumentada no ar próximo



Fonte: o autor (2022).

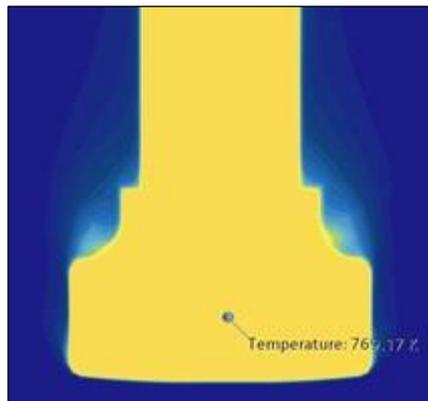
Com isso, o resultado obtido para a simulação referente ao processo de convecção natural são mostrados na Figura 22, com um tempo de resfriamento de 950 °C até 500 °C em aproximadamente 780 s ou 13 min, resultado esse igual ao encontrado na prática, conforme identificado na Figura 23. Para essa simulação foi considerada a perda de calor por radiação, para isso foi adotada uma emissividade do aço em 0,9, conforme INCROPERA 2019.

Figura 22 - Resultados da simulação na convecção natural



Fonte: o autor (2022).

Figura 23 - Tempo de resfriamento na cabeça do eixo “s”



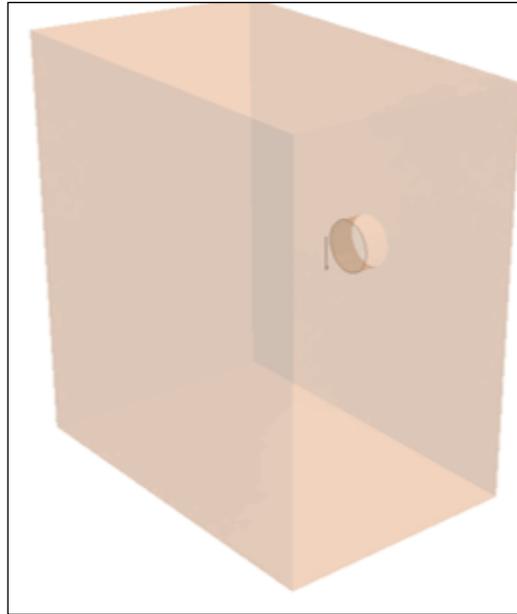
Fonte: o autor (2022).

Para a simulação envolvendo a convecção forçada, tendo como ponto de partida os dados coletados na simulação feita na empresa Termo Aço, a fim de obter dados reais comparados aos observados na prática, sabendo que o intervalo de temperatura desejado para estudo é entre 500 °C e 50 °C. As propriedades envolvendo o material do eixo de fricção de freio permanecem as mesmas.

Da mesma forma que foi feito para a simulação que envolve o resfriamento em convecção natural, o *farfield* para a análise que envolve a convecção forçada possui as seguintes dimensões largura de 7 m, profundidade de 4,6 m e altura de 7,5 m, conforme identificado na Figura 24. O eixo está centralizado no bloco de análise, onde foi considerado dessa forma uma

expansão do ar somente nessa região de forma que toda a análise envolvendo o eixo esteja desse volume do *farfield* e todas as paredes desse voltadas para o meio externo.

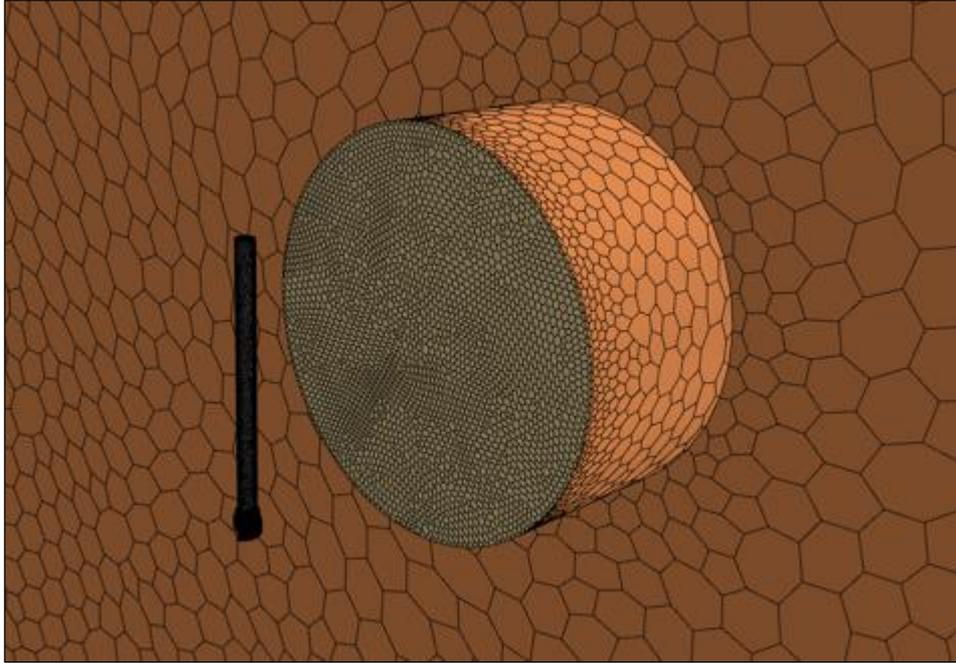
Figura 24 - Domínio do ar envolvente ao eixo com círculo representando ventilador



Fonte: o autor (2022).

As condições de contorno consideradas para a simulação CFD foram pressão atmosférica de 101.325 Pa, temperatura do eixo (T_i) 500 °C, vazão do ventilador 6,73 kg/s, coeficiente convectivo do ar (h) 53 W/m² · K, diâmetro externo do ventilador axial 1000 mm. A malha considerada para a simulação é uma malha poliédrica de 4 camadas de prismas com um número de elementos de 624.810. Na Figura 25 é mostrada parte da malha CFD ao redor do eixo “s” em estudo e do ventilador soprando o ar ao redor do eixo.

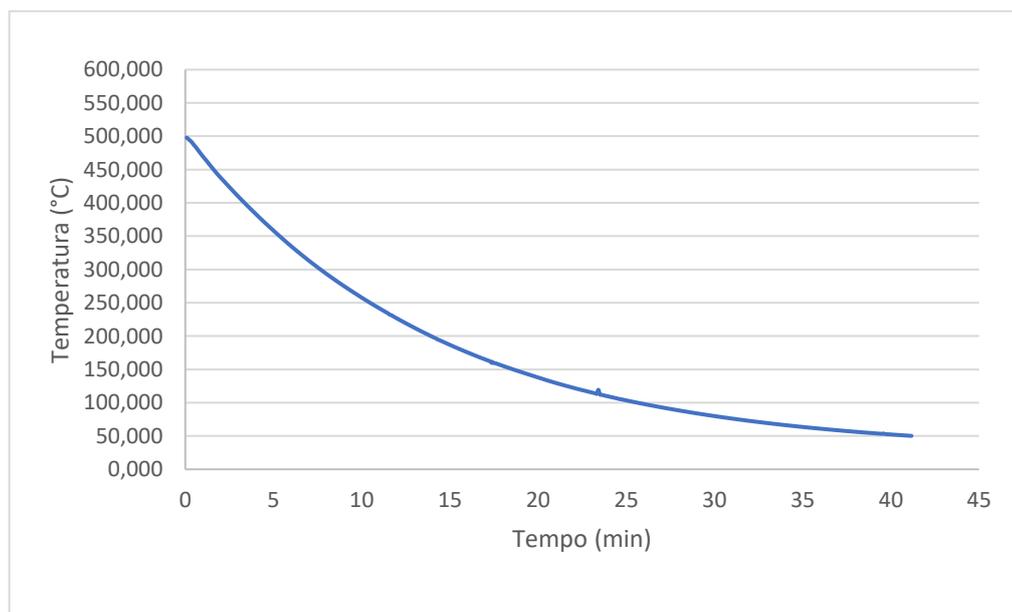
Figura 25 - Malha de elementos ao redor do eixo e no espaço destinado ao ventilador



Fonte: o autor (2022).

Os resultados envolvendo essa simulação são retratados na Figura 26. No intervalo de temperatura entre 500 °C e 50 °C através das condições de contorno estabelecidas o tempo de resfriamento ficou em torno de 40 minutos, tempo esse que ficou aproximadamente 63% maior que aquele obtido nos testes práticos.

Figura 26 - Resultados da simulação CFD para o resfriamento com convecção forçada



Fonte: o autor (2022).

4.5 EXPERIMENTO PRÁTICO NO *LAYOUT* FÍSICO

Para comprovação dos resultados obtidos nos cálculos analíticos e por meio da simulação CFD realizada junto ao eixo, foi feita uma conferência de medidas e temperatura no eixo durante o processo já existente na Master.

O experimento foi realizado dia 10/11/2022, sendo a temperatura registrada no dia e no período do ensaio de 19 °C. Para a análise foi utilizado o termômetro digital Optris ms pro pyrometer e o cronômetro digital Technos, modelo yp2151, ambos já mencionados no capítulo 3.

A esteira existente hoje na célula de forjamento possui 4,5 m de comprimento, sendo que nessa as peças são resfriadas por convecção natural, com uma velocidade máxima de 10 m/min. Além disso, vale ressaltar que a esteira sai do repouso a cada entrada de peças e retorna novamente ao repouso até que o ciclo de uma nova peça seja completo, num tempo estimado em 25 segundos. Para o experimento foi feito marcações na esteira, registrando a temperatura a cada 1 m em que o eixo transcorria pela mesma. A Tabela 2 apresenta os dados encontrados.

Tabela 2 - Resultados obtidos em processo

Medições	C (m)	T (°C)	t (min)
1	0	770	0
2	1	591,5	4
3	1,4	514,1	6
4	2,4	352,3	10,67
5	3,4	290,6	15,5
6	4,4	229,1	20,5

Fonte: o autor (2022).

O modelo de eixo produzido no dia era o 325hd com um diâmetro bruto de 35 mm e um comprimento de 590 mm. Em função da proteção no entorno da esteira o ponto de medição em relação a cabeça do eixo ficou distante em torno de 400 mm, conforme observado na Figura 27. Em função dessas variáveis, talvez o ensaio prático não tenha sido tão eficiente para comprovação de resultados, porém, pode ser feita uma estimativa de velocidade da nova esteira de acordo com o modelo de eixo produzido, sendo maior ou menor conforme seu volume e sua área superficial. Conforme dados reportados na Tabela 2, o resfriamento dos eixos se deu a uma taxa média de 26,4 °C/*min* (contra 36 °C/*min* do ensaio prático) e a 120,2 °C/*m*.

Figura 27 - Transporte dos eixos pela esteira transportadora



Fonte: o autor (2022).

Após saírem da esteira as peças caem em uma caixa onde ficam até serem processadas todas as peças estimadas para a produção no período. Exemplo, se houver 100 barras de eixo na esteira de entrada e mais 100 peças cortadas na serra, as peças ficam na caixa até as 200 peças caírem nela. Na caixa as peças ficam resfriando por convecção natural e após todo o ciclo de fabricação, elas ainda permanecem na caixa até atingirem a temperatura de manuseio e serem conduzidas ao processo de jateamento. Para essa análise faltou o controle de variáveis.

4.6 ESTIMATIVA DIMENSIONAL DE ESTEIRA E VENTILADORES

Adotando como parâmetro os dados encontrados no teste realizado juntamente com a empresa de tratamento térmico Termo Aço, ficou definido que a esteira necessitaria de um comprimento de 9 m para realizar o processo de resfriamento dos eixos de 950 °C até 50 °C. Dos 9 m de esteira, 3,2 m seriam destinados ao resfriamento em convecção natural e 5,8 m destinados à convecção forçada, definição essa estimada a partir dos tempos de resfriamento encontrados na simulação (13 min para convecção natural e 24,5 min para convecção forçada).

Com isso, tendo como base os testes práticos realizados no *layout* físico da Master e simulando dessa forma uma condição real de processo, foi registrado que para um eixo como o “325hd” de menor área e menor volume atingir a temperatura de 229,1 °C, foi necessário um tempo de 20,5 minutos. Esse tempo foi encontrado em 4,4 m de esteira, com uma velocidade

de 10 m/min e com paradas simultâneas de aproximadamente 25 segundos, contemplando a fabricação de uma peça, da esteira após a entrada de novos eixos.

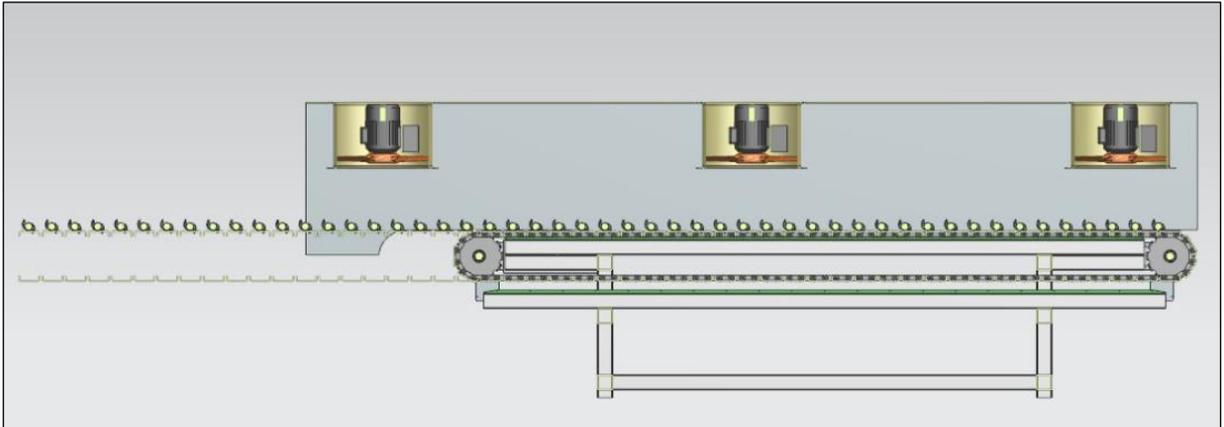
Entretanto, considerando o caso da esteira de 9 m de extensão, dos quais 3,2 m são destinados ao resfriamento em convecção natural e considerando que o eixo entrará a 950 °C, tendo que resfriar até 500 °C em 13 min ($950 - 500/13 = 34,6$ °C/min no ensaio prático), a velocidade da esteira teria que ser de 0,246 m/min (3,2 m/13 min). Ou ainda, a taxa de resfriamento nesse trecho da esteira nova teria que ser de 140,6 °C/min (450 °C/3,2 m). Porém, essa taxa de resfriamento não foi alcançada na esteira atual, a qual foi de 120,2 °C/m.

Considerando a mesma velocidade da esteira de 0,256 m/min para a convecção forçada e sabendo que nos testes feitos junto a empresa Termo Aço, o eixo levou 24,5 min para chegar nos 50 °C (450 °C/24,5 min = 18,4 °C/min), o eixo levaria 23,6 min (5,8 m/0,246 m/min) para chegar nos 5,8 m de esteira. Isso também representa uma taxa de resfriamento de 77,6 °C/m. Para reduzir o tempo de resfriamento a vazão volumétrica de ar teria que ser adequada para cumprir com o resfriamento desejado. Sendo assim, deveria ser adotado uma vazão de ar relativamente maior que aquela utilizada nos ensaios práticos da Termo Aço, ou seja, de 19800 m³/h.

De acordo com o catálogo do fornecedor Brasfaiber, disponível no link <https://www.brasfaiber.com.br/ventilador-axial/> apresentado no Anexo A, poderiam ser avaliadas para o processo, o modelo VA83 ou o modelo VA93. Como a esteira terá a largura de 1 metro, especificação essa que independe dos cálculos e definições por parte do eixo, mas sim de uma condição que leva em conta o maior comprimento de eixo e o espaço físico disponível, poderia ser adotado uma distribuição de ventiladores axiais dispostos na horizontal sobre a esteira de pelo menos 3 ventiladores modelo VA63 de vazão volumétrica de 11200 m³/h cada um.

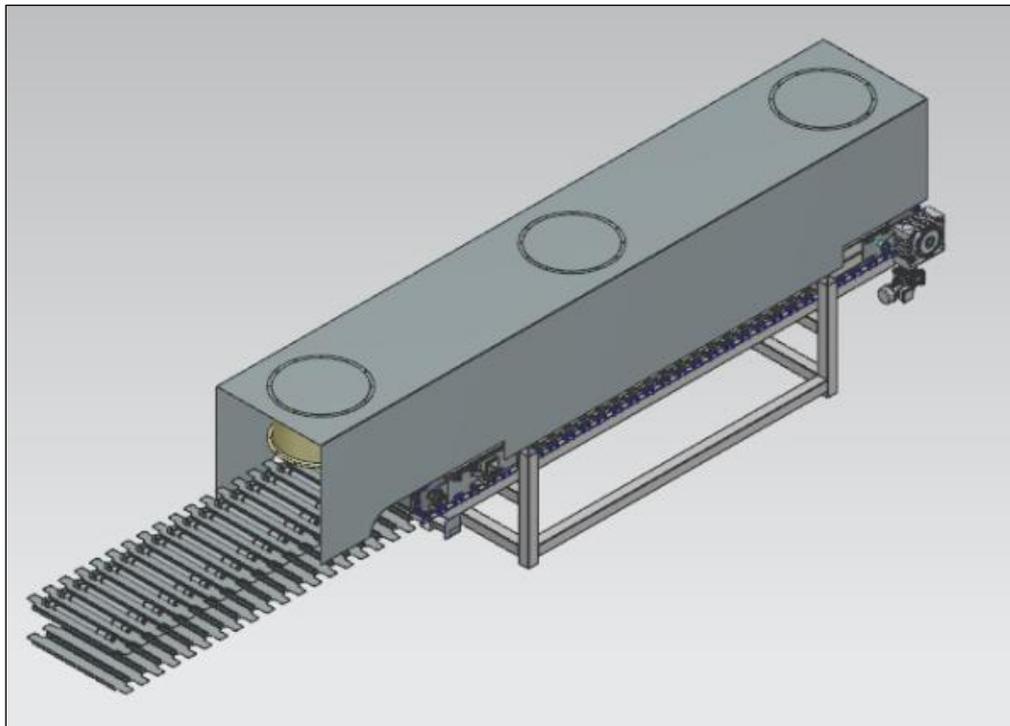
A Figura 28 mostra uma representação da esteira na área destinada a troca de calor por convecção forçada, no esboço é mostrada a disposição dos ventiladores, com hélice voltada para baixo na direção de passagem dos eixos. O perfil onde os ventiladores estão fixados é uma espécie de carenagem da esteira, formando dessa forma um duto de passagem de ar. Essa disposição de ventiladores na esteira foi pensada através de pesquisas feitas em catálogos de fornecedores. Na Figura 29 a esteira é mostrada em uma perspectiva 3D.

Figura 28 - Representação da esteira com ventiladores a partir de um corte no seu eixo



Fonte: o autor (2022).

Figura 29 - Representação da esteira com ventiladores em 3D



Fonte: o autor (2022).

5 CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados obtidos no ensaio realizado na empresa Termo Aço, cujo tempo total de resfriamento para o eixo s ficou em torno de 37,5 min, sendo que desses, 13 min para o resfriamento em convecção natural e 24,5 min para a convecção forçada, essa análise reflete diretamente na comparação com os dados obtidos analiticamente. Levantando um comparativo entre esses resultados tem-se que analiticamente e nas análises feitas via simulação CFD as respostas finais divergiram-se bastante, apesar de na primeira simulação feita para o resfriamento em convecção natural fechar o valor com o ensaio prático. Apesar da diferença ser relativa comparando as respostas a simulação feita na empresa Termo Aço, serviu de parâmetros para a sequência do projeto.

Conclui-se dessa forma que a dimensão da esteira estipulada no início dos estudos, tendo como base as simulações práticas e os cálculos realizados, atende a necessidade de trabalho exercida no layout físico da Master. Sendo assim os 9 m de esteira divididos em 3,2 m para o resfriamento em convecção natural e os 5,8 m para o resfriamento considerando a convecção forçada estão dentro do limite observados na prática.

Apesar de a margem para trabalho aparentemente ser pequena, uma alternativa para aproveitar melhor a área destinada para esse processo e os comprimentos de cada etapa é a adequação de um motoredutor com inversor de frequência, para ter um controle melhor na velocidade da esteira, dessa forma pode-se trabalhar com velocidades menores para eixos com volume e massa de aquecimento maiores. Apesar do tempo de ciclo da célula permanecer o mesmo, com o inversor de frequência trabalhando juntamente com o motoredutor a esteira pode ter picos de velocidade sendo maiores na sua entrada para não ter o risco de colisão e diminuir relativamente até alcançar os 3,2 m, essa analogia é válida para a convecção forçada também.

O ventilador recomendado teve como base principalmente a simulação feita na empresa Termo Aço a partir disso e comprovando com os cálculos que envolvem a condução transiente estima-se a especificação de um ventilador de mesma característica do utilizado no ensaio prático. Apesar do ventilador especificado para projeto ter um alcance relativamente grande que atenderia tranquilamente o espaço destinado para convecção forçada, no trabalho foi recomendado a utilização de três ventiladores para ocupar a maior área possível de contato com o eixo e dessa forma aumentar a eficiência no que tange o próprio resfriamento. Com a analogia de adequação da esteira para acoplar os três ventiladores, foi considerado um ventilador um pouco menor, com uma vazão menor também.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de novos testes para maior precisão no processo. Os testes realizados para esse trabalho possuem algumas divergências, que podem ter relação com o modelo de eixo utilizado, o fato de o eixo já estar forjado e ser reaquecido em um forno diferente do utilizado no processo real, os parâmetros adotados nos cálculos analíticos e numéricos e a divergência de dados de entrada como a temperatura ambiente considerada em cada análise, os coeficientes convectivos adotados e a consideração ou não da perda de calor por radiação.

Apesar disso, os dados encontrados foram suficientes para elaboração do projeto, porém, para continuidade do trabalho deve ser feito um ensaio no layout físico com o modelo de eixo 16,5qp, uma vez que esse possui a maior massa de aquecimento. Além disso torna-se importante realizar uma medição mais precisa com uma câmara de visão ou aproximar o pirômetro da peça aquecida, dessa forma tirando as proteções da esteira para realizar o ensaio.

Outra estimativa importante é a abordagem mais crítica do coeficiente convectivo, realizando cálculos para determiná-lo. Dessa forma, o erro associado aos resultados poderia diminuir. Em projeto seria interessante avaliar outras hipóteses como acrescentar um difusor retirando dessa forma um dos ventiladores.

Levando em consideração que hoje o processo depende de muitas variáveis e que, por se tratar de uma célula robotizada, não possui um ciclo contínuo de fabricação. A elaboração do projeto e fabricação da esteira seria interessante para automatizar de fato a célula. Isso poderia eliminar algumas etapas do processo atual como o tempo de resfriamento das peças após forjamento, na caixa de saída, ou o ciclo intermitente da esteira, uma vez que hoje ela depende do forjamento das peças.

REFERÊNCIAS

ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. **Cold and Hot Forging**. [S. l.]: ASM International, 2005. Available at: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.chffa.9781627083003>.

APOSTOŁ, M.; SKUBISZ, P.; ADRIAN, H. Determination of Heat Transfer Coefficient for Air-Atomized Water Spray Cooling and Its Application in Modeling of Thermomechanical Controlled Processing of Die Forgings. **Materials**, v. 15, n. 7, 1 abr. 2022.

GUIMARÃES DE SOUZA, E. et al. **THE ASSESSMENT OF HOT FORGING BATCHES THROUGH COOLING ANALYSIS** *Journal of Machine and Forming Technologies*. [s.l: s.n.].

BARBOSA, Alexandre Jardim. **MELHORIA DE DESEMPENHO DE UM PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE PASTILHAS DE FREIO APÓS CURA DE TINTA**. 2010. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2010.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; **INCROPERA**, Frank; DEWITT, David, P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2019.

CALLISTER JR. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução Sérgio Murílio Stam Soares, 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, 589p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. Vol II 2ºed. McGraw-Hill, São Paulo 1986.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 7ª ed, SP: Brasil, 2012.

FERNANDES, Laura de Sousa Ramos. **ANÁLISE TÉRMICA ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE EIXO DE AÇO**. 2017. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GUIMARÃES DE SOUZA, E. et al. **THE ASSESSMENT OF HOT FORGING BATCHES THROUGH COOLING ANALYSIS** Journal of Machine and Forming Technologies. [s.l: s.n.].

GUINSBURG, Leonardo Pitrez. **Aumento de produtividade em processos de forjamento através da redução de desperdícios: Oportunidades latentes em grandes multinacionais.** 2021. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GRONOSTAJSKI, Z.; HAWRYLUK, M.; JABŁOŃSKI, P.; ZWIERZCHOWSKI, M.; BARELKOWSKI, A.; WIDOMSKI, P.. THE EFFECT OF HEAT TREATMENT OF FORGINGS DIRECTLY FROM THE FORGING TEMPERATURE ON THEIR PROPERTIES. **Archives Of Metallurgy And Materials.** Polish, p. 1-12. 5 ago. 2020.

LONGHI, Murilo Scherner. **DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE FREIO DE UM SEMIRREBOQUE.** 2013. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

MADERS, Augusto Reichelt. **INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM COMPONENTE FORJADO A QUENTE EM AÇO DIN 38MnVS6.** 2021. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

METALS HANDBOOK. Vol.14 **-Forming and Forging.** 9. Ed. Ohio: American Society for Metals International,1993.

Milwaukee Forge. **Open-Die Forging vs. Closed-Die Forging.** Disponível em: <<https://www.milwaukeeforge.com/difference-between-open-die-and-closed-dieforging/>>. Acessado em 29/05/2022.

MUVUNZI, R. et al. **Heat Transfer in a Hot Stamping Process: A Review**Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering. [s.l: s.n.]. 2017. Disponível em: <<http://www.saimeche.org.za>>.

ANEXO A – Vazões de ventiladores axiais segundo Brasfiber

Modelo	Vazão	Pressão	Diâmetro	Motor
VA27-M	2.000 m ³ /hora	5 mmCA	300 mm	0,25 CV – IV Polos
VA27	2.000 m ³ /hora	5 mmCA	300 mm	0,25 CV – IV Polos
VA35	3.500 m ³ /hora	5 mmCA	350 mm	0,33 CV – IV Polos
VA40	4.500 m ³ /hora	5 mmCA	400 mm	0,33 CV – IV Polos
VA45	6.400 m ³ /hora	5 mmCA	450 mm	0,33 CV – IV Polos
VA53	10.000 m ³ /hora	5 mmCA	500 mm	1,0 CV – IV Polos
VA63	11.200 m ³ /hora	5 mmCA	600 mm	0,75 CV – VI Polos
VA63-W	16.900 m ³ /hora	5 mmCA	600 mm	2,0 CV – IV Polos
VA73	19.000 m ³ /hora	5 mmCA	700 mm	1,5 CV – VI Polos
VA83	23.000 m ³ /hora	5 mmCA	800 mm	1,5 CV – VI Polos
VA93	28.000 m ³ /hora	5 mmCA	900 mm	1,5 CV – VIII Polos
VA93-W	32.000 m ³ /hora	5 mmCA	900 mm	3,0 CV – VI Polos
VA103	35.000 m ³ /hora	5 mmCA	1.000 mm	1,5 CV – VIII Polos
VA103-W	44.500 m ³ /hora	5 mmCA	1.000 mm	3,0 CV – VI Polos