

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CLARICE MARTINS LIMA CAMPANHA DUTRA

ANÁLISE TÉRMICA DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE SUBMERSÃO DE
ARAMES EM BANHO DE CHUMBO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

BELO HORIZONTE

2022

CLARICE MARTINS LIMA CAMPANHA DUTRA

ANÁLISE TÉRMICA DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE SUBMERSÃO DE ARAMES
EM BANHO DE CHUMBO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2022

CLARICE MARTINS LIMA CAMPANHA DUTRA

ANÁLISE TÉRMICA DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE SUBMERSÃO DE ARAMES
EM BANHO DE CHUMBO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira – Orientador

Prof. Dr. Tiago de Freitas Paulino

Prof. Ludoff Leonardo Santini

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor André Guimarães Ferreira pela paciência, compreensão e suporte para que este trabalho fosse elaborado.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante toda a jornada no CEFET-MG fazendo dos meus dias mais engraçados.

A minha amiga Renata que sempre me incentivou, apoiou e esteve presente nas minhas decisões mais difíceis.

Aos meus colegas de trabalho que me encorajaram todas as vezes que pensei em desistir ao longo do caminho e compartilharam seus ensinamentos comigo.

E a todos aqueles que de alguma forma impactaram positivamente na minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

Na indústria de produção de arames, tratamentos térmicos são amplamente empregados para alcançar propriedades mecânicas desejadas ao produto. O recozimento por banho de chumbo é um processo que traz o aumento da tenacidade do arame trefilado e é utilizado em larga escala devido a sua produtividade e capacidade de transferir calor. Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas para investigar em quanto tempo um arame submerso em banho de chumbo atingiria a temperatura do chumbo líquido e, assim, o processo de recozimento ocorresse no material. Para as análises, foram estipulados cenários com parâmetros diferentes de temperatura do banho e de velocidade. Os resultados indicam que o aumento da velocidade causa uma tendência de diminuição no tempo de permanência do arame em banho de chumbo. Também foi possível observar que nas simulações feitas em temperatura de 450 °C houve uma queda do tempo maior do que em simulações realizadas em temperatura de 500 °C. Não foi possível comparar os resultados numéricos com analíticos pelo método da capacitância global, em função da faixa do número de Biot para as condições reais simuladas.

Palavras-chave: Simulação numérica. Transferência de calor. Arame. Chumbo.

ABSTRACT

In the wire production industry, heat treatments are widely used to achieve desired products's mechanical properties. Lead bath annealing is a process that increases the tenacity of drawn wire and is used on a large scale due to its productivity and ability to transfer heat. In this work, numerical simulations were performed to investigate how long a wire submerged in a lead bath would reach the temperature of liquid lead and, thus, the annealing process to take place in the material. For the analyses, scenarios with different parameters of bath temperature and speed were stipulated. The results indicate that the increase in speed causes a tendency to decrease the residence time of the wire in a lead bath. It was also possible to observe that in the simulations carried out at a temperature of 450 °C there was a greater drop in time than in the simulations carried out at a temperature of 500 °C. It was not possible to compare the numerical and analytical results by the global capacitance method, in reason of the range of the Biot number for the simulated real conditions.

Key-words: Numerical simulation. Heat transfer. Wire. Lead

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de controle diferencial para análise da condução em coordenadas cilíndricas.	14
Figura 2 – Condições de contorno para a equação da difusão térmica na superfície ($x = 0$). .	16
Figura 3 – Transferência de calor por condução associada à atividade molecular.....	17
Figura 4 – Modo de transferência de calor por condução.	17
Figura 5 - Distribuição de temperaturas transientes para $Bi < 0,1$ em uma parede plana simetricamente resfriada por convecção.....	20
Figura 6 – Representação da formação e separação da camada-limite sobre um cilindro circular em escoamento cruzado.....	21
Figura 7 – Representação dos perfis de velocidades associados com a separação sobre um cilindro em escoamento cruzado.	22
Figura 8 – Representação da influência da turbulência na separação da camada-limite.....	23
Figura 9 – Desenho esquemático de barra em processo trefilação.....	27
Figura 10 - Desenho esquemático de bancada de trefilação.....	28
Figura 11 – Representação gráfica das propriedades mecânicas de material trefilado.	28
Figura 12 – Influência da temperatura de recozimento nas propriedades mecânicas e nos grãos de uma liga metálica.	30
Figura 13 - Fluxograma das etapas de cálculos realizados para se obter o coeficiente de transferência de calor do chumbo.....	32
Figura 14 – Geometria polar escolhida.....	33
Figura 15 – Dimensões da geometria e da malha numérica.	33
Figura 16 – Formato do objeto simulado.	34
Figura 17 – Seleção do material constituinte do arame.....	34
Figura 18 - Condições de contorno da camada Leste.....	35
Figura 19 – Tipo de função para as condições de contorno da camada Leste.....	35
Figura 20 – Condições de contorno das camadas Norte, Sul e Oeste.	35
Figura 21 – Temperatura de entrada do arame.	36
Figura 22 – Parâmetros de simulação em relação ao tempo.....	36
Figura 23 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção das curvas teóricas pelo Método da capacitância global.....	38
Figura 24 – Condução do calor na primeira simulação.	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 450 °C.	41
Gráfico 2 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 475 °C.	41
Gráfico 3 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 500 °C.	41
Gráfico 4 – Comparativo das curvas de tempo de imersão para as duas temperaturas simuladas.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades termofísicas do chumbo líquido.....	32
Tabela 2 – Critérios de simulação.	37
Tabela 3 – Resultados do número de Reynolds, número de Nusselt e coeficiente de transferência de calor para cada simulação.....	40
Tabela 4 – Número de <i>Biot</i> para cada cenário simulado.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
3.1	Fundamentos de Transferência de Calor	14
3.1.1	<i>Equação de Calor.....</i>	14
3.1.2	<i>Princípios de Condução.....</i>	16
3.1.2.1	<i>Método da capacitância global.....</i>	18
3.1.3	<i>Princípios da Convecção</i>	20
3.1.3.1	<i>Convecção forçada ao redor de cilindros infinitos.....</i>	21
3.2	Métodos numéricos na engenharia.....	24
3.2.1	<i>Método dos Volumes Finitos</i>	24
3.2.2	<i>Estudos com Simulação Numérica</i>	25
3.3	Trefilação.....	27
3.4	Tratamentos térmicos.....	29
3.4.1	<i>Recozimento</i>	29
4	METODOLOGIA.....	31
4.1	Simulação numérica com o software TransCal	31
4.2	Método da capacitância global	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1	Método da capacitância global	43
6	CONCLUSÃO	44

1 INTRODUÇÃO

Para a fabricação de arames é usada a conformação mecânica conhecida por trefilação. Sua matéria-prima, o fio-máquina, é forçado à passagem entre uma série de fieiras, cujos diâmetros se reduzem progressivamente até atingir a bitola de interesse (DIETER, 1981; KIMINAMI *et al.*, 2013). O esforço mecânico sofrido pelo fio-máquina deforma plasticamente o produto, conferindo ao arame tensões residuais devido ao aumento da densidade de discordâncias em sua microestrutura. Nessas condições físicas, as propriedades do arame são influenciadas, principalmente a sua ductilidade devido à maior resistência à tração conferida pela deformação plástica (SILVA, 2011). O fenômeno que descreve as características em que se encontra um arame após trefilação é o encruamento e, para reverter esse fenômeno, são utilizados tratamentos térmicos com o intuito de alterar o conjunto de propriedades mecânicas que o metal possui no momento. Assim, o recozimento, popular tratamento térmico que devolve a ductilidade dos metais, é amplamente aplicado em arames, reduzindo as tensões residuais e a resistência à tração (ASSIS *et al.*, 2020; CASTRO, 2015).

Como o recozimento é um processo usado em escala industrial, é de grande importância garantir que seja eficiente e que atenda aos critérios de segurança, qualidade e custos da fábrica (NEUBAUER, 2009). O fator de competitividade no mercado exige que o produto tenha as características desejadas, no que tange aos arames, ser maleável garante que não se rompa facilmente, além de atender a demanda, o que implica na necessidade de um conjunto de processamentos ágeis (CHIAVERINI, 2008; NEUBAUER, 2009).

Devido a esse cenário, um conjunto de análises industriais pode ser realizado para examinar o desempenho dos processos através dos métodos de simulações numéricas, isso em razão de poderem ser adaptados às geometrias simples e complexas, além de serem ferramentas precisas e de menor custo comparadas às análises laboratoriais (KREPCKI, 2016).

A análise térmica em arames contribui para se obter relações de tempo em que o arame sob tratamento térmico leva para atingir a temperatura desejada e, com isso, novas estratégias industriais podem ser adotadas para desenvolvimentos de projetos de aumento de produtividade e de capacidade de linhas de produção.

Quando se trata de simulações numéricas para transferência de calor, o método usado precisa garantir que as propriedades do material sejam conservadas e um método capaz de atender a essa exigência é o Método de Volumes Finitos que faz uso da lei geral de conservação (MALISKA, 2004; RODRIGUES, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo deste trabalho é analisar, por meio da simulação computacional, o comportamento de um corpo cilíndrico (arame), durante tratamento térmico para alívio de tensões em banho de chumbo, através dos princípios da transferência de calor. Com isso, comparar os resultados obtidos com os calculados pelo Método da capacitância global, para avaliar a necessidade de desenvolver projetos de melhoria contínua no setor industrial, identificando possíveis características do processo que possam ser adaptadas, como tempo de banho e controle de temperatura.

2.2 *Objetivos específicos*

Foram definidos como objetivos específicos:

- Avaliar a possibilidade de analisar o tempo de imersão do arame em banho de chumbo comparativamente com as curvas do Método de Capacitância Global.
- Avaliar a possibilidade de analisar a temperatura atingida pelo arame imerso em banho de chumbo comparativamente com as curvas do Método de Capacitância Global.
- Determinar o tempo mais adequado de imersão do arame em banho de chumbo em termos de qualidade e produtividade.
- Determinar a temperatura mais adequada do banho de chumbo em termos de qualidade e produtividade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

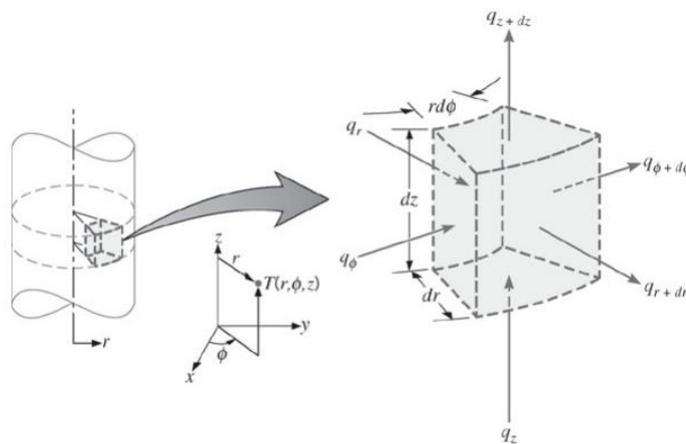
3.1. Fundamentos de Transferência de Calor

3.1.1 Equação de Calor

Através da lei de Fourier é possível conhecer a distribuição do fluxo térmico condutivo em um ponto qualquer ou na superfície de um material a partir do conhecimento da distribuição de temperaturas em um corpo. Torna-se necessário então, determinar o campo de temperaturas em um meio sob condições de contorno (INCROPERA *et al.*, 2014).

Com o objetivo de determinar a distribuição de temperaturas aplica-se a lei da conservação da energia. Para isso, é definido um volume de controle diferencial (Figura 1), em que se possa identificar os processos de transferência de calor envolvidos e que sejam relevantes para serem substituídos por equações das taxas de transferência de calor apropriadas (INCROPERA *et al.*, 2014).

Figura 1 – Volume de controle diferencial para análise da condução em coordenadas cilíndricas.



Fonte: INCROPERA *et al.*, 2014.

Dessa forma, obtém-se uma equação diferencial com condições de contorno definidas que, como solução, mostra a distribuição de temperaturas do meio selecionado (INCROPERA *et al.*, 2014).

A equação (1), chamada por equação de calor, atua como um modo de analisar a condução de calor em um meio definido, além de descrever uma importante condição física que é a conservação da energia. Nela, a equação de calor está apresentada na forma de coordenadas

cilíndricas e é possível obter a distribuição de temperaturas $T(r, \phi, z)$ como uma função do tempo (t) (INCROPERA *et al.*, 2014).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde r, ϕ, z são as coordenadas cilíndricas, k é a condutividade térmica do material (W/m.K), \dot{q} é taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m³), ρ é a massa específica e c_p é o calor específico a pressão constante do material.

Pode-se afirmar que a equação de calor mostra que, seja um ponto qualquer do meio, a taxa de variação da energia térmica que é acumulada por um volume unitário é igual a taxa líquida de transferência de energia por condução para o interior deste volume adicionando-se, ainda, a taxa volumétrica de geração de energia térmica (INCROPERA *et al.*, 2014). Para solucionar a equação de calor, é necessário determinar quais são as condições físicas que estão presentes nas fronteiras do meio e analisar se há mudanças ao longo do tempo para, em caso afirmativo, também determinar as condições presentes em algum instante inicial. Assim, com essas condições definidas, é possível obter a distribuição das temperaturas nesse meio (INCROPERA *et al.*, 2014).

Considerando um sistema unidimensional, tem-se as condições de contorno especificadas na superfície $x=0$. Considera-se também o sentido positivo da direção x para a transferência de calor, através da distribuição das temperaturas podendo ser em função do tempo, sendo ela $T(x,t)$ (INCROPERA *et al.*, 2014).

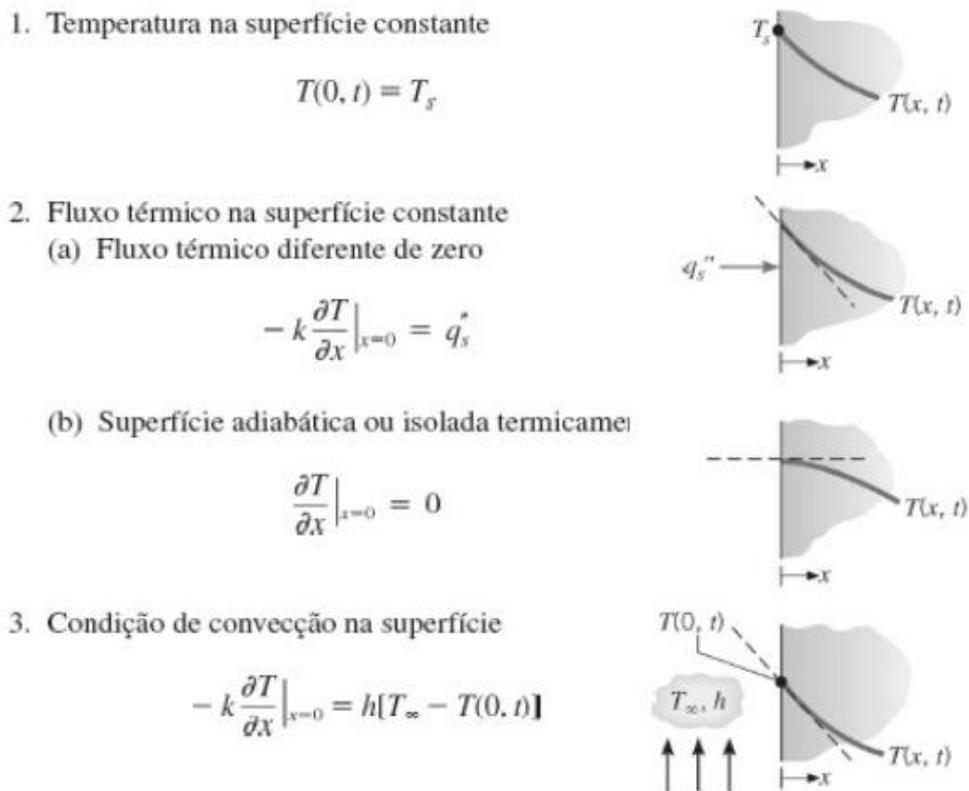
Para a primeira condição, conhecida como condição de Dirichlet ou condição de contorno de primeira espécie, tem-se a situação em que há uma temperatura fixa T_s em uma superfície. Essa condição é empregada para situações, como exemplo, em que um sólido em fusão ou um líquido em ebulição está em contato com a superfície havendo transferência de calor enquanto permanece na temperatura de mudança de fase (INCROPERA *et al.*, 2014).

A segunda condição, comumente chamada de condição de Neumann ou de condição de contorno de segunda espécie, relaciona um fluxo térmico constante na superfície ao gradiente de temperatura na superfície através da lei de Fourier. Como exemplo, tem-se as superfícies perfeitamente isolada ou adiabática, ou seja, uma superfície que atenda à igualdade $\partial T / \partial x |_{x=0} = 0$ (INCROPERA *et al.*, 2014).

Por fim, a terceira condição é conhecida por condição de contorno de terceira espécie é obtida pelo balanço de energia na superfície sendo relacionada a aquecimento ou resfriamento em uma superfície por convecção (INCROPERA *et al.*, 2014).

Essas condições de contorno são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Condições de contorno para a equação da difusão térmica na superfície ($x = 0$).



Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al.*, 2014.

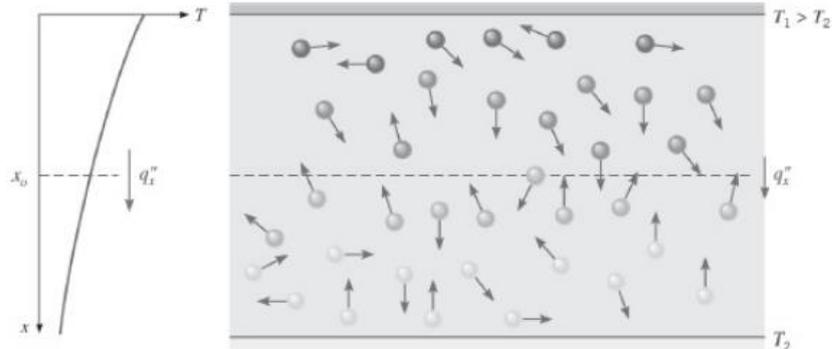
3.1.2 Princípios de Condução

Para interpretar a condução é preciso compreender de que se trata de um processo em nível atômico e molecular, isso porque a transferência de calor por condução acontece basicamente devido às interações entre as partículas envolvidas, transferindo energia das mais energéticas para as menos energéticas. Nos sólidos, é associada à transferência de energia a ondas na estrutura de retículos induzidas pelo movimento atômico, além da migração de elétrons livres nos metais (INCROPERA *et al.*, 2014).

Já nos líquidos, quando as partículas possuem maior quantidade de energia associada a elas uma maior temperatura. Essa energia carregada pelas partículas faz com que elas se choquem aleatoriamente umas às outras, transferindo calor das mais energéticas para as menos

energéticas. Se há um gradiente de temperatura atrelado ao sistema analisado, ele ocorrerá em sentido da diminuição da temperatura (Figura 3) (INCROPERA *et al.*, 2014).

Figura 3 – Transferência de calor por condução associada à atividade molecular.



Fonte: INCROPERA *et al.*, 2014

A transferência de calor por condução está presente em diversos momentos diários, como na perda de calor de um quarto aquecido ao ambiente externo em dias frios, onde a troca de calor por condução ocorre pelas paredes, como, também, em tratamentos térmicos realizados no interior de metais (INCROPERA *et al.*, 2014). A esquematização da transferência de calor por condução é exemplificada na Figura 4.

Figura 4 – Modo de transferência de calor por condução.



Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al.*, 2014.

Quando as condições de temperatura mudam ao longo do tempo, tem-se um sistema de condução transiente. Ou seja, quando a temperatura não é estacionária implica-se em

situações em que as condições de contorno de um sistema são alteradas. Exemplificando, se a temperatura da superfície de um sistema mudar, a temperatura de cada ponto desse sistema também sofrerá alterações até que entre novamente em estado estacionário (INCROPERA *et al.*, 2014).

3.1.2.1 Método da capacitância global

O método da capacitância global baseia-se na hipótese de que um sólido possui sua temperatura uniforme por toda sua extensão no momento em que ocorre um processo de transferência de calor transiente, independente do instante analisado. Para isso, é necessário que os gradientes de temperatura no interior do sólido sejam pouco significativos (INCROPERA *et al.*, 2014).

No entanto, sabe-se que, pela lei de Fourier, sem um gradiente de temperatura durante uma condução térmica, teria de haver uma condutividade térmica infinita e isso não é possível. Ainda assim, há a possibilidade de ter essa condição aproximada caso a resistência à condução for pequena no interior de um sólido (comparada à resistência à transferência de calor convectiva entre um sólido e seu ambiente ao redor) (INCROPERA *et al.*, 2014).

Devido à equação do calor ser uma equação diferencial, descrevendo a distribuição espacial das temperaturas no interior do sólido, quando se despreza os gradientes de temperaturas não se pode mais analisar o caso utilizando essa equação. Para obter uma forma de analisar esse problema, o balanço de energia global no sólido, relacionando a taxa de variação da energia interna com a taxa de perda de calor na superfície, traz como alternativa a resposta transiente da temperatura (INCROPERA *et al.*, 2014).

A partir desse balanço, tem-se a equação (2) em que é possível calcular o tempo necessário para que o sólido alcance determinada temperatura, ao passo em que a equação (3) é possível calcular a temperatura atingida em determinado tempo (INCROPERA *et al.*, 2014).

$$\frac{\rho V c}{h A_s} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad (2)$$

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{h A_s}{\rho V c_p} \right) t \right] \quad (3)$$

Definindo $\theta_i = T_i - T_\infty$, tem-se, T_∞ como a temperatura do fluido em escoamento, T_i temperatura inicial, T é a temperatura inicial do sólido, h como coeficiente de transferência

de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), A_s como a área superficial, ρ como densidade, V como volume e c_p como o calor específico do fluido.

A grandeza $\frac{\rho V c}{h A_s}$, pode ser representada como uma constante de tempo térmica como na equação (4).

$$\tau_t = \left(\frac{1}{h A_s}\right) (\rho V c) = R_t C_t \quad (4)$$

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

Para determinar o total da energia transferida Q até algum instante de tempo t , tem-se a equação (5). Sendo a grandeza Q relacionada à alteração na energia interna do sólido.

$$Q = (\rho V c) \theta_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_t}\right)\right] \quad (5)$$

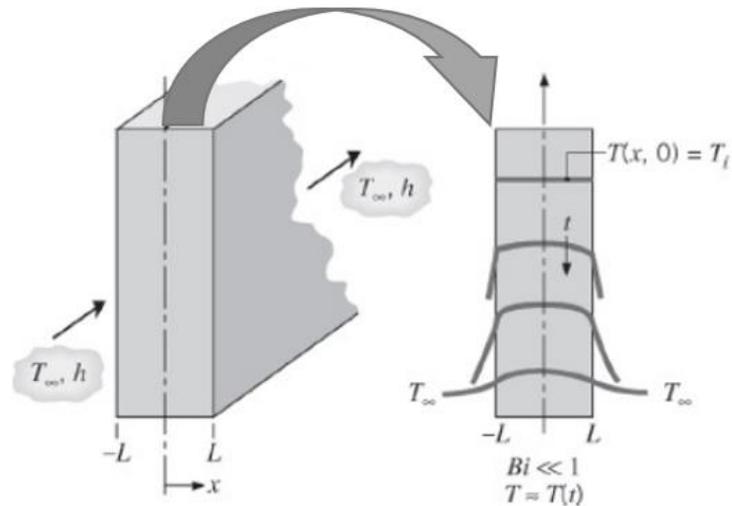
Sabendo que o Método da Capacitância Global é um método simples e conveniente para ser usado nas soluções de problemas transientes de resfriamento e aquecimento, é importante determinar as condições para seu uso satisfatório. Sua validação ocorre quando o número de Biot, equação (6), é menor que 0,1. Para isso, a resistência à transferência de calor por convecção através da camada limite do fluido deve ser muito superior à resistência à transferência de calor por condução no interior do sólido (INCROPERA *et al.*, 2014).

$$Bi = \frac{h L_c}{k} < 0,1 \quad (6)$$

Sendo Bi o parâmetro adimensional denominado número de Biot, h o coeficiente de transferência de calor por convecção, k a condutividade térmica do sólido e L_c o comprimento característico. Ainda, L_c é definido como $L_c = \frac{V}{A_s}$, em que V é o volume do sólido e A_s é a área superficial por qual ocorre a transferência de calor para o meio.

Na Figura 5 é ilustrado como é distribuída a temperatura para o $Bi < 0,1$.

Figura 5 - Distribuição de temperaturas transientes para $Bi < 0,1$ em uma parede plana simetricamente resfriada por convecção.



Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al.*, 2014.

3.1.3 Princípios da Convecção

A transferência de calor por convecção acontece no contato entre um fluido em movimento e uma superfície, ambos em diferentes temperaturas. Nela estão presentes dois mecanismos diferentes contribuindo para a troca térmica. O primeiro mecanismo se refere à movimentação molecular aleatória (difusão), trocando calor mediante o contato entre as partículas envolvidas no sistema. Já o segundo mecanismo se refere ao movimento global do fluido, ou advecção, (grande quantidade de moléculas se deslocando como agregados). Como os agregados são constituídos de moléculas, cada uma delas, com movimentos aleatórios, transferem energia das mais energéticas para as menos energéticas. Com a presença de um gradiente de temperatura, esse movimento global do fluido atua transferindo calor (INCROPERA *et al.*, 2014).

Com a interação, entre a superfície e o fluido em movimento, é gerada a camada-limite hidrodinâmica ou de velocidade. Essa é uma região no escoamento em que a velocidade do fluido varia entre zero na região de contato com a superfície ($y=0$), e um valor finito (u_∞) relativo à corrente livre (INCROPERA *et al.*, 2014).

Em paralelo, uma região chamada por camada-limite térmica é gerada se as temperaturas da superfície e do fluido forem diferentes, sendo que a temperatura variará de T_s , em $y = 0$, a T_∞ , relativa à região do escoamento afastada da superfície. A camada-limite térmica não necessariamente possui o mesmo tamanho da camada-limite de fluidodinâmica. No entanto,

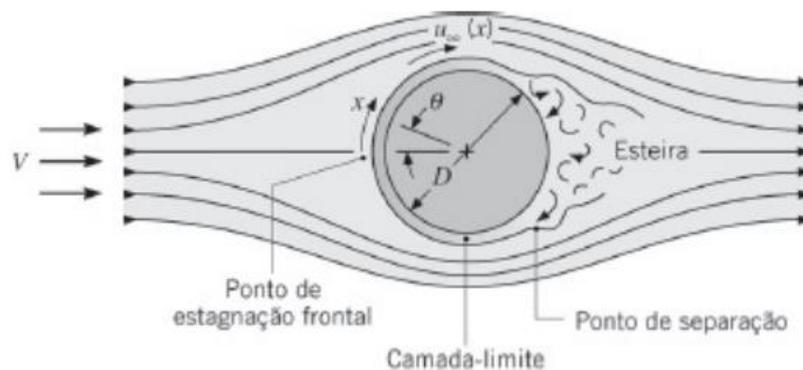
caso a $T_s > T_\infty$, a transferência de calor por convecção ocorrerá da superfície para o fluido em escoamento (INCROPERA *et al.*, 2014).

Como na interface entre a superfície e o fluido ($y=0$) a velocidade do fluido é nula, o único mecanismo de transferência de calor por convecção que acontece nessa região é a difusão. A troca de calor por convecção através do movimento global passa a acontecer à medida que o escoamento progride na direção do eixo x , aumentando a espessura da camada-limite. Sendo assim, o calor que é conduzido para o interior dessa camada-limite é levado na direção do escoamento para depois ser transferido para o fluido presente no exterior da camada-limite (INCROPERA *et al.*, 2014).

Pode-se classificar a transferência de calor por convecção em forçada ou livre (natural). Na convecção forçada o escoamento é provocado por meios externos, como uma bomba ou um ventilador. Já na convecção livre o escoamento é promovido por forças de empuxo causadas pelas diferenças de densidades que ocorrem por variação de temperatura no fluido. Quando ambos os tipos de convecção estão presentes, com ordens de grandezas similares, a convecção é denominada mista (INCROPERA *et al.*, 2014).

3.1.4 Convecção forçada ao redor de cilindros infinitos

Figura 6 – Representação da formação e separação da camada-limite sobre um cilindro circular em escoamento cruzado.



Fonte: INCROPERA *et al.*, 2014.

Incropera *et al.* (2014) consideram um cenário em que o fluido da corrente livre é conduzido ao repouso no ponto de estagnação frontal (Figura 6). Em seguida, a pressão diminui à medida que x (coordenada da linha de corrente) aumenta enquanto a camada-limite se desenvolve influenciada pelo gradiente de pressão favorável ($dp/dx < 0$). Entretanto, ao passo

que a pressão deve atingir um mínimo e na direção da parte de trás do cilindro, a camada-limite é desenvolvida na presença de pressão adverso ($dp/dx > 0$). A esquematização dessa situação é ilustrada na Figura 7.

Figura 7 – Representação dos perfis de velocidades associados com a separação sobre um cilindro em escoamento cruzado.



Fonte: INCROPERA *et al.*, 2014.

Quando $u_\infty = 0$, tem-se o ponto de estagnação. O fluido é acelerado por ação do gradiente de pressão favorável ($du_\infty/dx > 0$ quando $dp/dx < 0$), possui velocidade máxima quando $dp/dx = 0$, e desacelera sob ação do gradiente de pressão adverso ($du_\infty/dx < 0$ quando $dp/dx > 0$).

Conforme o fluido desacelera, o gradiente de velocidade na superfície ($\partial u/\partial y|_{y=0}$) torna-se zero. A característica dessa região, chamada de ponto de separação ($\partial u/\partial y|_{y=0} = 0$), é a falta de momento suficiente para que o fluido próximo à superfície supere o gradiente de pressão e, portanto, o movimento para jusante não ocorre. À medida que o fluido se concentra nessa região, ele obstrui o movimento em direção inversa e surge a necessidade de separação da camada-limite, dessa forma, a camada-limite é descolada da superfície, formando uma esteira na região a jusante e seu escoamento passa a ser irregular e formado por vórtices (INCROPERA *et al.*, 2014).

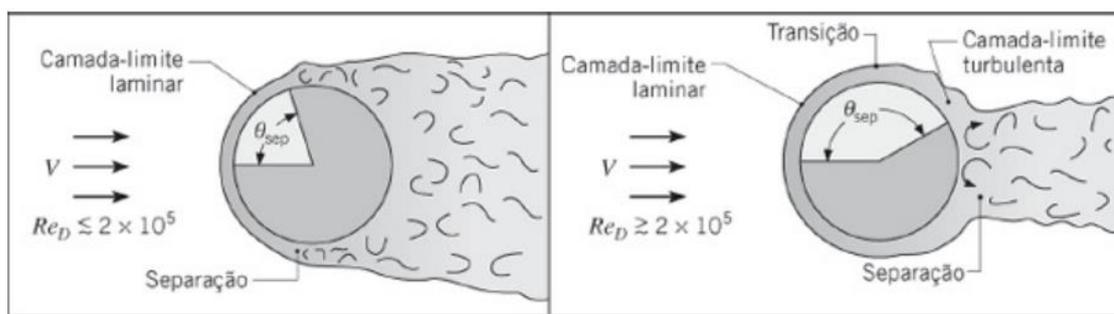
A transição dessa camada-limite é dependente do número de Reynolds atuando na posição do ponto de separação. A equação (7) demonstra o cálculo do número de Reynolds.

$$Re_d = \frac{\rho V \phi}{\mu} \quad (7)$$

Sendo ρ a massa específica do fluido, V é a velocidade média do fluxo, μ a viscosidade dinâmica do fluido e, considerando um cilindro circular, o comprimento característico é o seu diâmetro (\emptyset).

Devido ao momento do fluido em uma camada-limite turbulenta ser maior do que de uma camada-limite laminar, se $Re_d < 2 \times 10^5$ a camada-limite permanece laminar e a separação ocorre em $\Theta = 80^\circ$. Se $Re_d > 2 \times 10^5$ a camada-limite sofre transição e sua separação acontece até $\Theta = 140^\circ$ (Figura 8) (INCROPERA *et al.*, 2014).

Figura 8 – Representação da influência da turbulência na separação da camada-limite.



Fonte: INCROPERA *et al.*, 2014.

Para correlacionar Nusselt (um parâmetro adimensional que representa para a camada-limite térmica o que o coeficiente de atrito representa para a camada-limite de velocidade) ao número de Reynolds, foi proposto uma única equação que cobre todos os Re_d cujos dados estão disponíveis, além de uma extensa faixa de Prandtl (propriedade do fluido que fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas limite de velocidade e térmica, respectivamente). A equação (8) é apresentada e recomendada para todos os $Re_d Pr > 0,2$, sendo todas as propriedades avaliadas na temperatura do filme (INCROPERA *et al.*, 2014).

$$\overline{Nu}_d = 0,3 + \frac{0,62 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_d}{282.000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (8)$$

E, para correlacionar o número de Nusselt com o coeficiente de transferência de calor (h), a equação (9) é descrita de acordo com correlação empírica proposta por Hilpert apud Incropera (2014).

$$\overline{Nu} = \frac{h\phi}{k} \quad (9)$$

Sendo k a condutividade térmica do fluido (W/m.K).

3.2 Métodos numéricos na engenharia

Com o advento dos computadores a solução de problemas de engenharia sofreu um aumento significativo. Para alcançar as soluções dos problemas matemáticos é necessário o uso de técnicas cuja resolução possa ser realizada com operações lógicas e aritméticas. Essas técnicas são conhecidas como métodos numéricos, importantes ferramentas na resolução de problemas capazes de lidar com muitas equações ao mesmo tempo, não linearidades e geometrias complexas, constantemente trabalhadas na engenharia (CHAPRA, 2013).

Apesar de ainda serem muito úteis nas soluções de problemas e no fornecimento de uma visão ampla da situação, as soluções analíticas não apresentam algumas ferramentas para a resolução de alguns obstáculos frequentemente enfrentados pela engenharia. Assim, é avaliada a possibilidade de se trabalhar com os métodos numéricos já que esses possuem outros recursos nas soluções de problemas (CHAPRA e CANALE, 2016).

3.2.1 Método dos Volumes Finitos

Dentro das técnicas de simulação numérica, sendo elas diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos, o método de volumes finitos (MVF) é o método mais utilizado na indústria para resolver problemas na engenharia que envolvam características conservativas, como conservação de energia, conservação de quantidade de movimento e conservação de massa (MALISKA, 2004; RODRIGUES, 2014). Isso se dá devido à integração da equação da lei geral de conservação através dos volumes de controle, garantindo a conservação dessas propriedades em cada unidade de volume que constitui uma malha (MARTINS, 2016). O Método dos Volumes Finitos é baseado na integração da lei geral de conservação expressada pelas equações governantes em qualquer volume finito do domínio, sendo que cada volume de controle contribui na composição da malha e esta executará as equações algébricas (RODRIGUES, 2014).

Além disso, com esse método é possível poupar custos aos projetos com análise laboratorial, otimizar tempo para analisar processos e aumentar a precisão em projetos. Com isso, é possível o desenvolvimento de simulações sob condições em que o objeto de estudo

estará submetido, sendo possível analisar se o desempenho está dentro do previsto (KREPCKI, 2016).

Para esse trabalho, as características que o MVF apresenta são de interesse para a sua seleção foram (HARTMANN, 2011):

- i. Geometria do objeto de estudo de baixa complexidade - não sendo necessário malhas sofisticadas para análise;
- ii. Método popular e amplamente utilizado na engenharia;
- iii. Garantia de conservação de propriedades pela equação da lei geral de conservação.

3.2.2 Estudos com simulação numérica

Da Silva *et al.* (2019) propuseram um modelo numérico bidimensional para determinar a difusividade térmica e o coeficiente de transferência de calor convectivo para um cilindro em resfriamento.

Uma solução para a equação do calor foi obtida por meio do Método dos Volumes Finitos. A solução numérica foi escolhida pois, mesmo se as propriedades térmicas e as dimensões do domínio variassem ao longo do processo, a solução ainda seria possível de se obter.

Os autores definiram nove tipos de controles de volume, sendo eles: interno, norte, nordeste, sul, sudeste, leste, noroeste, sudoeste e oeste. Como a geometria escolhida possui simetria radial, foi possível observar que os últimos três tipos de controle de volume possuíam fluxo zero no contorno oeste.

A difusividade térmica (α) e o coeficiente de transferência de calor (h) foram determinados usando o *software LS Optimizer*, desenvolvido por dois dos autores deste trabalho. Os valores iniciais dos parâmetros que seriam determinados foram estabelecidos inicialmente como $\alpha_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $h_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

Para o experimento, o objeto de formato cilíndrico utilizado foi um pepino com um raio de 0,019 m e um comprimento L de 0,160 m. Durante o experimento, a massa perdida foi desconsiderada. A umidade do pepino é de 0,96 (p.m.) e sua temperatura T_0 inicial é 22,0 °C. A temperatura do ar refrigerado T_1 é 4,0 °C com velocidade de 2 m/s, com umidade relativa de 80%. A malha usada para a simulação numérica foi de 40 x 100 ud. e o tempo de duração no processo de resfriamento foi dividido em 1000 partes de tempo. Para esses valores, foi possível observar que os primeiros seis algarismos significativos de cada temperatura obtida são independentes de novos refinamentos para a malha e para o tempo.

O modelo numérico bidimensional para geometria cilíndrica neste artigo permitiu determinar simultaneamente duas propriedades térmicas por otimização, suas incertezas e o coeficiente de correlação entre elas, usando um conjunto de dados experimental do processo de resfriamento de um pepino. Os resultados obtidos para os valores médios dos parâmetros são compatíveis com resultados da literatura encontrada pelos autores para o mesmo produto.

Por fim, os autores mostraram que, devido à matriz de covariância calculada durante o processo de otimização, foi possível simular uma nova curva de resfriamento para um pepino semelhante, mas com outras dimensões, incluindo uma banda de confiança que permitiu avaliar, por inspeção gráfica, a precisão desta nova simulação.

Uma extensa análise numérica foi realizada por Mohamad *et al.* (2020) para a convecção natural nos cilindros anulares. O objetivo principal deste estudo foi estabelecer correlações para a taxa de transferência de calor em função do tempo e outros parâmetros de controle. O Método de Volumes Finitos foi empregado para discretizar o problema de convecção natural bidimensional e axissimétrica e o método explícito foi usado para discretizar termos dependentes do tempo de equações governantes (continuidade, momento e energia).

O período para a transferência de calor por difusão e advecção foi estudado. O tempo necessário para carregar totalmente o tanque de armazenamento e a taxa de transferência de calor também foram calculados. Os resultados previstos foram comparados com o processo de difusão de calor puro e com um sistema de convecção em estado estacionário. Portanto, a transferência de calor e o fluxo de fluido em um tanque de armazenamento cilíndrico foram simulados por Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC). Para isso, foi usada a convecção natural no tanque de armazenamento para simular a convecção natural em estado instável em cilindros anulares para uma faixa de Rayleigh de 10^4 a 10^8 e para relações de aspecto de raio adimensional de 0,05, 0,1 e 0,2.

As linhas de campo em um fluxo de fluido, isotérmicas, taxa de transferência de calor (número de Nusselt) em função do tempo e número de Rayleigh foram analisados e relatados. Algumas correlações foram desenvolvidas para a taxa de transferência de calor, que é crucial para projetar e operar os tanques de armazenamento térmico sendo que as correlações foram válidas para números de 10^4 a 10^8 e permitiram aos autores calcularem as mudanças do número de Nusselt no tempo de carregamento do tanque. Além disso, o período de carregamento foi analisado e correlacionado em função do número Rayleigh.

Wung e Chen (1989) utilizaram-se do Método dos Elementos Finitos para determinar os coeficientes de transferência térmica de um conjunto de cilindros em linha. As soluções do MEF foram obtidas pelas Equações Bidimensionais de Navier-Stokes.

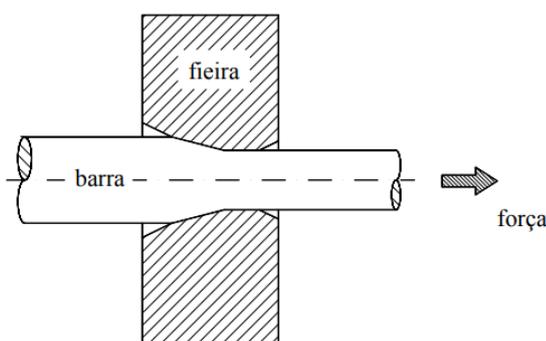
Foram testadas situações diversas com diferentes números de Reynolds (40, 120, 400 e 800) e os resultados previstos no campo de fluxo e transferência de calor são comparados com medições experimentais disponíveis.

O procedimento numérico alcançou êxito para a geometria estudada e foi possível mostrar que esse método numérico é estável e converge rapidamente, isso porque as soluções possuem um contrafluxo automático em relação aos nós vizinhos, portanto, as características das equações de convecção-difusão são preservadas adequadamente nas equações algébricas de Elementos Finitos.

3.3 Trefilação

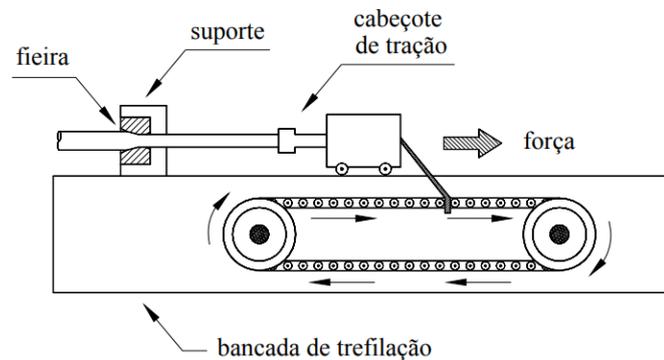
A trefilação é um processo de conformação mecânica através da deformação plástica em que um corpo metálico, tal como o fio-máquina (matéria-prima para fabricação de arames), é tracionado por uma ferramenta denominada feira (Figura 9). Com os esforços mecânicos sofrido pelo fio-máquina, tem-se um aumento longitudinal atrelado à redução da área transversal do produto semiacabado (NUNES, 2008). O processo de trefilação pode ser mostrado esquematicamente através da Figura 10.

Figura 9 – Desenho esquemático de barra em processo trefilação.



Fonte: CORRÊA, 2004.

Figura 10 - Desenho esquemático de bancada de trefilação.

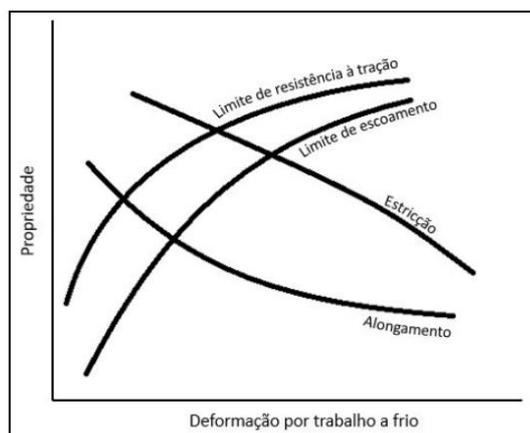


Fonte: CORRÊA, 2004.

Esse processo inicia-se pela decapagem (química ou mecânica) do fio-máquina para a remoção da camada de carepa em na superfície e auxiliar na aderência do sabão lubrificante. Em seguida, o fio-máquina é conduzido à passagem pela fieira (DIETER, 1981). Para a produção de arames, o processo de trefilação é feito em múltiplos passes com fieiras de diferentes diâmetros, reduzindo gradativamente a sua área transversal (KIMINAMI *et al.*, 2013).

Em decorrência do processo, tem-se uma deformação microestrutural com o alongamento e orientação dos grãos paralelos às forças de tração fazendo com que o material tenha suas propriedades mecânicas alteradas devido ao encruamento (ASSIS *et al.*, 2020; CASTRO, 2015). Com o aumento do encruamento, o alongamento e a estricção diminuem. Em contrapartida, o limite de escoamento e a resistência à tração aumentam conforme representado na Figura 11 (SILVA, 2011).

Figura 11 – Representação gráfica das propriedades mecânicas de material trefilado.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2011.

Com a ductilidade reduzida, é comum que seja empregado o tratamento térmico de recozimento para a sua recristalização (SCHAEFFER, 2009).

3.4 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico pode ser definido como um grupo de procedimentos em que se há aquecimento e resfriamento controlados de um material, muito comumente utilizado em aços, sob condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidade de resfriamento. Um dos principais objetivos do tratamento térmico é alterar a estrutura cristalina de um material para conferi-lo características de interesse para a sua aplicação (SEVALE, 2014).

Com esse ciclo térmico, o material pode adquirir ou aperfeiçoar características tais como o aumento de ductilidade, tenacidade e/ou dureza, até mesmo alterar suas propriedades elétricas e magnéticas, dentre outras (TRINDADE *et al.*, 2017). No entanto, para que se obtenha a melhoria de determinadas propriedades, há o prejuízo de outras, por isso, é crucial que haja uma análise criteriosa na escolha do tratamento térmico a fim de se reduzir os inconvenientes (CHIAVERINI, 2008).

3.4.1 *Recozimento*

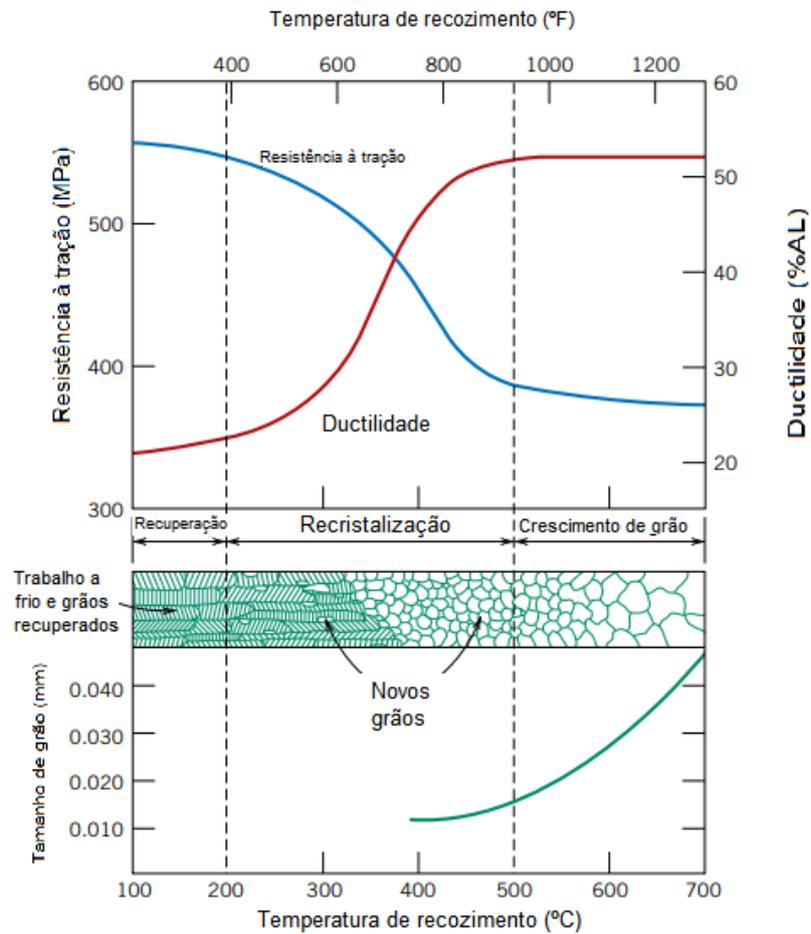
Recozimento é definido como um tipo de tratamento térmico no qual o material é submetido ao aquecimento até determinada temperatura por um tempo prolongado em que aconteça o rearranjo atômico e, conseqüente, eliminação dos defeitos cristalinos, sendo em seguida resfriado lentamente (CALLISTER, 2016; CHIAVERINI, 2008).

Com o movimento das discordâncias, uma fração da energia interna armazenada é liberada, com isso, à medida em que a quantidade de discordância diminui, surgem novas com baixas energias de deformação (CALLISTER, 2016).

Pode-se classificar o recozimento de acordo com três estágios durante o aquecimento, sendo eles, recuperação, recristalização e crescimento de grão. No estágio de recuperação, sob temperaturas não tão elevadas, as discordâncias se rearranjam em estados mais estáveis e, com isso, fornecem alívio de tensões na microestrutura do material. No estágio de recristalização, sob temperaturas mais altas do que o estágio anterior, é possível alcançar maior modificação na microestrutura do material e, com o fenômeno de nucleação, alterações em suas propriedades mecânicas. Por último, no estágio de crescimento de grão, à medida que se atinge temperaturas mais elevadas, os grãos formados no estágio anterior, aumentam de tamanho por absorver os grãos da vizinhança (SMITH e HASHEIMI, 2010). Na Figura 12 é demonstrado a influência da temperatura de recozimento, durante 1 hora, na resistência à tração e ductilidade

de uma liga de latão, além das estruturas do grão durante os estágios de recuperação, recristalização e crescimento de grão.

Figura 12 – Influência da temperatura de recozimento nas propriedades mecânicas e nos grãos de uma liga metálica.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2016.

4 METODOLOGIA

4.1 Simulação numérica com o software TransCal

TransCal é um *software* desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina que conta com uma interface intuitiva e simples para solucionar problemas que envolvem condução de calor transiente ou permanente usando simulações numéricas (MALISKA *et al.*, 1998).

O *software* foi desenvolvido em linguagem de programação C++ e utiliza o Método dos Volumes Finitos por conta de sua característica conservativa, através da discretização da equação de calor em cada volume de controle que compõem a malha bidimensional da geometria escolhida (MALISKA *et al.*, 1998).

Para definir os valores dos parâmetros que serão utilizados durante a simulação numérica, alguns cálculos foram realizados. O valor do coeficiente de transferência de calor é imprescindível para a simulação no *software* TransCal. Então para obtê-lo, iniciou-se com a determinação do número de Reynolds do fluido que irá transferir calor para o arame durante o tratamento térmico. As cubas de chumbo são amplamente empregadas para tal finalidade por conta de sua excelente capacidade de transferência de calor, capacidade de controle de processo e produtividade (POHLE, 1968). Sendo assim, o banho de chumbo foi considerado neste presente trabalho e, portanto, seus parâmetros foram calculados.

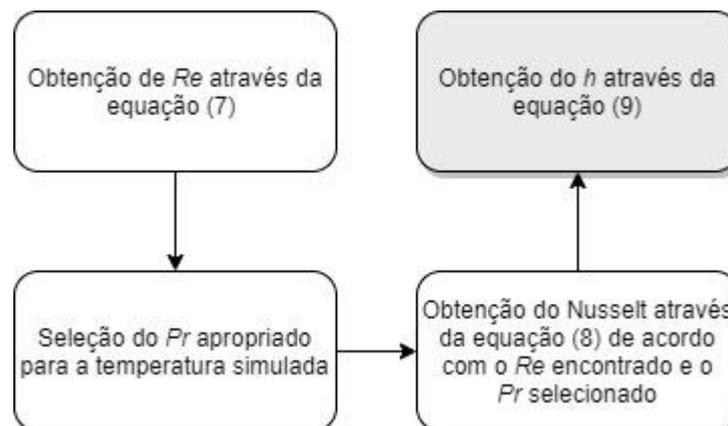
Para as simulações numéricas, foram adotados, através de observação experimental, cenários onde o arame percorre pela cuba de chumbo a velocidades que variam de 80 a 120 m/min e sob temperaturas do banho de 450 a 500 °C. A bitola do arame simulado é de 2,69 mm e é constituída de aço carbono cuja condutividade térmica (k) é de 60,5 W/m.K. Com a equação (7), obteve-se o valor de Re , para isso, os valores da massa específica e da viscosidade dinâmica do fluido foram selecionados de acordo com a temperatura simulada, assim como a velocidade média do fluxo foi correspondente à velocidade em que o arame percorre pela cuba de chumbo. O último termo, comprimento característico foi determinado como o diâmetro da bitola do arame para todos os cenários simulados. Dando sequência nos cálculos, para determinar o número de Nusselt na equação (8) é necessário o número de Prandtl do chumbo líquido. Sendo assim, na Tabela (1) dispõe-se dos valores das propriedades do chumbo para cálculo do número de Re e os valores do número de Prandtl do chumbo para determinadas temperaturas.

Tabela 1 – Propriedades termofísicas do chumbo líquido.

Temperatura T, °C	Densidade ρ , Kg/m ³	Calor específico c_p , J/Kg.K	Condutivida de térmica k, W/m.K	Difusividade térmica α , m ² /s	Viscosida de dinâmica μ , Kg/m.s	Viscosidade cinemática ν , m ² /s	Número de Prandtl Pr
370	10.540	159	16,1	$10,84 \times 10^{-6}$	-	$2,276 \times 10^{-7}$	0,024
400	10.506	158	15,97	$9,623 \times 10^{-6}$	$2,277 \times 10^{-3}$	$2,167 \times 10^{-7}$	0,02252
450	10.449	156	15,74	$9,649 \times 10^{-6}$	$2,065 \times 10^{-3}$	$1,976 \times 10^{-7}$	0,02048
475	10.418	156	15,67	$9,627 \times 10^{-6}$	$2,004 \times 10^{-3}$	$1,922 \times 10^{-7}$	0,01996
482	10.412	155	15,6	$12,23 \times 10^{-6}$	-	$1,849 \times 10^{-7}$	0,017
500	10.390	155	15,54	$9,651 \times 10^{-6}$	$1,884 \times 10^{-3}$	$1,814 \times 10^{-7}$	0,01879
550	10.329	155	15,39	$9,610 \times 10^{-6}$	$1,758 \times 10^{-3}$	$1,702 \times 10^{-7}$	0,01771
600	10.267	155	15,23	$9,568 \times 10^{-6}$	$1,632 \times 10^{-3}$	$1,589 \times 10^{-7}$	0,01661
650	10.206	155	15,07	$9,526 \times 10^{-6}$	$1,505 \times 10^{-3}$	$1,475 \times 10^{-7}$	0,01549
700	10.145	155	14,91	$9,483 \times 10^{-6}$	$1,379 \times 10^{-3}$	$1,360 \times 10^{-7}$	0,01434

Fonte: Adaptado de Incropera (2014) e Department Of The Navy (1952).

Após o cálculo do número de Nusselt, com a equação (9) obteve-se o valor do coeficiente de transferência de calor (h). A sequência dos cálculos para o valor de h é esquematizada na Figura 13.

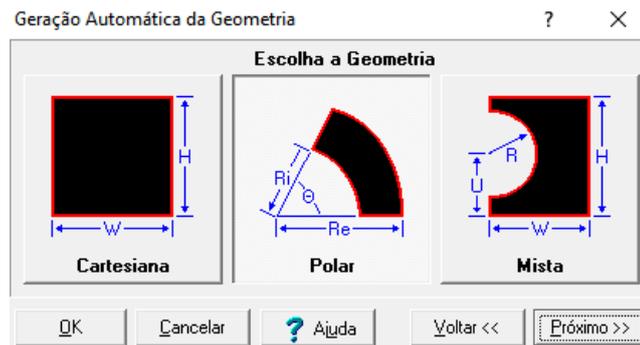
Figura 13 - Fluxograma das etapas de cálculos realizados para se obter o coeficiente de transferência de calor do chumbo.

Fonte: Própria autora.

A primeira etapa da simulação no *software* TransCal é definir a geometria do objeto de estudo. Se tratando de um arame, cujo formato é estabelecido como cilíndrico, a geometria polar foi a escolhida (Figura 14). Desse modo, as dimensões da geometria polar são estabelecidas, sendo elas o raio interno R_i , o raio externo R_e e o ângulo Θ (correspondentes a

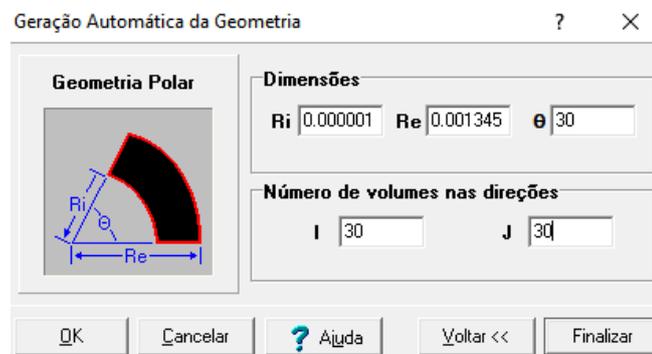
uma fatia da seção transversal do arame). Como o R_i da geometria é um valor de entrada inerente ao *software*, deve ser o menor valor possível para se aproximar ao máximo de uma fatia transversal maciça. Ao mesmo tempo, o número de volumes de controle da malha é definido nas direções I e J e deve ser o maior possível para facilitar a convergência e melhorar a precisão (Figura 15). O formato definido é mostrado na Figura 16.

Figura 14 – Geometria polar escolhida.



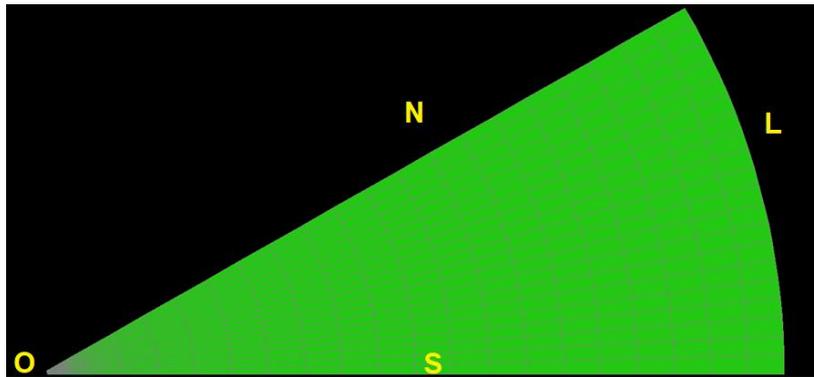
Fonte: Própria autora.

Figura 15 – Dimensões da geometria e da malha numérica.



Fonte: Própria autora.

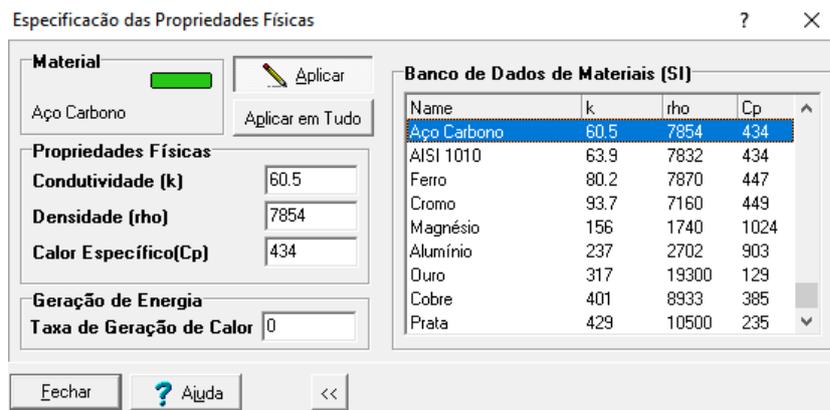
Figura 16 – Formato do objeto simulado.



Fonte: Própria autora.

Para configurar as propriedades físicas do meio, definiu-se de que material seria constituído o arame. Essas propriedades já são disponibilizadas pelo próprio *software*, ficando a cargo do usuário, apenas a escolha de qual material (Figura 17).

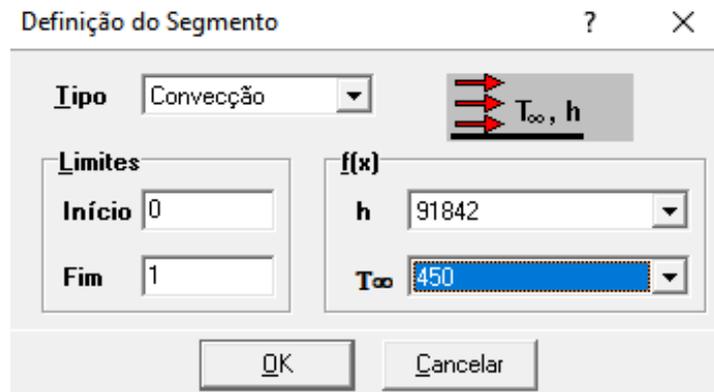
Figura 17 – Seleção do material constituinte do arame.



Fonte: Própria autora.

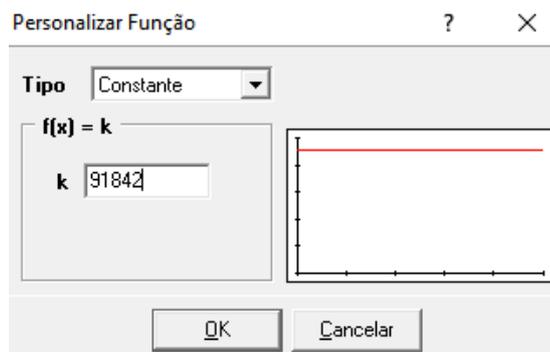
As condições de contorno são estabelecidas entre as camadas Norte, Sul, Leste e Oeste. Como se trata de transferência de calor convectivo do banho de chumbo para o arame emergido, o fluxo de calor flui da camada leste (decidida pelo próprio *software* como a camada externa da geometria) em direção ao centro do arame. Sendo assim, definiu-se como condições de contorno da camada leste, o tipo “convecção”. Os parâmetros h e T_{∞} , foram definidos sendo h o valor calculado pela equação (9) e T_{∞} como o valor da temperatura do banho de chumbo (Figura 18), ambos personalizados como função constante (Figura 19). As camadas Norte, Sul e Oeste foram programadas como do tipo “fluxo” e com valor igual a zero, sendo equivalentes à condição de simetria nas fronteiras (Figura 20).

Figura 18 - Condições de contorno da camada Leste.



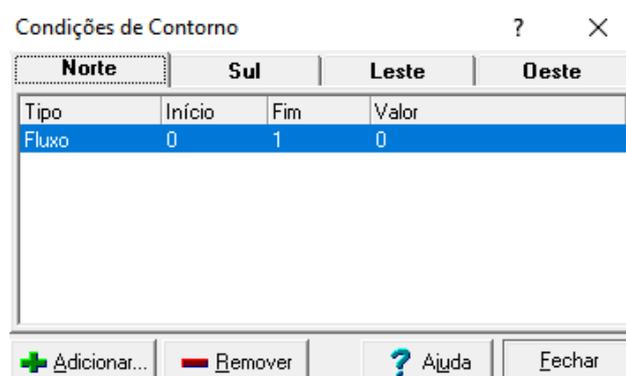
Fonte: Própria autora.

Figura 19 – Tipo de função para as condições de contorno da camada Leste.



Fonte: Própria autora.

Figura 20 – Condições de contorno das camadas Norte, Sul e Oeste.



Fonte: Própria autora.

Como condições iniciais, foi definido a temperatura em °C de entrada do arame ao banho de chumbo (Figura 21).

Figura 21 – Temperatura de entrada do arame.

The image shows a dialog box titled "Temperatura". It has a title bar with a question mark and a close button (X). The main area contains a label "Temperatura Inicial" above a text input field containing the number "25". To the right of the input field are three buttons: "OK", "Cancelar", and "Ajuda" (with a question mark icon).

Fonte: Própria autora.

Nos parâmetros de simulação o Avanço no Tempo (segundos) foi estabelecido como 0,1, o número de Avanços no Tempo como 50 e tolerância como 10^{-8} , totalizando 5 segundos de simulação da imersão do arame no banho de chumbo. O número de iterações foi definido como 100000 e sua tolerância de 10^{-8} (Figura 22).

Figura 22 – Parâmetros de simulação em relação ao tempo.

The image shows a dialog box titled "Parâmetros da simulação". It has a title bar with a question mark and a close button (X). The main area is divided into two sections: "Tempo" and "Solver". The "Tempo" section has three input fields: "Avanço no Tempo (seg.)" with value "0.01", "No. de Avanços no Tempo" with value "5000", and "Tolerância" with value "1E-8". The "Solver" section has two input fields: "Número de Iterações" with value "100000" and "Tolerância" with value "1E-8". At the bottom are three buttons: "OK", "Cancelar", and "Ajuda" (with a question mark icon).

Fonte: Própria autora.

A velocidade na qual o arame percorre no banho de chumbo é ajustada através da rotação dos bobinadores em que o arame é armazenado ao final da linha. Por meio de esforços de tração, o arame é submerso e conduzido por toda a extensão da cuba de chumbo. Estão apresentadas na Tabela 2 as informações para as quais serão simuladas em cenários diferentes de acordo com a temperatura do banho de chumbo e velocidade com que o arame passa pelo banho.

Tabela 2 – Critérios de simulação.

Simulação, #	Temperatura, T, °C	Velocidade, v, m/min
01	450	80
02	450	90
03	450	100
04	450	110
05	450	120
06	475	80
07	475	90
08	475	100
09	475	110
10	475	120
11	500	80
12	500	90
13	500	100
14	500	110
15	500	120

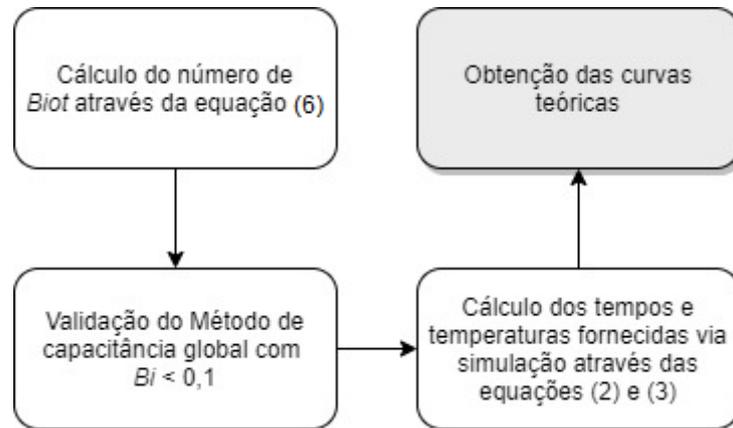
Fonte: Própria autora.

Com todos os critérios de simulação definidos, deu-se início à simulação numérica via TransCal.

4.2 Método da capacitância global

Para obter as curvas teóricas através do Método da capacitância global, as equações (2) e (3) foram usadas, respectivamente, para calcular o tempo e temperatura fornecidas pelas simulações realizadas. São representadas esquematicamente na Figura 23 as etapas realizadas para o cálculo das curvas.

Figura 23 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção das curvas teóricas pelo Método da capacitância global.

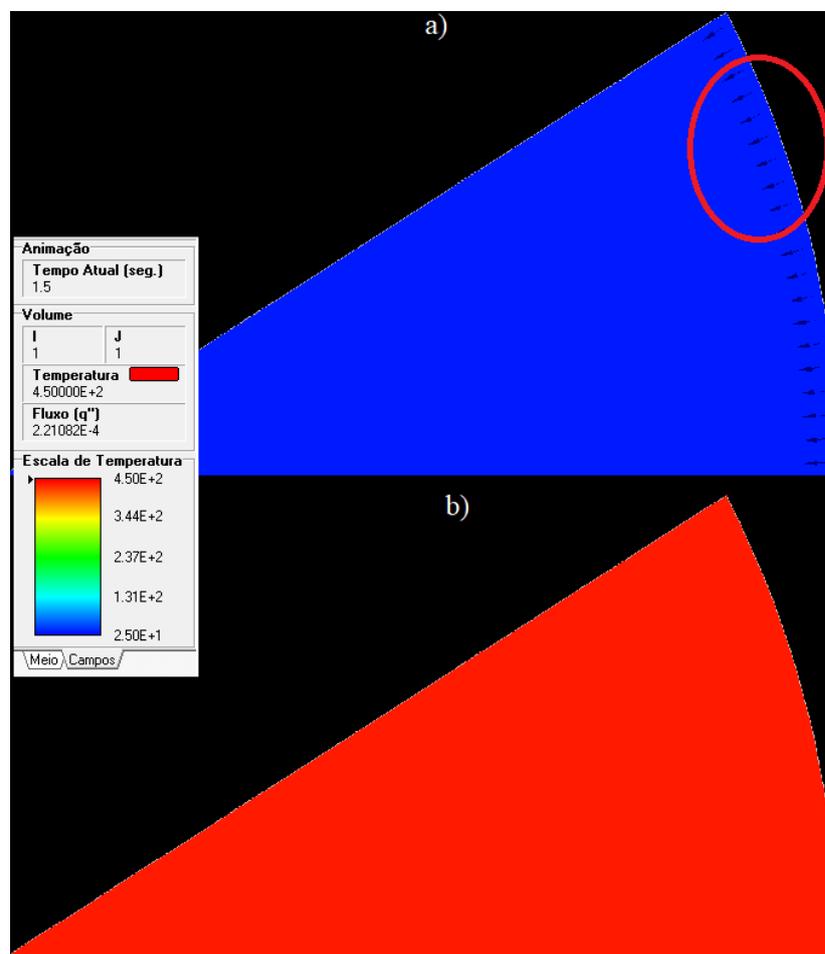


Fonte: Própria autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas simulações realizadas, pode-se observar a transferência de calor convectivo da camada leste em direção à oeste de acordo com o programado nos parâmetros de simulação. Os vetores de fluxo de calor indicados na Figura 24-a confirmam essa orientação do calor. Na Figura 24-b tem-se o aspecto avermelhado da seção transversal simulada indicando o alcance da temperatura final por toda a sua extensão.

Figura 24 – Condução do calor na primeira simulação.



a) Condução do calor em $t = 0,0$ s.

b) Condução do calor em $t = 1,5$ s.

Fonte: Própria autora.

Para cada cenário simulado, indicados pela Tabela 2, as equações (7), (8) e (9) resultam em valores distintos. Esses valores estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do número de Reynolds, número de Nusselt e coeficiente de transferência de calor para cada simulação.

Simulação, #	Número de Reynolds, Re	Número de Nusselt, \overline{Nu}	Coeficiente de transferência de calor, h , W/m ² .K
01	18.148,707	15,696	91.842,022
02	20.417,295	16,773	98.143,873
03	22.685,883	17,815	104.240,929
04	24.954,472	18,828	110.168,297
05	27.223,060	19,817	115.955,234
06	18.645,655	15,745	91.719,015
07	20.976,362	16,839	98.091,870
08	23.307,069	17,886	104.190,937
09	25.637,776	18,902	110.109,420
10	27.968,483	19,894	115.888,097
11	19.779,971	15,813	91.350,936
12	22.252,468	16,925	97.774,907
13	24.724,964	17,976	103.866,821
14	27.197,461	18,997	109.744,751
15	29.669,957	20,010	115.596,803

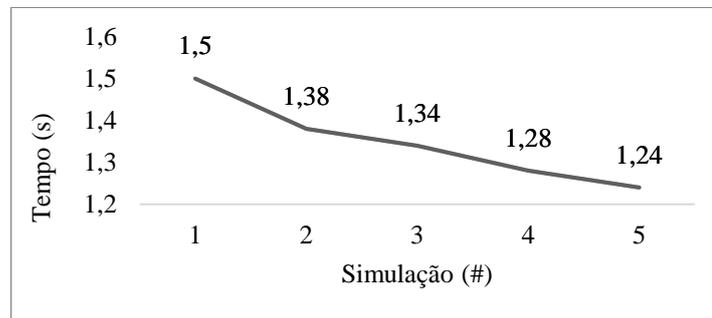
Fonte: Própria autora.

Com os valores do coeficiente de transferência de calor, h , calculados foi possível obter os tempos de simulação para que o arame atingisse a temperatura final desejada.

Nas simulações realizadas considerando a temperatura final de 450 °C e 475 °C, é possível notar uma tendência de diminuição do tempo necessário de submersão à medida em que se aumenta a velocidade de passagem do arame no banho de chumbo. Esse comportamento é esperado devido ao valor de Re aumentar conforme também se aumenta a velocidade média do fluxo.

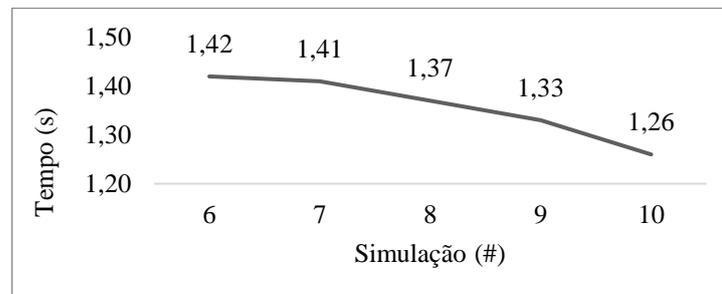
No Gráfico 1 estão dispostos os valores obtidos dos tempos de submersão do arame em banho de chumbo à 450 °C e no Gráfico 2 estão dispostos os valores obtidos dos tempos de submersão do arame em banho de chumbo à 475 °C.

Gráfico 1 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 450 °C.



Fonte: Própria autora.

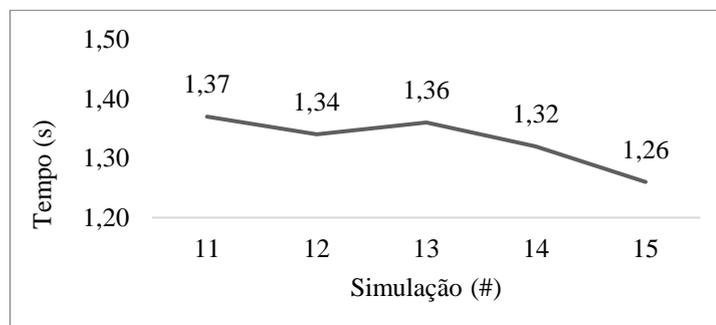
Gráfico 2 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 475 °C.



Fonte: Própria autora.

No Gráfico 3 estão dispostos os valores obtidos dos tempos de submersão do arame em banho de chumbo à 500 °C.

Gráfico 3 – Tempo necessário de submersão do arame para alcançar temperatura de 500 °C.

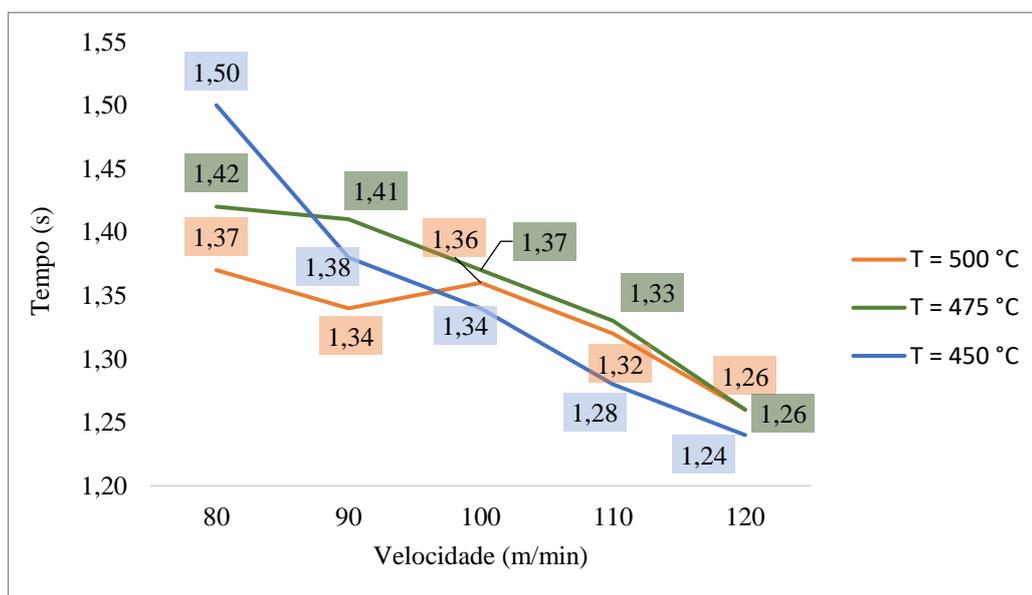


Fonte: Própria autora.

No Gráfico 3 também é possível notar uma tendência de queda no tempo de submersão do arame no banho de chumbo. No entanto, na décima terceira simulação observou-se um aumento desse tempo em relação à simulação anterior seguida de tendência de queda novamente. Esse comportamento não esperado pode estar relacionado com a geometria simulada cujo raio interno pode ter interferido no resultado utilizando-se dos parâmetros determinados.

Um comparativo entre as três condições é disposto no Gráfico 4. Nele pode-se observar que as simulações em temperaturas de 450 °C e de 475 °C apresentam uma possível tendência de queda mais estável do que a curva de temperatura de 500 °C. Além disso, nota-se valores menores para os tempos de submersão do arame para a temperatura de 450 °C quando acima de 100 m/min comparada com as duas outras curvas. Tratando-se de menor temperatura final é esperado tomar menos tempo para atingi-la quando em mesma velocidade de fluxo, no entanto esse comportamento não se manifesta em velocidade de 80 e 90 m/min comparada à curva de 500 °C e em velocidade de 80 m/min comparada à curva de 475 °C, isso pode estar associado a erros de convergência e precisão durante simulação numérica.

Gráfico 4 – Comparativo das curvas de tempo de imersão para as duas temperaturas simuladas.



Fonte: Própria autora.

5.1 Método da capacitância global

Os valores do número de *Biot* foram calculados através da equação (6) e estão dispostos na Tabela 4 para cada simulação realizada.

Tabela 4 – Número de *Biot* para cada cenário simulado.

Simulação, #	Número de <i>Biot</i>
01	2,042
02	2,182
03	2,317
04	2,449
05	2,578
06	2,039
07	2,181
08	2,316
09	2,448
10	2,576
11	2,031
12	2,174
13	2,309
14	2,440
15	2,570

Fonte: Própria autora.

Para que haja a validação do Método da capacitância global é necessário que a condição imposta pela equação (6) seja atendida, ou seja, o valor calculado para *Biot* deve ser $< 0,1$. No entanto, para as atuais configurações de simulação, nenhum cenário atendeu a condição, invalidando sua utilização para a conferência das curvas de aquecimento simuladas com as teóricas.

Para número de *Biot* maior que 0,1 seria necessário utilizar o modelo unidimensional transiente para cilindros longos. A modelagem envolve séries infinitas convergentes e foge do escopo do que foi proposto neste estudo.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível, através da simulação numérica, observar o comportamento de um arame em banho de chumbo para recozimento. Os parâmetros utilizados nas simulações realizadas trouxeram como resultados os tempos em que o arame atingiria a temperatura final escolhida.

Notou-se que, em temperatura de 450 °C e com aumento de velocidade, o arame atinge uma temperatura capaz de realizar seu recozimento em menos tempo do que se estivesse em temperatura de 475 °C a partir de 90 m/min. O mesmo comportamento se estende comparado a temperatura de 500 °C a partir de 100 m/min. Isso pode indicar que, mesmo em temperaturas menos elevadas, é possível alcançar uma maior produtividade na linha de produção.

Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos pelas simulações numéricas, o cenário ideal seria de um arame passando pelo banho de chumbo à 450 °C e com velocidade de 120 m/min em termos de produtividade.

Por fim, não foi possível plotar as curvas de aquecimento geradas pelo Método da capacitância global, devido ao não atendimento de sua condição. Os números de Biot encontrados para os parâmetros escolhidos nessas simulações ultrapassam o valor definido como condição. Isso ocorreu devido ao valor elevado do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , do chumbo enquanto a condutividade térmica, k , do sólido foi menor em grandeza, aumentando assim, o valor numérico de Biot.

Para trabalhos futuros, a sugestão seria realizar o cálculo com método analítico unidimensional transiente, ao invés da capacitância global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A. *et al.* **Implatação de microcassete em máquina de trefilar: um estudo de caso em uma siderúrgica.** 2020.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 9ª Edição. 2016.
- CASTRO, M. O. **Modelagem não linear de elementos finitos do processo de trefilação incluindo fricção.** 2015.
- CHAPRA, S. C. **Métodos Numéricos Aplicados com MATLAB® para Engenheiros e Cientistas.** 3. ed. AMGH Editora, 2013.
- CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia.** 7ª Edição. McGraw Hill Brasil, 2016.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas.** São Paulo: Abm - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento dos metais previamente deformados a frio.** 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- DA SILVA, W. P., *et al.* Thermal properties determination of a cylindrical product during its cooling: two-dimensional numerical model and uncertainty. **International Journal of Food Properties**, v. 22, n. 1, p. 343-354, 2019.
- DEPARTMENT OF THE NAVY (Washington, DC). The Atomic Energy Commission (org.). **Liquid Materials Handbook.** 23. ed. [S. l.: s. n.], 1952.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** Rio de Janeiro: Guanabara. 2. ed, 1981.
- HARTMANN, H.G. **Método dos Volumes Finitos Aplicado ao Escoamento Bifásico Óleo Água em Reservatórios de Óleo Considerando Efeitos de Aquecimento no Poço Produtor.** Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, fevereiro, 2011.
- INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 7ª Edição. Rio de Janeiro/RJ, 2014.
- KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos.** Livro eletrônico, São Paulo, 2013.
- KREPCKI, A. M. L. **Simulação numérica do processo de deposição de parafina em cavidades cilíndricas contendo óleo parafínico estagnado.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.
- MALISKA, C. R. *et al.* **Transcal V 1.1,** 1998. Disponível em: < <https://sinmec.ufsc.br/site/software.php?id=2>>. Acesso em: 21/08/2021.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

MARTINS, R. M. E. **Simulação numérica da redução de ruído em pás de aerogeradores**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

MOHAMAD, A., TALER, J., OCLON, P. Transient natural convection in a thermally insulated annular cylinder exposed to a high temperature from the inner radius. **Energies**, v. 13, n. 5, 1291 p. 2020.

NEUBAUER, T. An empirical study about the status of business process management. **Business Process Management Journal**, pp. 166–183. 2009.

POHLE, H. J. Perdas térmicas dos banhos de chumbo e de galvanização. **Stahl und Eisen**, 88, Nº 10. 1968.

RODRIGUES, R. **Simulação numérica e análise experimental do escoamento de metal líquido nas cavidades de um molde de injeção**. 2014.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 167 p. 2009.
SEVALE, L. G. **Estudo da influência de tratamentos térmicos nas variações microestruturais do aço SAE 4340**. 2014.

SILVA, T. F. **Efeito dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço sae 1015 trefilado**. 2011.

SMITH, W. F. e HASHEIMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: AMGH Editora, 663 p. 2010.

TRINDADE, D. R.; SANTOS, P. H. Q.; RODRIGUES, R. F. N.; DIAS, M. J.; FARIA, E. C. M.; CASTRO, A. N. Estudo e Avaliação do Tempo de Permanência a Temperatura no Tratamento Térmico de Têmpera do Aço Sae 1045. **Processos Químicos**, v. 11, n. 21, pp. 67–76, 2017.

WUNG, T. e CHEN, C. Finite analytic solution of convective heat transfer for tube arrays in cross flow. **J. Heat Transfer**, v. 111, pp. 633–648, 1989.