

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**LAURA DE SOUSA RAMOS FERNANDES**

**ANÁLISE TÉRMICA ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE  
EIXO DE AÇO**

**BELO HORIZONTE**

**2017**

LAURA DE SOUSA RAMOS FERNANDES

ANÁLISE TÉRMICA ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE EIXO  
DE AÇO

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: Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2017

LAURA DE SOUSA RAMOS FERNANDES

**ANÁLISE TÉRMICA ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE  
EIXO DE AÇO**

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: 11/12/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira – Orientador

---

Prof. Euclides Gonçalves Martins Filho

---

Prof. Dr. João Paulo Machado de Sousa

Dedico este trabalho

Aos meus pais Jorge Luiz e Neuzélia, por serem a base sólida de minha vida

À Elisa, segunda mãe amorosa e dedicada

Aos irmãos Clarisse, Jorge Augusto, Lívia e Luiz Henrique, meus primeiros companheiros de jornada

Ao sobrinho Otávio, minha primeira grande alegria

Ao sobrinho Francisco, que faz com que eu me sinta uma pessoa especial

À tia Neuzete (querida tia Dete), uma grande referência em minha vida

Às primas Aninha, Ciça e Cris, que sempre me recebem tão bem nos momentos em que meu coração pede acolhimento

Ao tio Beto (in memorian), pelas suas palavras e atos de incentivo

Aos inesquecíveis amigos de outrora: Andressa, Jéssica e Thiago

Às novas e igualmente especiais amigas: Ana Elisa, Débora, Keila, Laura Saporì, Ayeska, Mariane e Rayane

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, que está no comando de tudo

Aos meus pais, pelo apoio incondicional

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo acolhimento e pelas oportunidades

Ao professor André Ferreira, por sua presença em todos os momentos necessários, pela generosidade ao partilhar seus conhecimentos, e pela paciência com que me orientou na execução deste trabalho

Aos professores Carlos, Elaine, Ernane, João Bosco, Rogério Felício e Welington, que, assim como o professor orientador, procuraram ajudar-me prontamente na solução de problemas relacionados ao projeto

Aos profissionais Carlos, Dayane, Geraldo, Jussara e Marinete, que, com seu trabalho e palavras de incentivo, contribuíram para a finalização deste trabalho

Aos demais profissionais que, indiretamente, possibilitaram a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Amplamente utilizado na indústria, o processo de têmpera de metais tem como um de seus principais fatores de sucesso, ou de fracasso, a taxa de resfriamento. Por este motivo, optou-se pela realização da análise térmica analítica e experimental do resfriamento de um eixo de aço neste trabalho. Para uma análise experimental, três barras cilíndricas de aço SAE 5150 foram aquecidas até cerca de 870 °C e resfriadas ao ar, tendo suas temperaturas centrais e superficiais medidas em intervalos de tempo de aproximadamente dois minutos. As análises teóricas do arrefecimento em água e ao ar foram feitas com base nos métodos da capacitância global e da condução unidimensional transiente. Os coeficientes de transferência de calor, também determinados por análise teórica, foram obtidos com base no escoamento em convecção natural externa e na transferência de calor por radiação. Embora a comparação com os resultados experimentais tenha mostrado que o método da capacitância global é o mais adequado para descrever o resfriamento ao ar, o mesmo método, para o arrefecimento em água, não atendeu ao critério de aproximação adotado neste trabalho. Em relação à água, a condução unidimensional transiente foi considerada válida matematicamente para a análise de pontos no interior da peça. Fica como sugestão para trabalhos futuros, a análise experimental do resfriamento em água.

Palavras-chave: Têmpera. Transferência de calor.

## ABSTRACT

Widely used in the industry, the quenching process of metals has as one of its main factors of success, or failure, the cooling rate. For this reason, it was decided to perform the analytical and experimental thermal analysis of the cooling of a steel shaft in this work. For an experimental analysis, three cylindrical SAE 5150 steel bars were heated to about 870 °C and air cooled, their central and surface temperatures measured at time intervals of approximately two minutes. Theoretical analyzes of water and air cooling were made based on the methods of global capacitance and transient one-dimensional conduction. The heat transfer coefficients, also determined by theoretical analysis, were obtained based on external natural convection flow and the transfer of heat by radiation. Although the comparison with the experimental results showed that the global capacitance method is the most appropriate to describe air cooling, the same method for cooling in water did not meet the approach criterion adopted in this work. In relation to water, the one-dimensional transient conduction was considered mathematically valid for the analysis of points inside the piece. As a suggestion for future work, the experimental analysis of water cooling.

Key-words: Quenching. Heat transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de aquecimento e resfriamento do ferro puro .....	14
Figura 2 – Diagramas Fe-C e Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	17
Figura 3 – Microestrutura de aços carbono contendo diferentes quantidades de carbono: (a) Ferrita (~0, 0% C); Ferrita proeutetóide + perlita (~0, 40% C); Perlita (~0, 80% C); Perlita + cementita proeutetóide (~1, 4% C).....	18
Figura 4 – Influência de alguns elementos de liga na temperatura eutetóide e na concentração de carbono do ponto eutetóide do sistema Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	19
Figura 5 – Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento .....	20
Figura 6 – Diagrama de transformação de fases no resfriamento contínuo dos aços 5145-5150 .....	23
Figura 7 – Paquímetro e escala utilizados na medição dos diâmetros e dos comprimentos das peças .....	33
Figura 8 - Forno utilizado no tratamento térmico das peças .....	34
Figura 9 - Termômetro com dois termopares conectados .....	34
Figura 10 - Amostras com identificação alfabética: U, V e W .....	35
Figura 11 – Furo com profundidade igual a um raio .....	36
Figura 12 – Retirada de uma amostra do forno .....	37
Figura 13 – Amostra apoiada sobre os tijolos refratários .....	37
Figura 14- Montagem amostra – termopares .....	38
Figura 15 – Montagem experimental.....	38
Figura 16 – Fluxograma de cálculos necessários à obtenção do coeficiente de transferência de calor médio por convecção .....	43
Figura 17 – Fluxograma da obtenção do coeficiente de transferência de calor médio através da convecção natural externa.....	49
Figura 18 – Fluxograma do uso das equações do método da capacitância global.....	49
Figura 19 – Fluxograma dos cálculos referentes ao resfriamento em água, pelo método da capacitância global .....	50
Figura 20 – Fluxograma dos cálculos referentes à condução unidimensional transiente no resfriamento ao ar e em água .....	51



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Condutividade térmica do aço SAE 5150 em função da temperatura .....	39
Gráfico 2 – Calor específico a pressão constante do aço SAE 5150 em função da temperatura.....	40
Gráfico 3 – Emissividade térmica do aço altamente oxidado em função da temperatura .....	40
Gráfico 4 – Condutividade térmica do ar em função da temperatura .....	41
Gráfico 5 – Difusividade de momento do ar em função da temperatura .....	42
Gráfico 6 – Número de Prandtl em função da temperatura.....	42
Gráfico 7 – Condutividade térmica da água líquida em função da temperatura.....	44
Gráfico 8 – Condutividade térmica do vapor de água em função da temperatura.....	44
Gráfico 9 – Densidade da água líquida em função da temperatura .....	45
Gráfico 10 – Densidade do vapor de água em função da temperatura .....	45
Gráfico 11 – Viscosidade dinâmica da água líquida em função da temperatura .....	46
Gráfico 12 – Viscosidade dinâmica do vapor de água em função da temperatura .....	46
Gráfico 13 – Número de Prandtl para a água líquida em função da temperatura .....	47
Gráfico 14 – Número de Prandtl para o vapor de água em função da temperatura .....	47
Gráfico 15 – Coeficiente de expansão volumétrica térmica da água líquida em função da temperatura.....	48
Gráfico 16 – Curva do resfriamento do eixo U obtida pelo método da capacitância global .....	52
Gráfico 17 - Curva do resfriamento do eixo U obtida via condução unidimensional transiente .....	54
Gráfico 18 - Curva do resfriamento do eixo U em água obtida via condução unidimensional transiente.....	55
Gráfico 19 – Curva experimental do resfriamento do eixo U.....	56
Gráfico 20 - Curva experimental do resfriamento do eixo V .....	57
Gráfico 21 - Curva experimental do resfriamento do eixo W .....	57
Gráfico 22 – Curvas de resfriamento da superfície do eixo U ao ar .....	58
Gráfico 23 - Curvas de resfriamento da superfície do eixo V ao ar.....	59
Gráfico 24 - Curvas de resfriamento da superfície do eixo W ao ar.....	59
Gráfico 25 - Curvas de resfriamento do centro do eixo U ao ar .....	60
Gráfico 26 - Curvas de resfriamento do centro do eixo V ao ar .....	61
Gráfico 27 - Curvas de resfriamento do centro do eixo W ao ar .....	61
Gráfico 28 – Curvas de resfriamento do eixo U em água e ao ar.....	62
Gráfico 29 – Coeficientes de transferência de calor calculados para o eixo U.....	63

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e relevância</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Aços</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Tratamentos térmicos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Têmpera e revenimento</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Transferência de calor na têmpera</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Equação da difusão de calor em coordenadas cilíndricas</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Método da capacitância global</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>Condução unidimensional transiente em cilindros</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Convecção natural externa em cilindros</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Radiação térmica</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais e equipamentos</b> .....	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise experimental</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise teórica</b> .....	<b>39</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Coeficiente de transferência de calor (<math>h</math>) no resfriamento ao ar</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Coeficiente de transferência de calor (<math>h</math>) no resfriamento em água</b> .....	<b>43</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Método da capacitância global para o resfriamento ao ar</b> .....	<b>49</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Método da capacitância global para o resfriamento em água</b> .....	<b>50</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Condução unidimensional transiente para o resfriamento ao ar e em água</b> .....	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>Solução analítica pelo método da capacitância global</b> .....	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>Solução analítica para condução unidimensional transiente</b> .....	<b>53</b>
<b>5.3</b>	<b>Resultados experimentais</b> .....	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise comparativa de resultados</b> .....	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existente desde as antigas civilizações, a têmpera de metais começou a ser praticada muito antes de serem conhecidos os fenômenos estruturais responsáveis pelo endurecimento destes metais. Não só as transformações de fases eram desconhecidas. Também eram ignorados os fenômenos de transferência de calor e sua relação com o resultado final do tratamento térmico. Em Vanpaemel (1982) e MacKenzie (2008) são descritas as práticas de ferreiros de diferentes civilizações. Os autores concordam que além do caráter experimental, as práticas de têmpera eram envolvidas em mistério e misticismo, não só por causa das crenças predominantes nas épocas anteriores à Idade Moderna, como também por uma tentativa de proteção do conhecimento. MacKenzie (2008) cita o uso de misturas contendo substâncias como: esterco; sal; graxa; medula óssea; gordura de cinco animais sacrificados; sangue de um cavalo branco; “urina da terra”, uma possível menção aos óleos derivados de petróleo; urina de um pequeno menino de cabeça vermelha; urina de cabras alimentadas com samambaias por três dias; excremento de pombos; farinha; mel; azeite; leite; raspas de chifres; suco de vermes e de minhocas. Além destas substâncias, também há menção ao fato de os chineses classificarem algumas águas de rios como boas e outras como ruins para a têmpera. Os Japoneses, antes do aquecimento, envolviam as lâminas das espadas com uma mistura de argila, pedra em pó e carvão vegetal, distribuída em diferentes espessuras ao longo da peça. O resfriamento brusco era feito por imersão em água ou em borracha. Segundo MacKenzie (2008), o pó de pedra ajudava a evitar que a argila se quebrasse no aquecimento; o carvão, através de sua queima, favorecia a nucleação de bolhas na ebulição, pressionando a formação da fase de vapor, e a espessura da argila determinava a taxa de resfriamento. Observa-se, portanto, que através de processos de tentativa e erro, da Antiguidade até a Idade Média, os ferreiros de diversas civilizações do mundo alteravam um dos parâmetros mais importantes para a têmpera: a taxa de resfriamento. Diferentes taxas de resfriamento eram obtidas em diferentes meios de têmpera, e as temperaturas eram monitoradas através da observação das cores das superfícies dos metais.

O presente trabalho também foi inspirado pela importância da forma como se dá a transferência de calor no resultado final da têmpera dos aços. Por este motivo, foram realizadas análises térmicas analíticas e experimentais do resfriamento de um eixo de aço SAE 5150, com dimensões de aproximadamente 19 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, para a obtenção de curvas de resfriamento, partindo de uma temperatura acima da austenitização, até temperaturas abaixo da transformação martensítica.

## 1.1 Justificativa e relevância

O processo de têmpera é largamente utilizado para o endurecimento e o aumento da resistência mecânica de aços utilizados em projetos mecânicos de importantes indústrias, por exemplo, automobilística, aeroespacial e de ferramentas de corte. A têmpera, contudo, só é econômica e tecnicamente vantajosa quando as propriedades obtidas são adequadas para as aplicações requeridas. É neste contexto que o conhecimento e o domínio dos métodos de transferência de calor são importantes, pois a forma como o calor é transferido (quantidade de energia, taxa de transferência, tempo de exposição à temperatura) determina a microestrutura do material, determinando também suas propriedades.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo térmico analítico e experimental do resfriamento de eixos de aço.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar teoricamente o escoamento em convecção natural externa para determinação do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) para ar e água.
- Analisar teoricamente a transferência de calor por radiação para determinação do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) para ar.
- Analisar o resfriamento com o método da capacitância global.
- Analisar o resfriamento com condução unidimensional transiente.
- Analisar experimentalmente o resfriamento de eixo de aço SAE 5150 em ar.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Por ser objeto experimental do presente trabalho, o aço necessita ser compreendido em suas características gerais, bem como o tratamento a que será submetido. Embora a abordagem aqui estabelecida não explore a fundo as propriedades mais específicas do eixo de aço utilizado, é a importância econômica e tecnológica do aço temperado que motiva o estudo da transferência de calor no processo de têmpera. Por tanto, nesta revisão da literatura são apresentadas informações básicas sobre os aços e seus tratamentos térmicos.

### 2.1 Aços

Definido como “liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (Mn, Si, P, S)” (CHIAVERINI, 1986a, p. 66), o aço é uma liga relativamente complexa. A presença dos elementos residuais supracitados e/ou de outros elementos de liga, presentes em teores acima dos considerados normais, dificulta a previsão do comportamento exato do material. Krauss (2005) propõe como níveis máximos de normalidade, para o aço carbono puro, os seguintes valores: 1,65 %p/p de Mn, 0,60 %p/p de Si e 0,60 %p/p de Cu. O mesmo autor ressalta que podem ser desejáveis teores mínimos, ou intervalos definidos, de outros elementos, por exemplo, alumínio, cromo, cobalto, nióbio, molibdênio, níquel, titânio, tungstênio, vanádio, zircônio. Neste caso, denomina-se o material como sendo um aço-liga: aço baixa liga, quando a soma dos elementos de liga atinge um valor máximo de cerca de 5%p/p, ou aço alta liga, quando a mesma soma ultrapassa este valor (ASM INTERNATIONAL, 1991).

Além da composição química dos aços, destaca-se a microestrutura como outro aspecto decisivo nas propriedades deste tipo de liga. Na Tabela 1 são descritas as principais fases e constituintes encontrados nos aços.

**Tabela 1 – Importantes fases e constituintes metalúrgicos**

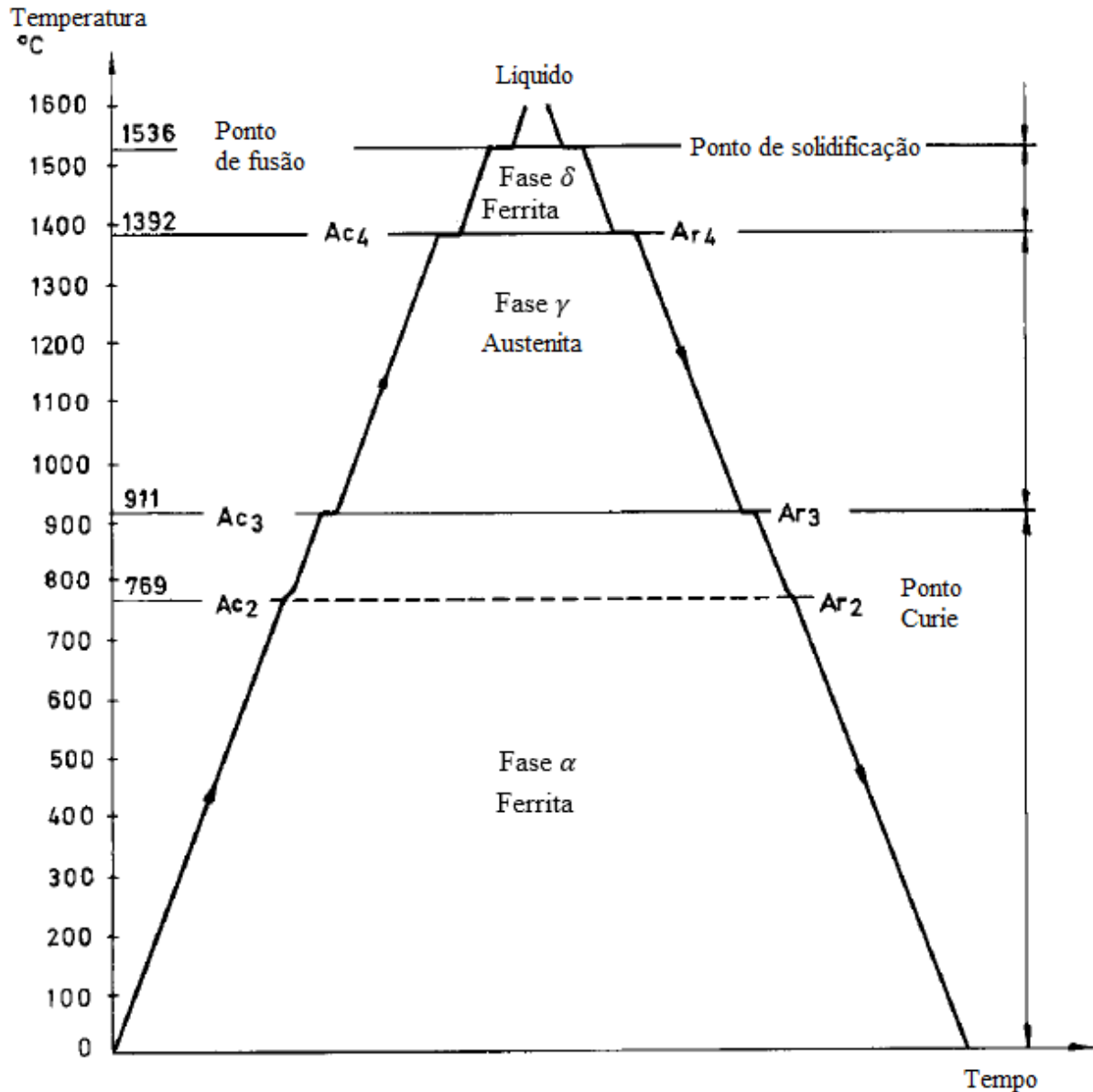
<b>Fase (microconstituente)</b>	<b>Estrutura cristalina das fases</b>	<b>Características</b>
Ferrita (fase $\alpha$ )	cúbica de corpo centrado	Fase relativamente macia de baixas temperaturas; fase estável no equilíbrio
$\delta$ -ferrita (fase $\delta$ )	cúbica de corpo centrado	Isomórfica com a fase $\alpha$ ; fase de altas temperaturas; fase estável no equilíbrio
Austenita (fase $\gamma$ )	cúbica de faces centradas	Fase relativamente macia de médias temperaturas; fase estável no equilíbrio
Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )	complexo ortorrômbico	Fase metaestável dura
Grafita	hexagonal	Fase estável no equilíbrio
Perlita	-	Constituinte metaestável; mistura lamelar de ferrita e cementita
Martensita	tetragonal de corpo centrado (solução sólida supersaturada de carbono na ferrita)	Fase metaestável dura; morfologia acicular quando o teor de carbono é inferior a 0,6%p/p; morfologia de placa quando este teor supera o valor de 1,0%p/p, e mistura de morfologia para valores intermediários
Bainita	-	Microconstituente metaestável duro; mistura não lamelar de ferrita e cementita em uma escala extremamente fina; a bainita superior formada a temperaturas mais elevadas tem uma aparência plumosa; a bainita inferior formada a temperaturas mais baixas tem uma aparência acicular. A dureza da bainita aumenta com a diminuição da temperatura de formação

Fonte: Adaptado de ASM International (1991)

Thelning (1967) esclarece que a austenita e as ferritas  $\alpha$  e  $\delta$  são originárias das duas modificações alotrópicas do ferro puro. Nos aços, estas duas fases possuem as mesmas estruturas exibidas pelas fases análogas do ferro puro (cúbica de faces centradas na austenita e cúbica de corpo centrado nas ferritas  $\alpha$  e  $\delta$ ), neste caso o carbono presente na liga ocupa posições intersticiais. O autor complementa que, para a ferrita, a solubilidade do carbono é muito baixa: a 727 °C é admitido um teor máximo de 0,028%p/p de C; na temperatura ambiente,

este valor é ainda menor. No caso da austenita, a solubilidade máxima do mesmo elemento é de 2,11%p/p a 1148 °C. Na Figura 1 são mostradas as modificações alotrópicas do ferro puro através das curvas de aquecimento e resfriamento do material.

**Figura 1 – Curvas de aquecimento e resfriamento do ferro puro**



Fonte: Adaptado de Thelning (1967)

As linhas representadas por  $A_{XY}$ , onde  $X$  é a letra  $c$  ou a letra  $r$ , e  $y$  é um número (2, 3 ou 4) são as temperaturas de transformação de fase. Segundo Thelning (1967) as temperaturas de transformação de fase no aquecimento ( $A_c$ ) são superiores às temperaturas de transformação no resfriamento ( $A_r$ ), porém muito próximas destas. Pela Figura 1, observa-se também a existência de um calor latente, que impede a mudança de temperatura enquanto a transformação de fase ocorre. O ponto Curie sinaliza uma importante mudança de propriedade: o

desaparecimento completo das propriedades magnéticas que decaem com o aumento da temperatura do ferro puro, segundo as observações de Thelning, (1967).

Além das fases derivadas das transformações alotrópicas do ferro puro, os aços exibem, devido a presença de carbono, outras fases e constituintes, como listado na Tabela 1. Outra fase de grande importância é a cementita, que surge exatamente para alocar o carbono excedente da austenita que não consegue ser solubilizado na ferrita  $\alpha$  durante o resfriamento. Diferentemente destas duas fases, a cementita não abriga o carbono em posições intersticiais, mas sim em sua estrutura, sendo, portanto, um carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) que contém uma quantidade de 6,67%p/p de carbono (ASM INTERNATIONAL, 1991). As fases estável (ferrita  $\alpha$ ) e metaestável (cementita) são formadas no resfriamento por um processo difusional ou reconstrutivo, com expulsão lenta dos átomos de carbono da matriz ferrítica. A estrutura resultante deste processo caracteriza-se pela distribuição alternada de lamelas de ferrita  $\alpha$  e de lamelas de cementita. Esta configuração dá origem a um microconstituente de nome perlita.

A outra fase/constituente relevante para este trabalho é a martensita. Diferentemente das fases descritas anteriormente, a martensita metaestável não é formada por um processo difusional, mas sim por um processo displacivo, que não ocorre no equilíbrio e, portanto, não é abordado pelo diagrama de fases Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . A martensita é obtida através do resfriamento brusco do aço após a austenitização completa (aço hipoeutetóide) ou incompleta (aço hipereutetóide).

## 2.2 Tratamentos térmicos

A ASM International (1991) ressalta que os aços podem apresentar uma enorme variedade de propriedades de acordo com a composição química, as fases e os constituintes presentes. Estes últimos, intimamente relacionados aos tratamentos térmicos aplicados às peças metálicas.

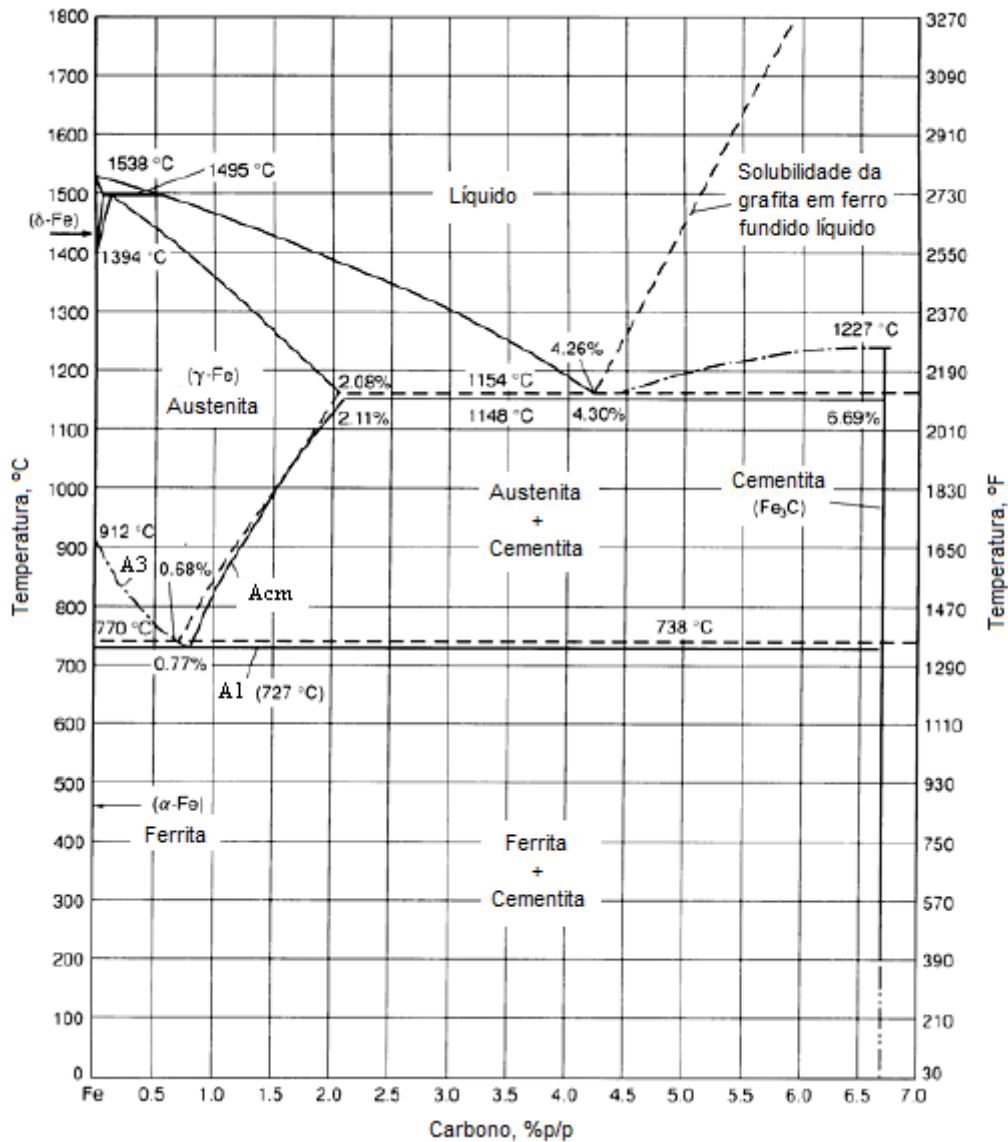
Por outro lado, os diversos processamentos utilizados para a obtenção de peças de aço, em maior ou menor grau, propiciam a formação de tensões residuais, empenamentos e distorções, resultando em estruturas inadequadas às propriedades requeridas para um bom desempenho em serviço. Os tratamentos térmicos são opções que visam minimizar ou eliminar estes inconvenientes a fim de serem alcançadas as propriedades desejadas (CHIAVERINI, 1986a, 1986b, 1988).



Chiaverini (1986b, p. 240) define os tratamentos térmicos como um conjunto de “operações de aquecimento e resfriamento subsequente, dentro de condições controladas de temperatura, tempo à temperatura, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento” e propõe (1986b, 1988) como objetivos gerais destes tratamentos: o alívio de tensões internas; alterações nos valores de dureza; aumento das resistências mecânica, à corrosão, ao calor e ao desgaste; melhoras da ductilidade, da usinabilidade e das propriedades de corte; modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

A primeira ferramenta gráfica útil à compreensão dos tratamentos térmicos é o diagrama de fases, no caso do aço e do ferro fundido branco, os diagramas ferro-cementita (Fe-Fe<sub>3</sub>C) e ferro-grafita (Fe-C), pois estes mostram as fases esperadas no equilíbrio (metaestável e estável, respectivamente) de acordo com a temperatura e o teor de carbono presente na liga. Em relação ao tratamento térmico dos aços, o diagrama estável Fe-C é o menos utilizado, uma vez que a condição de estabilidade demanda muito tempo para ser atingida, sobretudo em baixas faixas de temperatura e baixos teores de carbono (ASM INTERNATIONAL, 1991). O mais utilizado, portanto, é o diagrama metaestável Fe-Fe<sub>3</sub>C. Os dois diagramas são representados na Figura 2: as linhas tracejadas referem-se ao diagrama Fe-C e as linhas contínuas são atribuídas ao diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C.

Figura 2 – Diagramas Fe-C e Fe-Fe<sub>3</sub>C



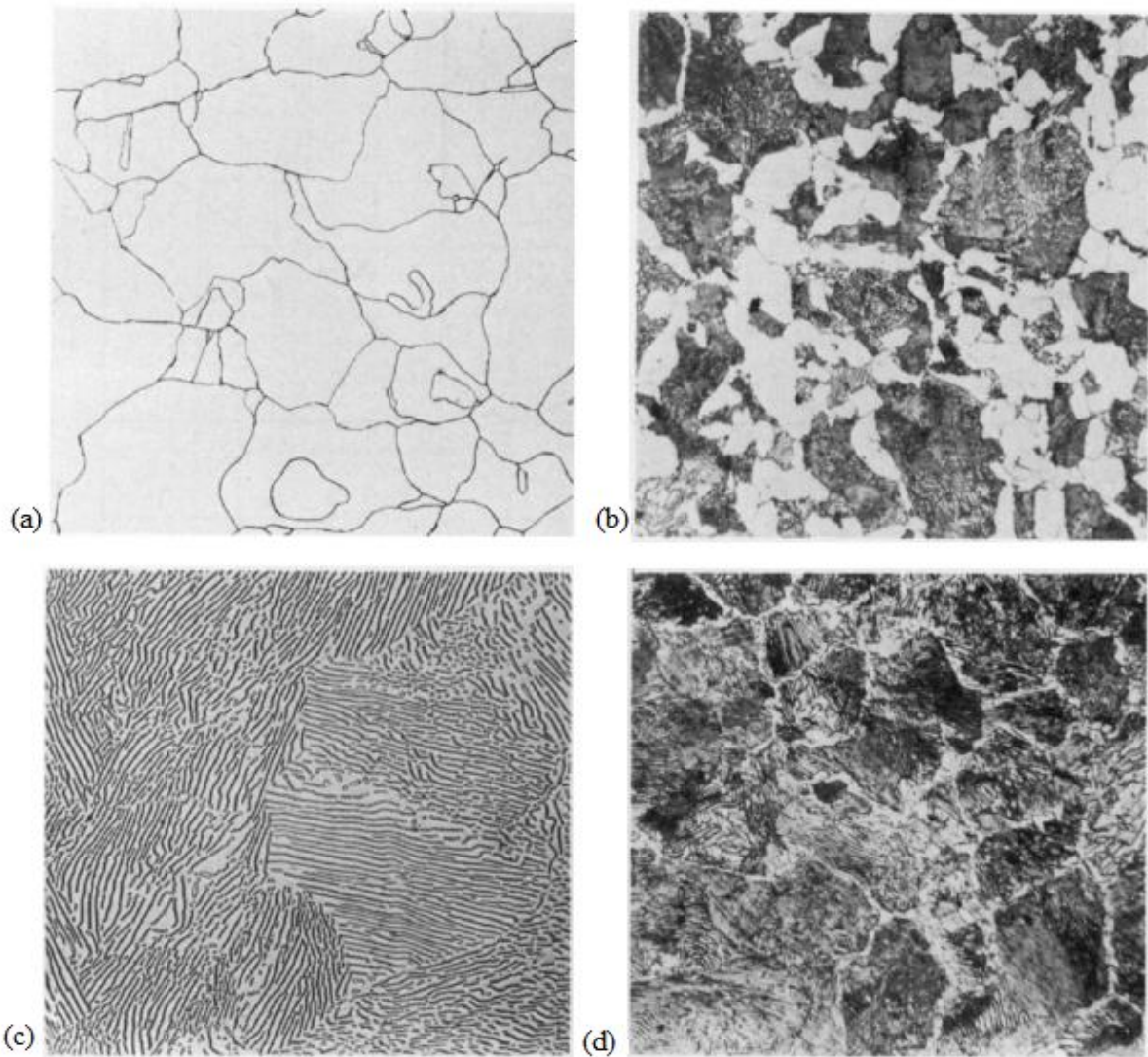
Fonte: Adaptado de ASM International (1991)

Os diagramas de fases dos sistemas Fe-C e Fe-Fe<sub>3</sub>C são estruturados através de dados experimentais, com exceção dos valores mais extremos, os quais são obtidos por extrapolação através de cálculos embasados em princípios e dados termodinâmicos (ASM INTERNATIONAL, 1991).

Com base na transformação eutetóide exibida no ponto (0,77%, 727 °C) do diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, pode-se dividir o aço carbono em três categorias: hipoeutetóide, com teor de carbono inferior a 0,77%p/p; eutetóide, com 0,77%p/p de carbono, ou seja, este aço exibe o teor de carbono no qual a temperatura mínima da austenita (727 °C) é atingida, e hipereutetóide, com a quantidade de carbono admitida na faixa de 0,77%p/p a 2,11%p/p, inclusive. A transformação eutetóide da austenita nas fases ferrita  $\alpha$  e cementita é a mais importante para este estudo, uma

vez que a fase líquida deve ser evitada no tratamento térmico dos aços. Sabe-se, pela análise do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, que aços hipoeutetóides apresentam os constituintes ferrita (Figura 3-a) ou ferrita e perlita (Figura 3-b); os aços eutetóides só exibem perlita (Figura 3-c), e os hiperutetóides têm cementita e perlita (Figura 3-d).

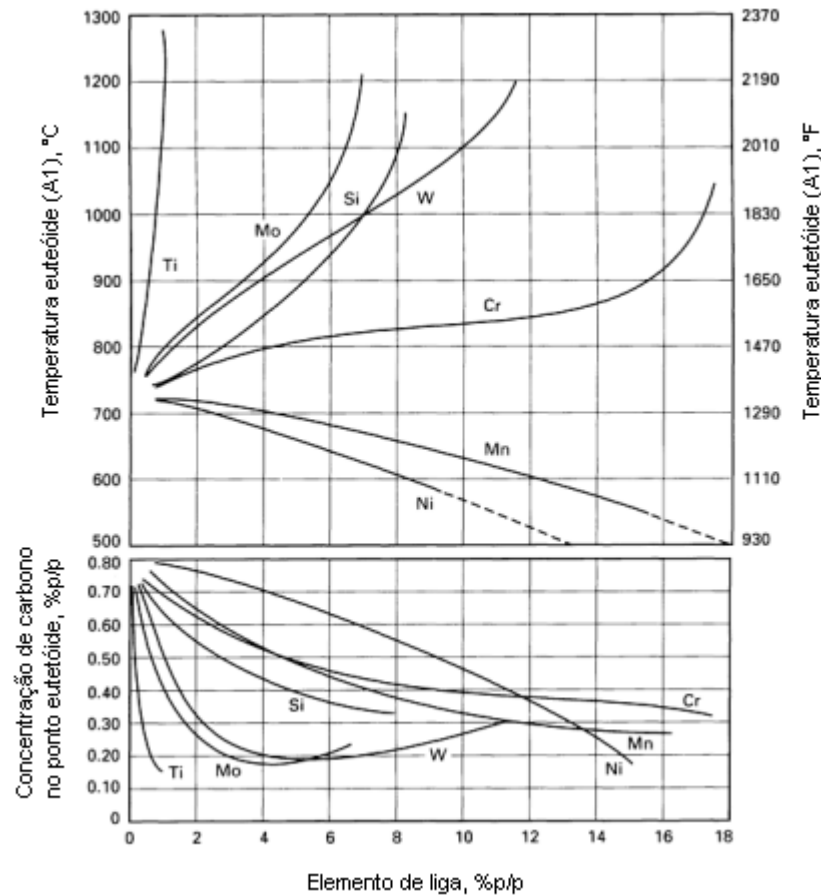
**Figura 3 – Microestrutura de aços carbono contendo diferentes quantidades de carbono:**  
**(a) Ferrita (~0,0% C); Ferrita proeutetóide + perlita (~0,40% C); Perlita (~0,80% C); Perlita + cementita proeutetóide (~1,4% C)**



Fonte: Adaptado de Thelning (1967, p. 3)

As linhas  $A_1$ ,  $A_3$  e  $A_{cm}$  (Figura 2) representam temperaturas limite do intervalo de transformação de fases, limitando o campo austenínico, de grande interesse para o presente estudo. Estas linhas deslocam-se em diferentes direções com a adição de diferentes elementos de liga (ASM INTERNATIONAL, 1991). Na Figura 4 é mostrada a influência de alguns elementos de liga na temperatura e na concentração de carbono do ponto eutetóide.

**Figura 4 – Influência de alguns elementos de liga na temperatura eutetóide e na concentração de carbono do ponto eutetóide do sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C**



Fonte: Adaptado de ASM International (1991)

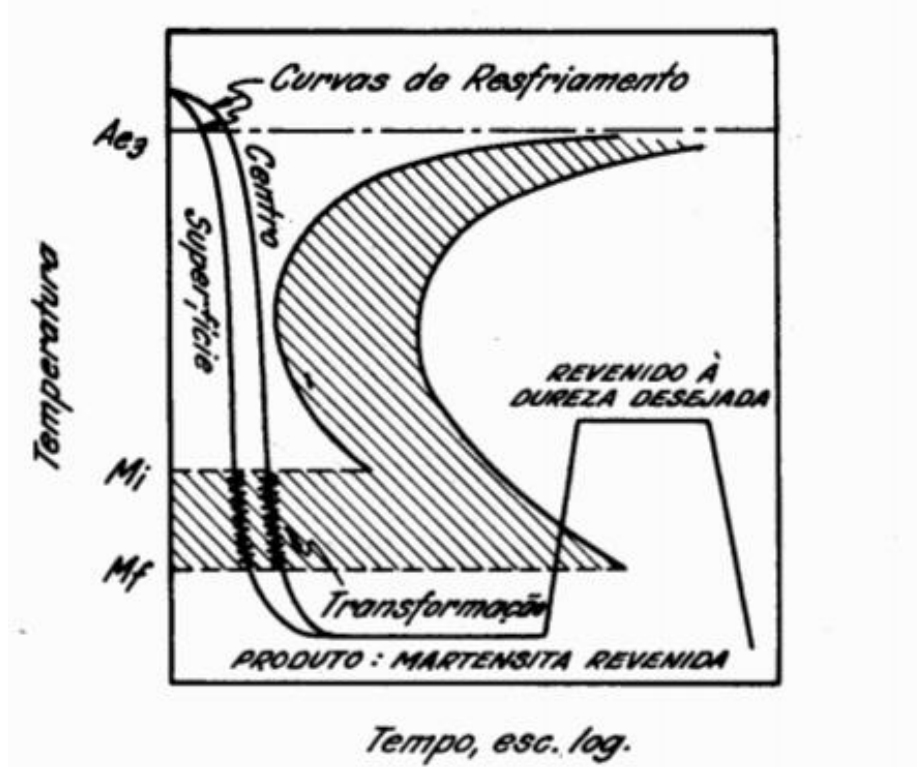
### 2.3 Têmpera e revenimento

A têmpera é o tratamento térmico mais utilizado nas ligas ferro-carbono aplicadas em materiais de construção mecânica. A fim de que estes adquiriram propriedades ótimas de resistência, dureza e tenacidade, induz-se a formação de uma estrutura martensítica revenida por meio de aquecimento e resfriamento controlados (primeiramente na têmpera e em seguida no revenimento). A têmpera consiste no aquecimento do aço acima de sua zona crítica, por período de tempo determinado pela seção da peça, com posterior resfriamento, suficientemente rápido para evitar transformações perlíticas e bainíticas, em óleo, água, salmoura ou ar. Ao contrário dos aços hipoeutetóides, os aços hipereutetóides não necessitam passar por austenitização completa para serem temperados, além disso, o teor de carbono e de outros elementos de ligam também exercem influência nos valores de taxa de resfriamento (CHIAVERINI, 1986a, 1988; SILVA; MEI, 1988).

Chiaverini (1986a) relata que, após a têmpera, é possível observar a presença de uma estrutura tetragonal compacta nos aços, resultante do movimento dos átomos em planos da austenita. Esta estrutura é característica da martensita formada e apresenta-se em um estado de tensões bastante elevado, atribuído pelo autor às distorções reticulares impostas pela condição supersaturada e pela presença de partículas de carboneto dispersas. O revenimento é o tratamento térmico aplicado aos aços imediatamente após a têmpera, visando aliviar ou eliminar as tensões, melhorar a ductilidade e a resistência ao choque, com a redução da dureza e da resistência à tração em níveis aceitáveis, de forma que as propriedades finais sejam ótimas para as aplicações desejadas. Chiaverini (1988, p. 99) explica que o aquecimento da martensita, abaixo da temperatura crítica, favorece a “reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustamentos internos que aliviam as tensões” e propicia a precipitação e o crescimento de carbonetos.

Na Figura 5 são representadas as curvas esquemáticas de aquecimento e resfriamento de um eixo de aço nos tratamentos de têmpera e revenimento.

**Figura 5 – Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento**



Fonte: Chiaverini (1988, p. 96)

## 2.4 Transferência de calor na têmpera

A taxa de transferência de calor é um importante parâmetro na determinação das características finais do aço temperado, uma vez que o tempo de permanência em dadas temperaturas irá influenciar o tamanho de grão, as fases presentes e o estado final de tensões. Krauss (2005) cita dois fatores determinantes das taxas de resfriamento. O primeiro é a facilidade com que o calor é transferido do centro da peça à superfície, quantificada pela difusividade térmica (em unidade de área por unidade de volume) ou pela proporção da condutividade térmica para o calor específico volumétrico. Um exemplo fornecido pelo autor é o aumento da difusividade térmica dos produtos da transformação austenítica com a queda da temperatura. O segundo fator, é a habilidade que o meio de resfriamento da têmpera tem de retirar calor da superfície do aço, influenciando diretamente a distribuição da dureza ao longo da seção transversal da barra. Como as propriedades térmicas do aço são de difícil controle, as propriedades do meio de têmpera são mais utilizadas para a manipulação das taxas de resfriamento aos valores desejados (KRAUSS, 2005). Em razão da limitada disponibilidade de meios de têmpera capazes de cobrir uma ampla faixa de taxas de resfriamento, a prática industrial utiliza recursos auxiliares, de forma a variar as condições de resfriamento, por exemplo, alterações nas condições de escoamento e uso de diferentes fluidos em diferentes estágios do arrefecimento (CARNEGIE-ILLINOIS STEEL CORPORATION, 1938; SENGUPTA; THOMAS; WELLS, 2005).

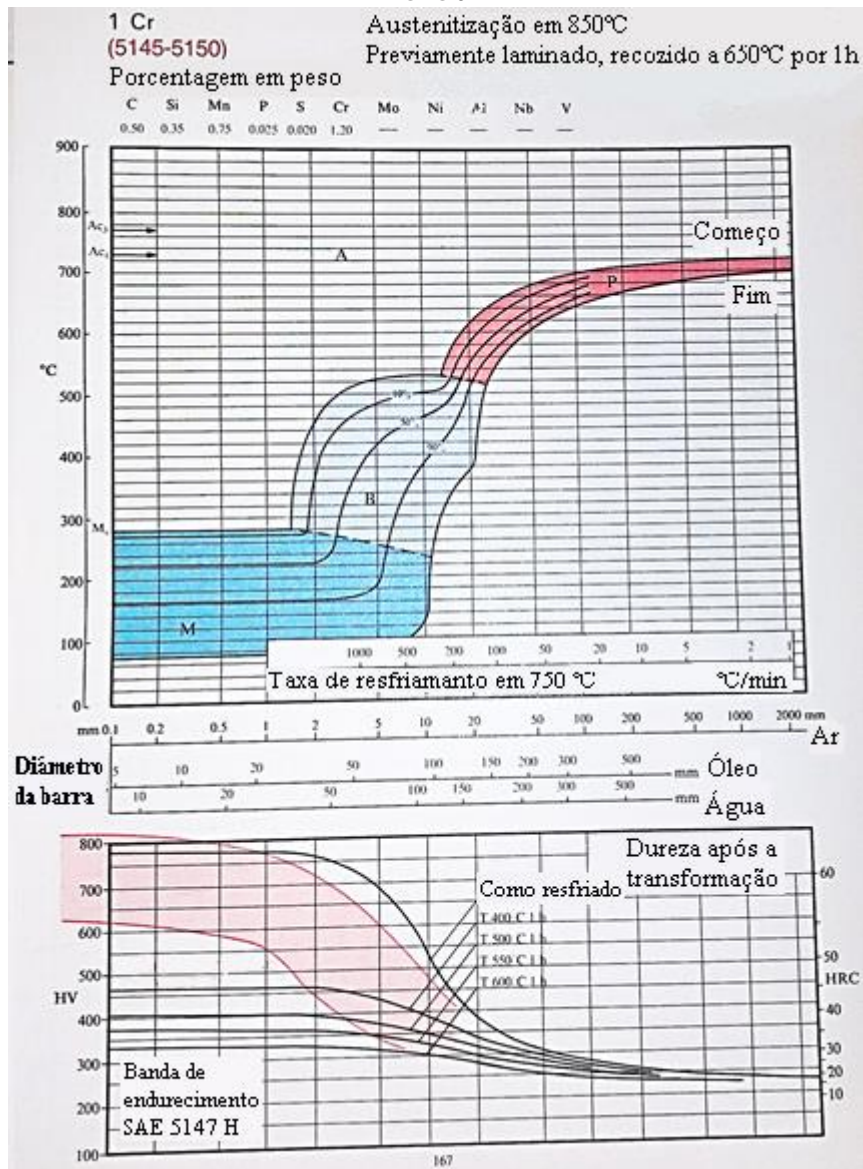
Em meio líquido, Silva e Mei (1988) propõem a existência de três estágios da têmpera. O primeiro estágio proposto caracteriza-se pela formação de um filme contínuo de vapor sobre o metal. A duração deste estágio deve ser a menor possível devido à sua faixa de temperatura característica ser propícia à transformação perlítica. No segundo estágio, inicia-se a formação e o desprendimento de bolhas de vapor da superfície da peça. No terceiro estágio apresentado pelos autores, o metal já atingiu uma temperatura superficial insuficiente para a vaporização do meio da têmpera e o resfriamento ocorre por convecção, dependendo exclusivamente das características interfaciais meio-peça, da capacidade calorífica do meio e das condições de agitação. Analogamente a estes três estágios, Farahani, Kowsary e Jamali (2014) descrevem três mecanismos de transferência de calor em ebulição: *film boiling*, *nucleate boiling* e *convective boiling*. No mecanismo denominado *film boiling*, os autores afirmam que o calor é transferido por meio de condução e radiação através do vapor que cobre a superfície aquecida. No *nucleate boiling*, a transferência de calor ocorre por meio de bolhas de vapor que nucleiam,

crecem e se desprendem da superfície. Por fim, no *convective boiling* o calor é conduzido através do líquido e a evaporação ocorre na interface líquido-vapor sem formação de bolhas.

Buczek e Telejko (2013) afirmam que, em suporte à escolha correta dos fluidos refrigerantes, frequentemente, são utilizadas curvas de taxa de resfriamento, determinadas experimentalmente de acordo com o padrão internacional ISO 9950 (1995), e, como opção mais eficaz, a aplicação de simulação numérica para modelar a transferência de calor durante o arrefecimento. Abordagens híbridas também são frequentemente adotadas na análise da transferência de calor. Silva, Zdanski e Vaz Júnior (2017) apostaram no uso da metodologia numérica e de resultados experimentais para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção em aletas de ferro cinzento. Além disso, devido ao fato de muitas vezes os problemas de transferência de calor serem problemas mal-postos, segundo os critérios de Hadamard apud Velho (2001), por exemplo, devido à rápida variação do fluxo de calor com o tempo, torna-se necessária uma formulação de problema inverso (BUCZEK; TELEJKO, 2004, 2013; CARON; DAUN; WELLS, 2014; FARAHANI; KOWSARY; JAMALI, 2014; MASSON et al., 2002; VELHO, 2001).

Independentemente do tipo de abordagem para a análise do arrefecimento no processo de têmpera, os resultados são muito úteis quando confrontados com os diagramas de transformação de fases existentes na literatura (ASM INTERNATIONAL, 1997; ATKINS, 1980). A Figura 6 exemplifica como, a partir da análise da transferência de calor, podem ser inferidas propriedades do material, como microestrutura e dureza. Casarin (1996) e Gomez (2014) utilizaram técnicas de dilatométrica para a determinação de curvas de transformação no resfriamento contínuo, a fim de identificar o fenômeno de transformação de fases em diferentes taxas de resfriamento. Segundo Zhang (1995), muitas centenas de diagramas de transformação de fases no resfriamento contínuo foram construídas em todo o mundo para descrever a cinética de transformação da maioria de aços comerciais. Casarin (1996) e Callister Junior (2007), também reconhecem a importância prática destes diagramas para a formulação de projetos de tratamentos térmicos otimizados.

Figura 6 – Diagrama de transformação de fases no resfriamento contínuo dos aços 5145-5150



Fonte: Adaptado de Atkins (1980)



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico serve de embasamento para as análises térmicas analíticas do resfriamento do eixo de aço no processo de têmpera abordadas neste trabalho, onde os métodos utilizados são: capacitância global e condução unidimensional transiente.

#### 3.1 Equação da difusão de calor em coordenadas cilíndricas

Considerando a transferência de calor por condução, Incropera et al. (2012) propõem a análise da difusão de calor em um volume de controle através do balanço das taxas de variação energética: “a taxa líquida de transferência de energia por condução para o interior de um volume unitário somada à taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação da energia térmica acumulada no interior deste volume”. A equação que descreve este comportamento (equação da difusão de calor, equação 17), foi obtida pelos autores através dos caminhos expostos ao longo desta seção.

O balanço energético por meio de taxas é descrito pela equação (1):

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sai} = \dot{E}_{acu} \quad (1)$$

onde  $\dot{E}_{ent}$  é a taxa de transferência de energia por condução para o interior do volume unitário,  $\dot{E}_g$  é a taxa volumétrica de geração de energia térmica,  $\dot{E}_{sai}$  é a taxa de transferência de energia por condução para fora do volume unitário e  $\dot{E}_{acu}$  é a taxa de variação da energia térmica acumulada no interior deste volume, definida por

$$\dot{E}_{acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} r dr d\phi dz \quad (2)$$

A equação (2) desconsidera os efeitos da energia latente referente às mudanças de fase. Desta forma, apenas a taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio por unidade de volume, representada por  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ , irá influenciar a variação da energia interna térmica armazenada. Nesta equação,  $\rho$  e  $c_p$  são, respectivamente, a massa específica e o calor específico a pressão constante do material.

A taxa de transferência de energia por condução para o interior do volume unitário ( $\dot{E}_{ent}$ ) pode ser representada pela soma das taxas de transferência de calor por condução em cada direção, como indica a equação (3)

$$\dot{E}_{ent} = q_r + q_\phi + q_z \quad (3)$$

Pela Lei de Fourier, equação (4)

$$\mathbf{q}'' = -k\nabla T = (i q''_r + j q''_\phi + k q''_z) = -k \left( i \frac{\partial T}{\partial r} + j \frac{\partial T}{r \partial \phi} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

onde  $\mathbf{q}''$  é o fluxo térmico (W/m<sup>2</sup>),  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura e  $k$  é a condutividade térmica do material (W/m.K), extraímos, através da relação  $q_n = q''_n \cdot A$ , na qual  $A$  é a área da superfície normal à direção  $n$ , as seguintes equações

$$q_r = -kr d\phi dz \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5)$$

$$q_\phi = -kr dz \frac{\partial T}{r \partial \phi} \quad (6)$$

$$q_z = -kr dr d\phi \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

Substituindo (5), (6) e (7) em (3)

$$\dot{E}_{ent} = rd\phi dz \frac{\partial T}{\partial r} + rdz \frac{\partial T}{r \partial \phi} + r dr d\phi \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8)$$

As taxas de perda de calor em cada direção, equações (9), (10) e (11), quando somadas, fornecem a taxa de transferência de energia por condução para fora do volume unitário ( $\dot{E}_{sai}$ ), expressões (12) e (13):

$$q_{r+dr} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr \quad (9)$$

$$q_{\phi+d\phi} = q_\phi + \frac{\partial q_\phi}{r \partial \phi} dr d\phi \quad (10)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (11)$$

$$\dot{E}_{sai} = q_{r+dr} + q_{\phi+d\phi} + q_{z+dz} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr + q_\phi + \frac{\partial q_\phi}{r \partial \phi} dr d\phi + q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (12)$$

Substituindo (5), (6) e (7) em (12)

$$\dot{E}_{sai} = rd\phi dz \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr + rdz \frac{\partial T}{r\partial\phi} + \frac{\partial q_\phi}{r\partial\phi} drd\phi + rd\phi \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (13)$$

A taxa volumétrica de geração de energia térmica ( $\dot{E}_g$ ) é definida por

$$\dot{E}_g = \dot{q}rd\phi dz \quad (14)$$

onde  $\dot{q}$  é a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m<sup>3</sup>).

Substituindo (2), (8), (13) e (14) em (1)

$$\dot{q}rd\phi dz - \left( \frac{\partial q_r}{\partial r} dr + \frac{\partial q_\phi}{r\partial\phi} drd\phi + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} rd\phi dz \quad (15)$$

Dividindo ambos os lados da equação (15) por  $rd\phi dz$

$$\dot{q} - \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{q_r}{rd\phi dz} \right) + \frac{\partial}{r^2\partial\phi} \left( \frac{q_\phi}{dz} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{q_z}{rd\phi} \right) \right] = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

Isolando  $-k \frac{\partial T}{\partial n}$  nas equações (5), (6) e (7) e substituindo em (16), obtém-se a forma final da equação da difusão do calor (equação 17)

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

### 3.2 Método da capacitância global

O método da capacitância global descrito por Incropera et al. (2012) despreza o gradiente de temperatura no interior dos sólidos, sendo impossível o uso da equação 17. O método tem sua origem em um balanço energético simplificado, se comparado ao balanço da equação (1), e será demonstrado a seguir, em conformidade com o texto dos autores citados acima neste parágrafo.

Primeiramente, considera-se que  $-\dot{E}_{sai} = \dot{E}_{acu}$  e, portanto, pela Lei do Resfriamento de Newton

$$-hA_S(T - T_\infty) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>.K),  $A_S$  é a área superficial,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido em escoamento e  $\rho V c \frac{dT}{dt}$  é a taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio.

Definindo-se  $\theta \equiv T - T_\infty$ , para  $T_\infty$  constante, manipula-se a equação (18) para

$$\frac{\rho V c}{h A_S} \frac{d\theta}{dt} = -\theta \quad (19)$$

Para as condições iniciais  $t = 0$  e  $T(0) = T_i$ , a equação (19) transforma-se em

$$\frac{\rho V c}{h A_S} \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^t dt \quad (20)$$

Integrando (20)

$$\frac{\rho V c}{h A_S} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad (21)$$

onde  $\theta_i \equiv T_i - T_\infty$

Extraindo a exponencial natural dos dois lados da equação (21), obtém-se a equação (22).

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[ - \left( \frac{h A_S}{\rho V c} \right) t \right] \quad (22)$$

Define-se a constante de tempo térmica por meio da equação (23).

$$\tau_t = \frac{\rho V c}{h A_S} = R_t C_t \quad (23)$$

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

O método da capacitância global é válido quando a resistência à transferência de calor por condução no interior do sólido é muito menor do que a resistência à transferência de calor por convecção através da camada limite do fluido, ou seja, a validação ocorre quando o número de Biot, expressão (24), é menor que 0,1.

$$Bi_{CG} = \frac{h L_c}{k} \quad (24)$$

Sendo  $Bi_{CG}$  o parâmetro adimensional denominado número de Biot, aqui representado pelos índices  $CG$  (referentes a Capacitância Global) para a distinção do número de Biot utilizado no método da condução unidimensional transiente ( $Bi_{CUT}$ );  $L_c$  o comprimento característico, expressão (25);  $k$  a condutividade térmica do sólido e  $h$  o coeficiente de transferência de calor por convecção.

$$L_c = V/A_S \quad (25)$$

onde  $V$  é o volume do sólido e  $A_S$  é a área superficial através da qual ocorre a transferência de calor para o meio.

### 3.3 Condução unidimensional transiente em cilindros

Com o objetivo de simplificar a solução do problema da transferência de calor em um cilindro de raio  $r_0$ , que se encontra em uma temperatura uniforme e é submetido a uma mudança nas condições convectivas, Incropera et al. (2012) propõem a hipótese da condução unidimensional transiente na direção radial. Segundo os autores, para  $L/r_0 \geq 10$ , onde  $L$  é o comprimento do cilindro, a hipótese apresenta uma aproximação razoável. Neste caso, o cilindro é considerado infinito.

Após definirem a temperatura adimensional ( $\theta^*$ ) como  $\theta^* \equiv \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}$ , onde  $T_\infty$  é a temperatura ambiente e  $T_i$ , a temperatura inicial, Incropera et al. (2012) apresentam a solução exata, equação (26) para o problema da transferência de calor.

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) J_0(\zeta_n r^*) \quad (26)$$

Sendo  $Fo$ , conhecido por número de Fourier, um tempo adimensional dado pela equação (27), que relaciona o intervalo de tempo ao raio e à difusividade térmica do material,

$$Fo = \alpha t / r_0^2 \quad (27)$$

e

$$C_n = \frac{2}{\zeta_n} \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0^2(\zeta_n) + J_1^2(\zeta_n)} \quad (28)$$

onde os valores discretos de  $\zeta_n$  são raízes positivas da equação transcendental (29)

$$\zeta_n \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0(\zeta_n)} = Bi_{CUT} \quad (29)$$

e  $Bi_{CUT}$  é novamente o número de Biot, porém, agora calculado com  $r_0$ , como o indicado na equação (30)

$$Bi_{CUT} = hr_0/k \quad (30)$$

Quando  $Fo > 0,2$ , Incropera et al. (2012) aproximam a solução em série para o primeiro termo, como o indicado pela equação (31).

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) J_0(\zeta_1 r^*) \quad (31)$$

As seis primeiras raízes da Equação (29) estão representadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – As seis primeiras raízes da equação  $\zeta_n \frac{I_1(\zeta_n)}{I_0(\zeta_n)} = Bi_{CUT}$**

$Bi_{CUT}$	$\zeta_1$	$\zeta_2$	$\zeta_3$	$\zeta_4$	$\zeta_5$	$\zeta_6$
0	0	3,8317	7,0156	10,1735	13,3237	16,4706
0,01	0,1412	3,8343	7,0170	10,1745	13,3244	16,4712
0,02	0,1995	3,8369	7,0184	10,1754	13,3252	16,4718
0,04	0,2814	3,8421	7,0213	10,1774	13,3267	16,4731
0,06	0,3438	3,8473	7,0241	10,1794	13,3282	16,4743
0,08	0,3960	3,8525	7,0270	10,1813	13,3297	16,4755
0,1	0,4417	3,8577	7,0298	10,1833	13,3312	16,4767
0,15	0,5376	3,8706	7,0369	10,1882	13,3349	16,4797
0,2	0,6170	3,8835	7,0440	10,1931	13,3387	16,4828
0,3	0,7465	3,9091	7,0582	10,2029	13,3462	16,4888
0,4	0,8516	3,9344	7,0723	10,2127	13,3537	16,4949
0,5	0,9408	3,9594	7,0864	10,2225	13,3611	16,5010
0,6	1,0184	3,9841	7,1004	10,2322	13,3686	16,5070
0,7	1,0873	4,0085	7,1143	10,2419	13,3761	16,5131
0,8	1,1490	4,0325	7,1282	10,2516	13,3835	16,5191
0,9	1,2048	4,0562	7,1421	10,2613	13,3910	16,5251
1,0	1,2558	4,0795	7,1558	10,2710	13,3984	16,5312
1,5	1,4569	4,1902	7,2233	10,3188	13,4353	16,5612
2,0	1,5994	4,2910	7,2884	10,3658	13,4719	16,5910
3,0	1,7887	4,4634	7,4103	10,4566	13,5434	16,6499
4,0	1,9081	4,6018	7,5201	10,5423	13,6125	16,7073
5,0	1,9898	4,7131	7,6177	10,6223	13,6786	16,7630
6,0	2,0490	4,8033	7,7039	10,6964	13,7414	16,8168
7,0	2,0937	4,8772	7,7797	10,7646	13,8008	16,8684
8,0	2,1286	4,9384	7,8464	10,8271	13,8566	16,9179
9,0	2,1566	4,9897	7,9051	10,8842	13,9090	16,9650
10,0	2,1795	5,0332	7,9569	10,9363	13,9580	17,0099
15,0	2,2509	5,1773	8,1422	11,1367	14,1576	17,2008

Fonte: Adaptado de Luikov (1968) apud VanSant (1983)

### 3.4 Convecção natural externa em cilindros

Considerando as grandezas adimensionais presentes na obra de Incropera et al. (2012), pode-se calcular os coeficientes de transferência de calor por convecção para os diferentes meios de têmpera. Estas grandezas são os números: de Prandtl, de Grashof e de Nusselt.

O número de Prandtl representa a “medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica, respectivamente” (INCROPERA et al., 2012, p. 236). Este parâmetro de similaridade adimensional é dado pela expressão (32).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\mu}{\rho \alpha} \quad (32)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $\alpha$  é a difusividade térmica,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Grashof é a “medida da razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas na camada-limite de velocidade” (INCROPERA et al., 2012, p. 236) e é fornecido pela equa o (33).

$$Gr_D \equiv \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\nu^2} \quad (33)$$

O número de Nusselt, cujo valor médio é fornecido pelas equa es (34) e (35), mede a transferência de calor por convec o em uma superfície, ou seja é um gradiente de temperatura adimensional.

Morgan apud Incropera et al. (2012) sugere

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_D}{k} \quad (34)$$

Em contrapartida, Churchill e Chu apud Incropera et al. (2012) recomendam uma única correla o para uma extensa faixa de números de Rayleigh ( $Ra_D$ ):

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (35)$$

onde  $Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\nu \alpha}$ .

### 3.5 Radiação térmica

Definida por Incropera et al. (2012) como a energia emitida pela matéria que se encontra em uma temperatura não nula, a radiação não necessita de um meio material para se propagar, tendo sua propagação mais efetiva no vácuo. Este transporte de energia se dá através da ação de ondas eletromagnéticas e tem sua origem na mudança das configurações eletrônicas dos átomos e moléculas que compõem a matéria de temperatura não nula.

A partir do fenômeno da radiação, define-se como poder emissivo ( $E$ ) a taxa na qual a energia térmica é liberada por unidade de área da superfície a partir da qual a emissão ocorre. Radiadores ideais, ou corpos negros, são superfícies que possuem um poder emissivo máximo ( $E_n$ ) determinado pela lei de Stefan-Boltzmann, expressão (36).

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (36)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície em Kelvin (INCROPERA et al., 2012).

A emissividade ( $\varepsilon$ ) de uma superfície é a propriedade que mede a eficiência na qual essa superfície emite energia em relação ao corpo negro. Uma vez que superfícies reais emitem um fluxo térmico sempre menor do que os radiadores ideais, esta propriedade torna-se importante para a determinação do poder emissivo, expressão (37).

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (37)$$

Da mesma forma que um corpo pode emitir radiação, ele pode receber radiação de corpos vizinhos e ter sua energia térmica aumentada. À taxa na qual a radiação incide sobre uma área unitária da superfície dá-se o nome irradiação ( $G$ ). Para que haja o aumento da energia térmica, a superfície deve absorver uma parte ou até mesmo toda a irradiação. A propriedade radiante da superfície que determina a taxa na qual a irradiação é absorvida, por unidade de área, expressão (38), é conhecida como absortividade ( $\alpha$ ).

$$G_{abs} = \alpha G \quad (38)$$

Para casos em que uma pequena superfície, de temperatura  $T_s$ , está em contato com uma superfície isotérmica muito maior, por exemplo, as paredes, com uma temperatura  $T_{viz}$ , de uma sala fechada, e  $T_s \neq T_{vizinhança}$ , considera-se que a irradiação pode ser aproximada à emissão de um corpo negro, ou seja,  $G = \sigma T_{vizinhança}^4$ . Adicionalmente, se a superfície for considerada



como a de um corpo cinza, em que  $\alpha = \varepsilon$ , determina-se a taxa líquida de transferência de calor por radiação que sai da superfície, por unidade de área através da expressão (39) (INCROPERA et al., 2012).

$$q_{rad}'' = \frac{q}{A} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (39)$$

Outra forma de representar a troca líquida de calor por radiação é através da expressão (40).

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{viz}) \quad (40)$$

onde  $h_r$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação, dado pela expressão (41).

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (41)$$

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da transferência de calor proposta por este trabalho foi desenvolvida em duas abordagens: uma teórica utilizando o método da capacitância global, a condução unidimensional transiente e a convecção natural externa e a outra experimental, através de medições de temperatura em intervalos de tempo pré-definidos no resfriamento de um eixo de aço SAE 5150 ao ar. Ambas as análises foram feitas sobre três amostras cilíndricas retiradas do mesmo eixo metálico.

### 4.1 Materiais e equipamentos

Os materiais e equipamentos utilizados para a análise da transferência de calor pela via experimental são:

- paquímetro Pantec com precisão de 0,05 mm, Figura 7;
- escala Vonder com precisão de 0,5 mm, Figura 7;
- forno Novus N1040, Figura 8;
- termômetro ICEL Manaus TD-880, Figura 9.

**Figura 7 – Paquímetro e escala utilizados na medição dos diâmetros e dos comprimentos das peças**



Fonte: Acervo próprio

**Figura 8 - Forno utilizado no tratamento térmico das peças**



Fonte: Acervo próprio

**Figura 9 - Termômetro com dois termopares conectados**

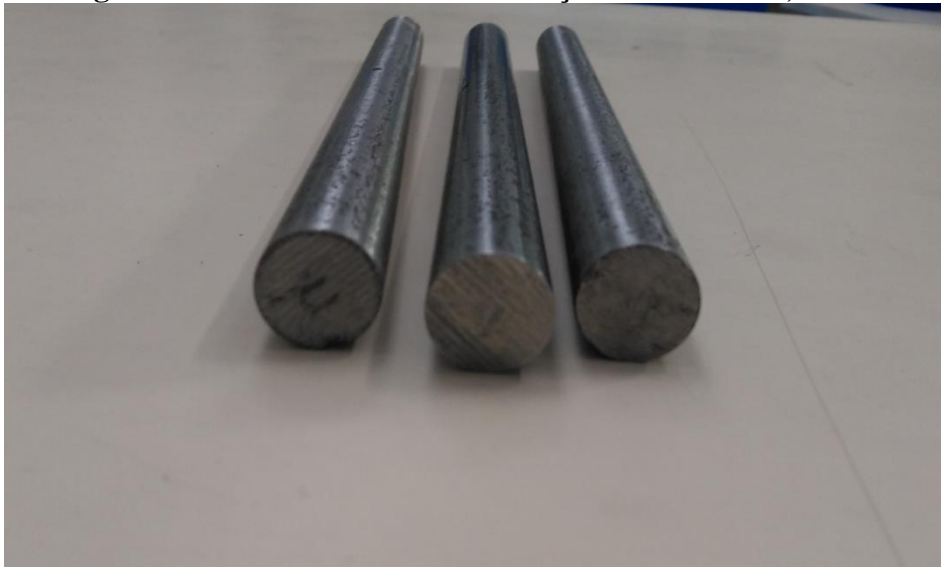


Fonte: Acervo próprio

## 4.2 Análise experimental

As três amostras cilíndricas foram obtidas pelo corte com serra-fita de um eixo de aço SAE 5150. Após o corte, foi executada a limpeza das superfícies laterais por meio do lixamento em um torno mecânico. Cortados e limpos, os cilindros foram marcados com inscrição alfabética nas superfícies basais para a identificação de cada peça, Figura 10. Desta forma, as amostras serão identificadas por suas respectivas letras: Amostra U, Amostra V e Amostra W.

**Figura 10 - Amostras com identificação alfabética: U, V e W**



Fonte: Acervo próprio

Como finalização do preparo das amostras, foram feitos furos, com profundidade igual ao raio, na porção média da superfície lateral de cada cilindro, com broca de 3 mm de diâmetro, Figura 11.

**Figura 11 – Furo com profundidade igual a um raio**

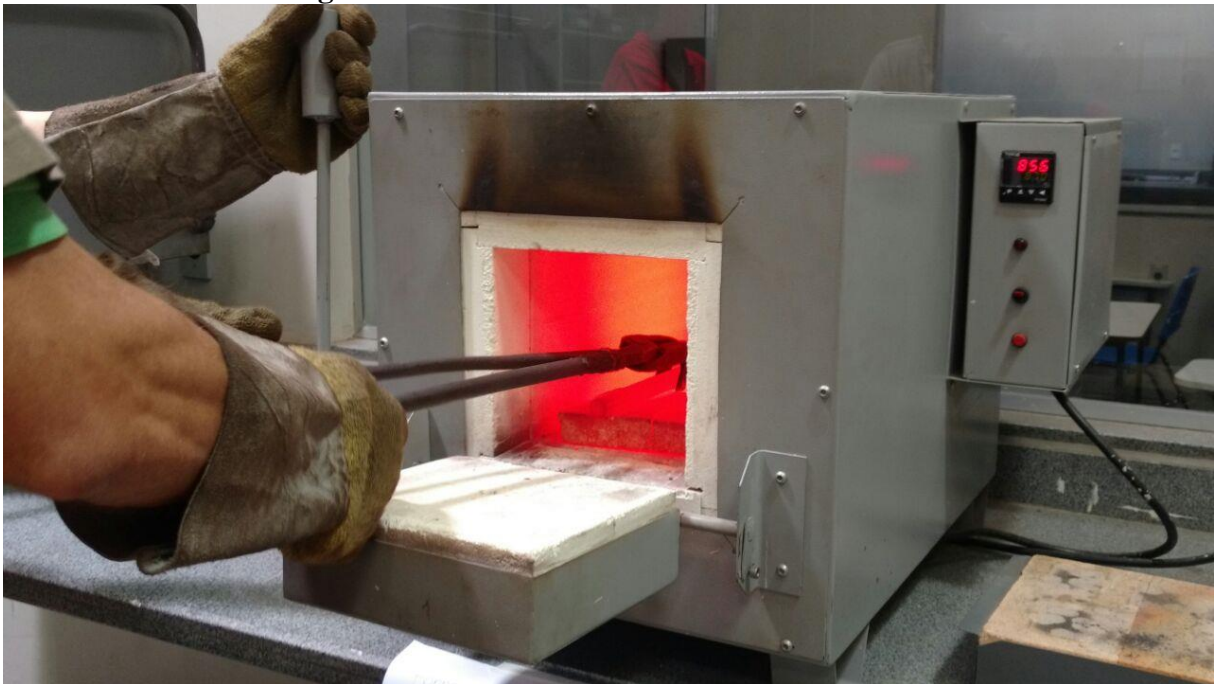


Fonte: Acervo próprio

Finalizado o preparo, as peças cilíndricas foram submetidas à medição do comprimento, com a escala Vonder de 0,5 mm de precisão, e do diâmetro, com paquímetro Pantec de 0,05 mm de precisão, Figura 6.

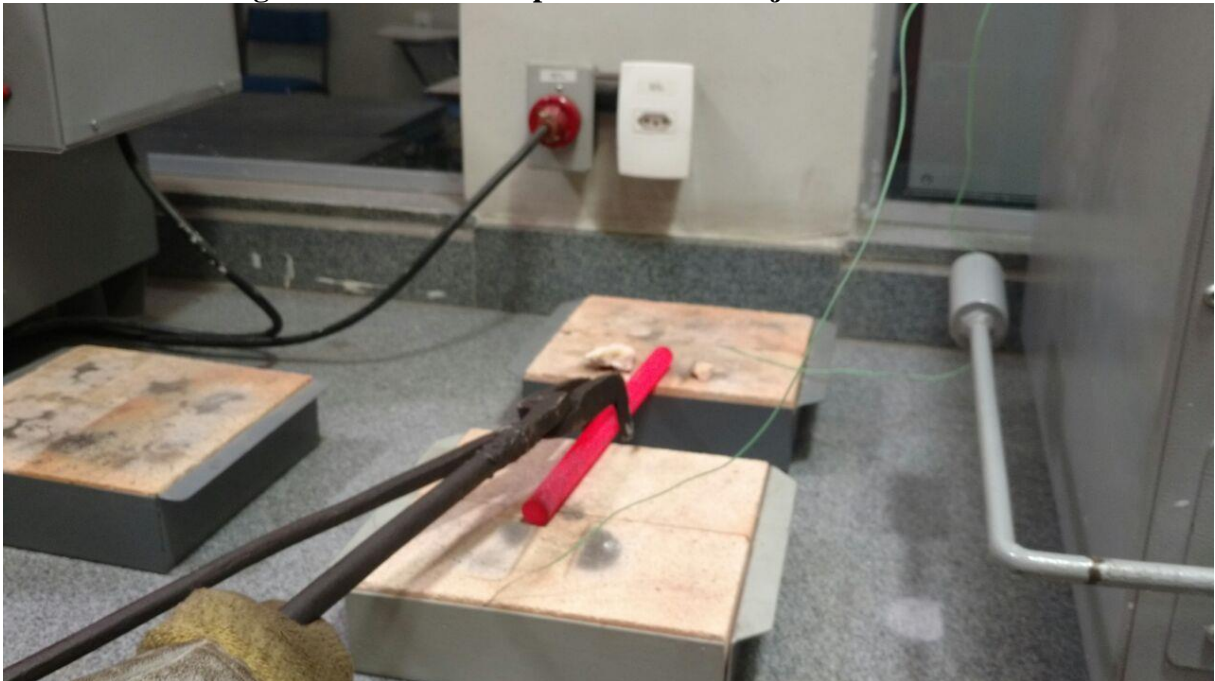
Em seguida, as amostras U e W foram levadas ao forno Novus N1040, pré-aquecido a uma temperatura de 870°C. Após aproximadamente 50 min, a amostra U foi retirada e apoiada sobre tijolos refratários nas duas extremidades, como o ilustrado nas Figuras 12 e 13, respectivamente, e a amostra V foi levada ao forno. A literatura e os fabricantes de aço recomendam para a liga SAE 5150 uma temperatura de têmpera de cerca de 850°C. Neste trabalho, optou-se por utilizar uma temperatura um pouco mais elevada (870°C), na tentativa de ser atingido um maior tamanho médio de grão austenítico e, conseqüentemente, facilitar a obtenção de uma microestrutura mais rica em martensita. Além disso, a ASM International (1991) recomenda para o tratamento de normalização do aço SAE 5150, uma temperatura de 870°C, o que indica que, possivelmente, esta temperatura não oferece grandes riscos à integridade mecânica deste aço.

**Figura 12 – Retirada de uma amostra do forno**



Fonte: Acervo próprio

**Figura 13 – Amostra apoiada sobre os tijolos refratários**



Fonte: Acervo próprio

Na amostra devidamente apoiada, foram colocados dois termopares: um no centro do cilindro, através do furo anteriormente feito, e outro na superfície, Figura 14 - a. É importante ressaltar que apesar dos termopares não possuírem dispositivos de fixação, a montagem foi feita de forma a possibilitar o contato contínuo dos mesmos com as amostras, Figura 14 - b.

**Figura 14- Montagem amostra – termopares**



a) Posicionamento dos termopares junto à amostra

b) Montagem favorável ao contato dos termopares com a amostra

Fonte: Acervo próprio

A Figura 15 representa toda a montagem experimental. Nesta imagem, nota-se que o forno à direita, sobre o qual está apoiado o termômetro e a tabela para preenchimento dos dados, está desligado.

**Figura 15 – Montagem experimental**



Fonte: Acervo próprio

Antes de medir as temperaturas, foi anotado o tempo necessário para que os termopares entrassem em equilíbrio térmico com o metal quente. Após este intervalo e anotada a primeira temperatura de equilíbrio, foram feitas e registradas as medidas em intervalos de tempo de 2 minutos, até um total de 50 min mais o intervalo inicial.

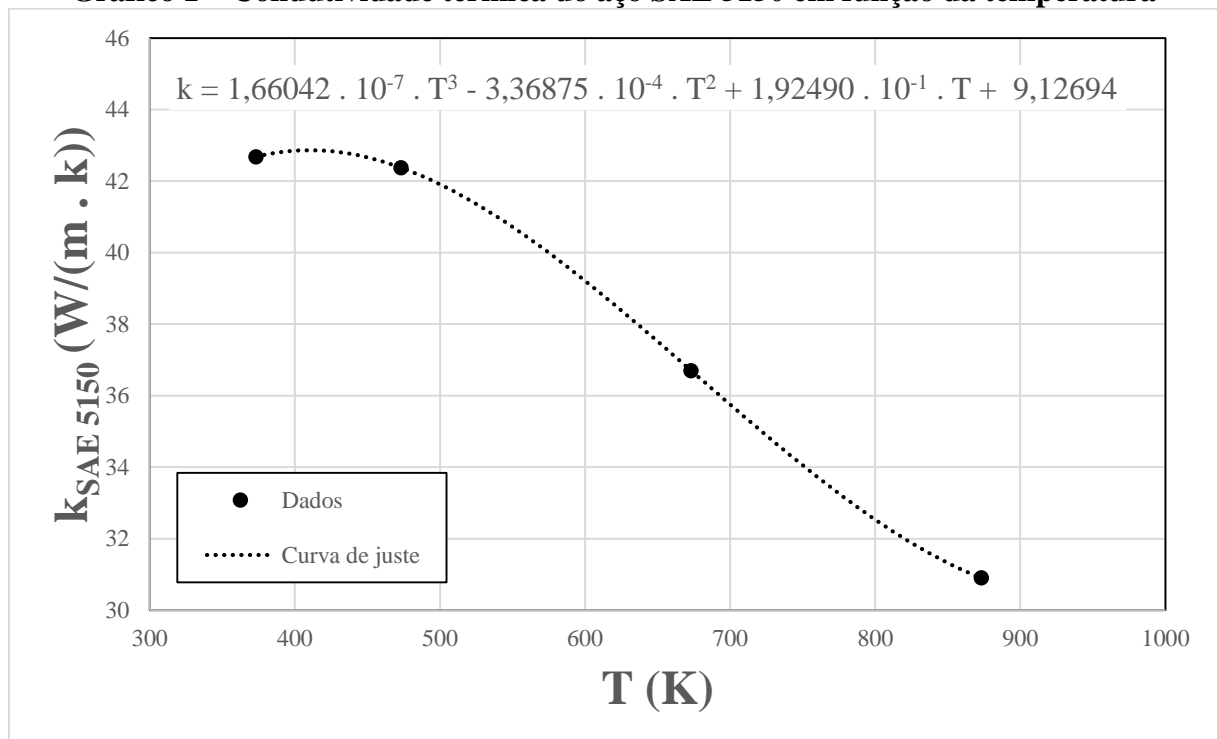
Após aproximadamente 100 min de forno cada uma, as amostras W e V foram retiradas e submetidas ao mesmo procedimento que a amostra U.

### 4.3 Análise teórica

Antes das análises via método da capacitância global e condução unidimensional transiente, foi necessário obter expressões que descrevessem a variação dos parâmetros físicos utilizados em função da temperatura. Para este fim, foram utilizadas tabelas de propriedades termo físicas em função da temperatura e construídas curvas de dispersão com os valores tabelados. As curvas e suas respectivas equações foram obtidas com o uso do *software* Excel 2013, bem como os cálculos subsequentes.

Para o aço SAE 5150 foram levantadas expressões para duas propriedades: condutividade térmica ( $k_{aço}$ ), Gráfico 1, e calor específico a pressão constante ( $Cp_{aço}$ ), Gráfico 2, com dados retirados de ASM International (1990). A curva da emissividade térmica ( $\epsilon$ ) em função da temperatura, Gráfico 3, foi obtida pelos dados de emissividade do aço inoxidável altamente oxidado presentes na obra de Incropera et al. (2012).

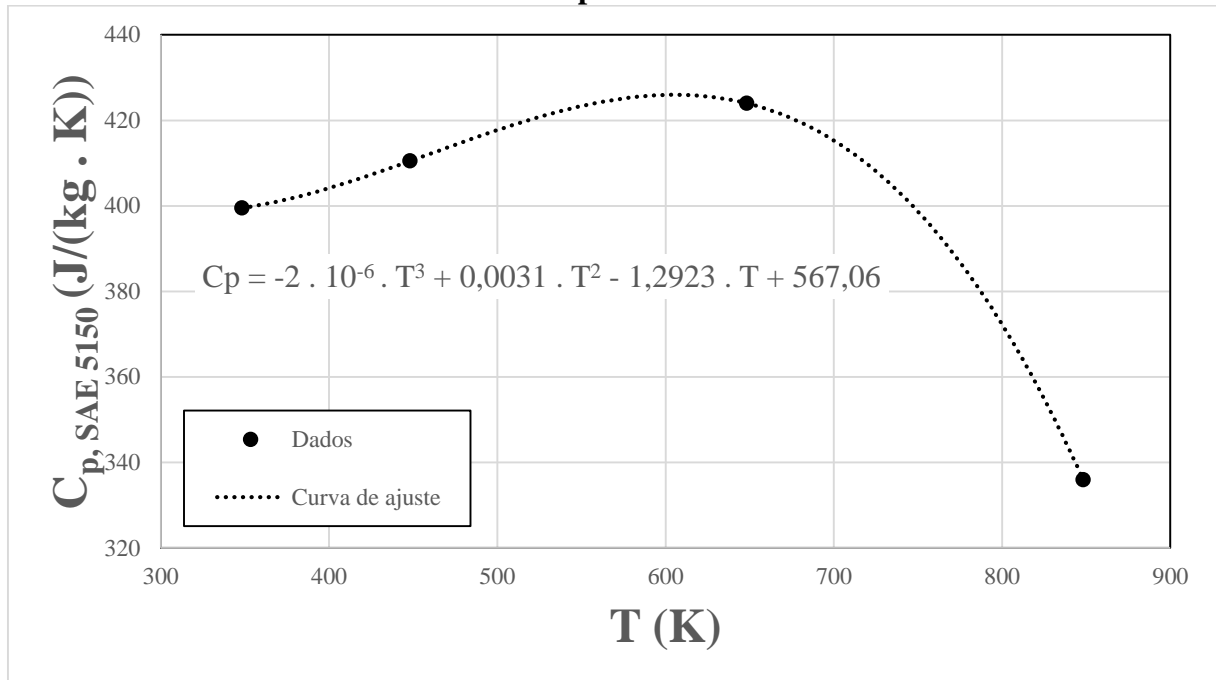
**Gráfico 1 – Condutividade térmica do aço SAE 5150 em função da temperatura**



Fonte: Própria autora



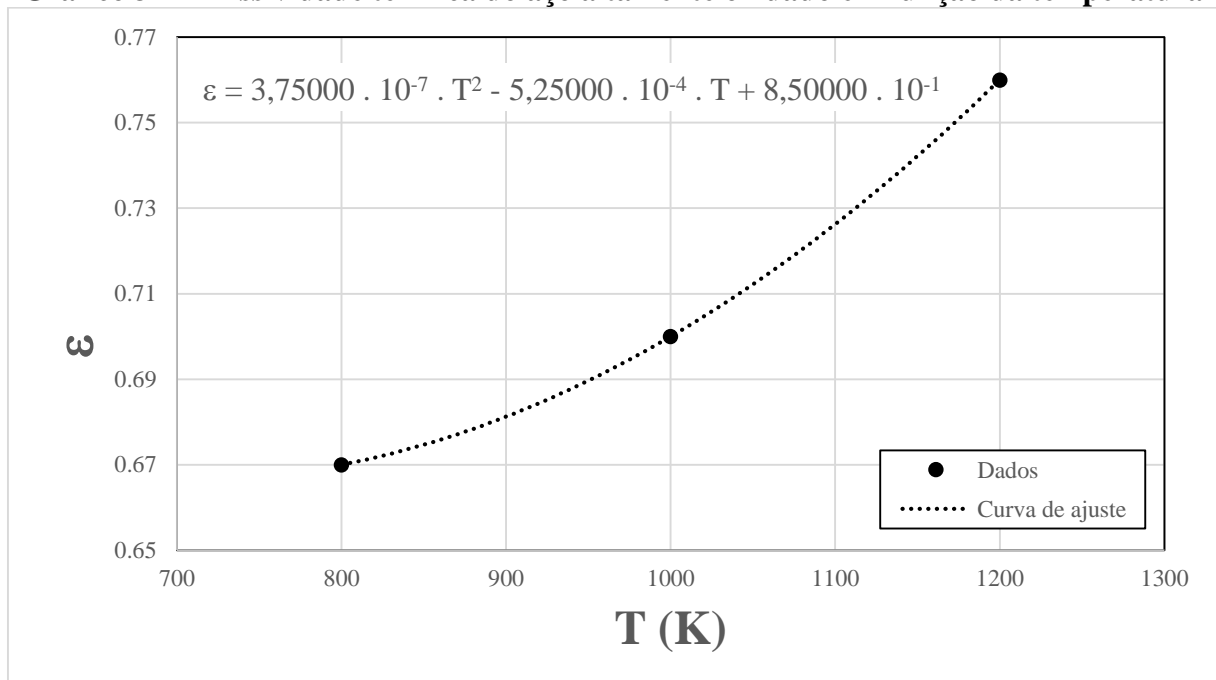
**Gráfico 2 – Calor específico a pressão constante do aço SAE 5150 em função da temperatura**



Fonte: Própria autora

Devido à existência de poucos pontos no Gráfico 2, optou-se por adotar a linearização como método de previsão de resultados no intervalo de temperaturas entre os dois últimos pontos.

**Gráfico 3 – Emissividade térmica do aço altamente oxidado em função da temperatura**

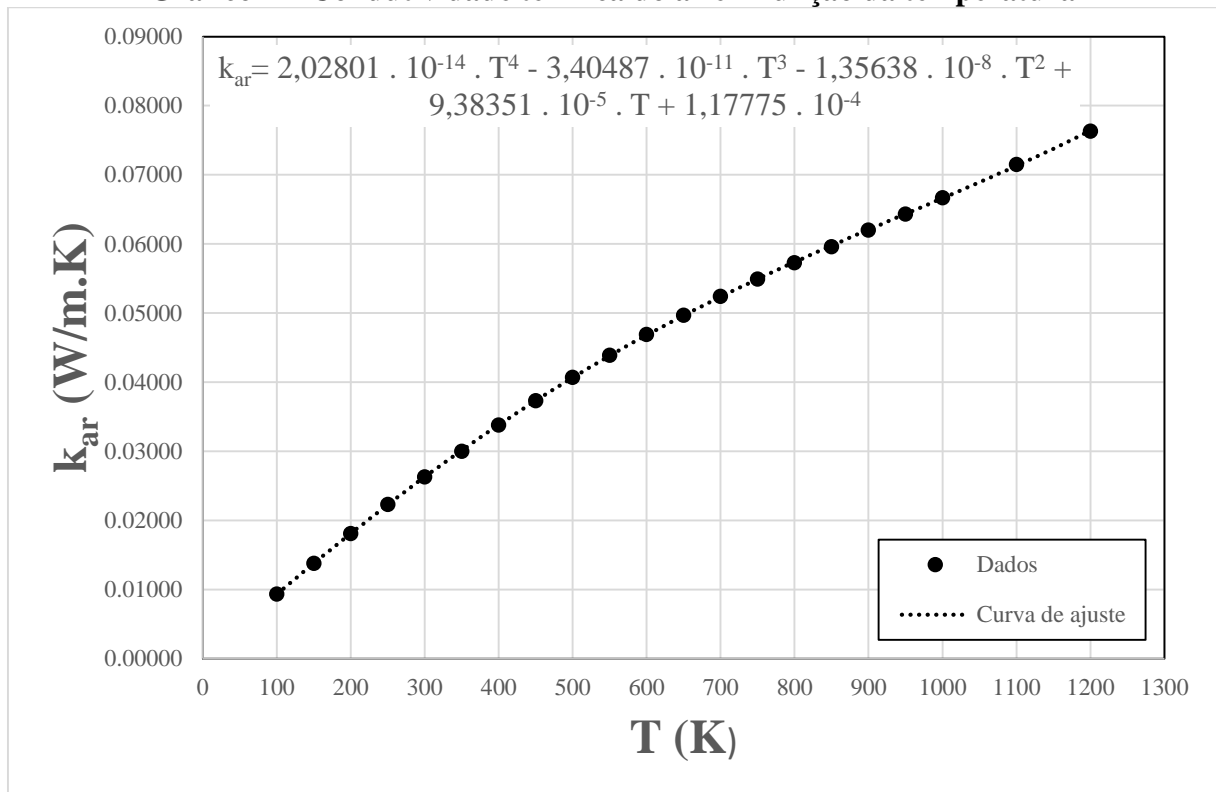


Fonte: Própria autora

#### 4.3.1 Coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) no resfriamento ao ar

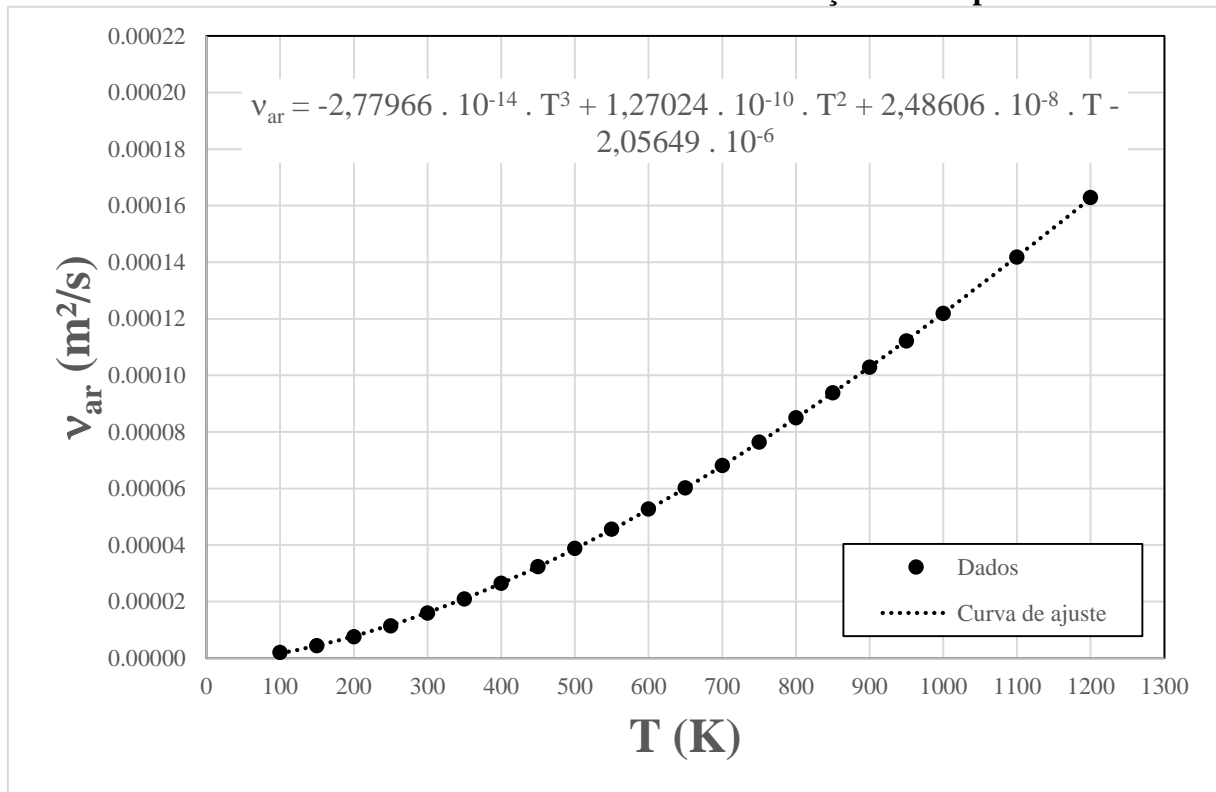
Visando a aplicação do método da capacitância global e da condução unidimensional transiente para a análise da transferência de calor, foi necessário primeiramente utilizar as equações da convecção natural externa e da radiação para a determinação do coeficiente de transferência de calor. Para tanto, outros parâmetros tabelados (INCROPERA et al., 2012) precisaram ser colocados em função da temperatura: condutividade térmica ( $k_{ar}$ ), Gráfico 4; difusividade de momento ( $\nu$ ), Gráfico 5; número de Prandtl ( $Pr$ ), Gráfico 6.

**Gráfico 4 – Condutividade térmica do ar em função da temperatura**



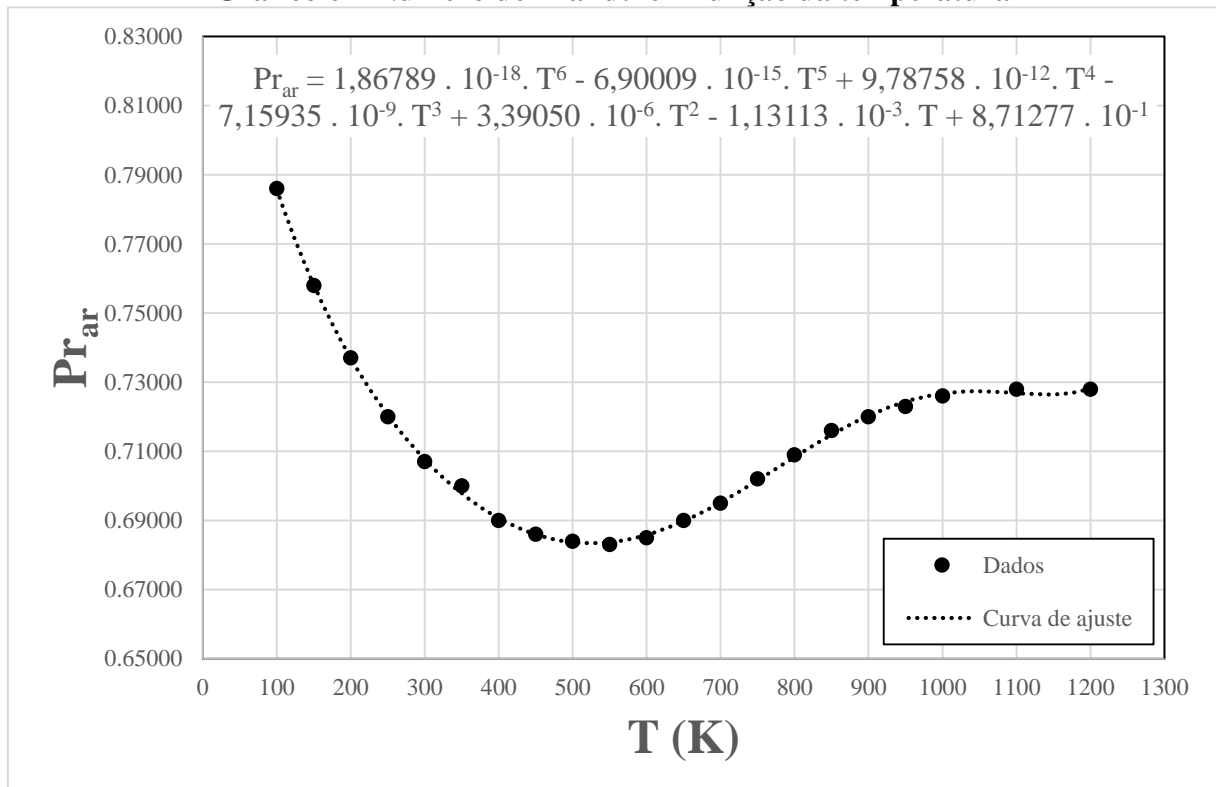
Fonte: Própria autora

**Gráfico 5 – Difusividade de momento do ar em função da temperatura**



Fonte: Própria autora

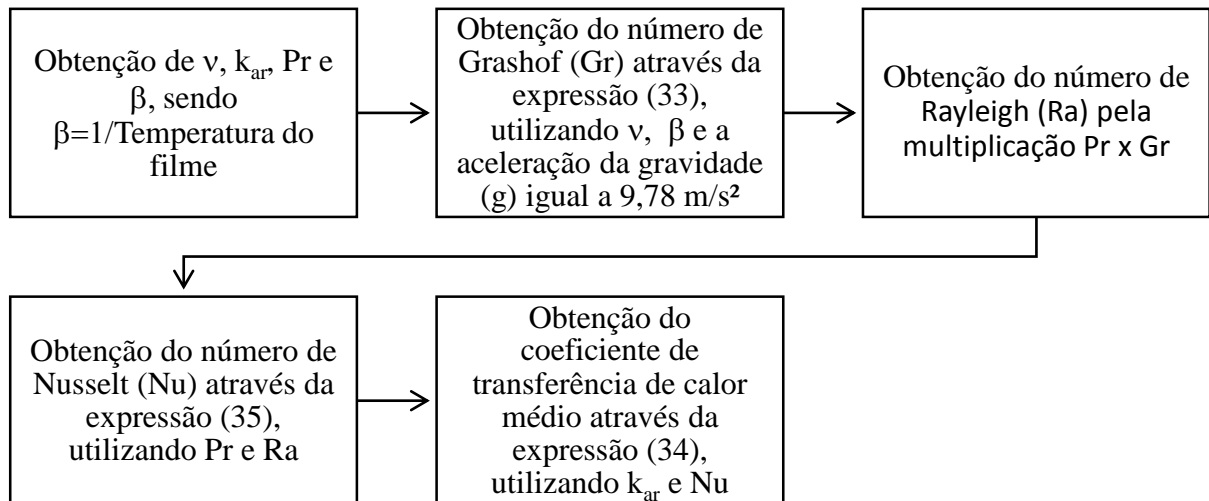
**Gráfico 6 – Número de Prandtl em função da temperatura**



Fonte: Própria autora

A sequência de cálculos necessários à obtenção do coeficiente de transferência de calor médio por convecção está representada esquematicamente na Figura 16.

**Figura 16 – Fluxograma de cálculos necessários à obtenção do coeficiente de transferência de calor médio por convecção**



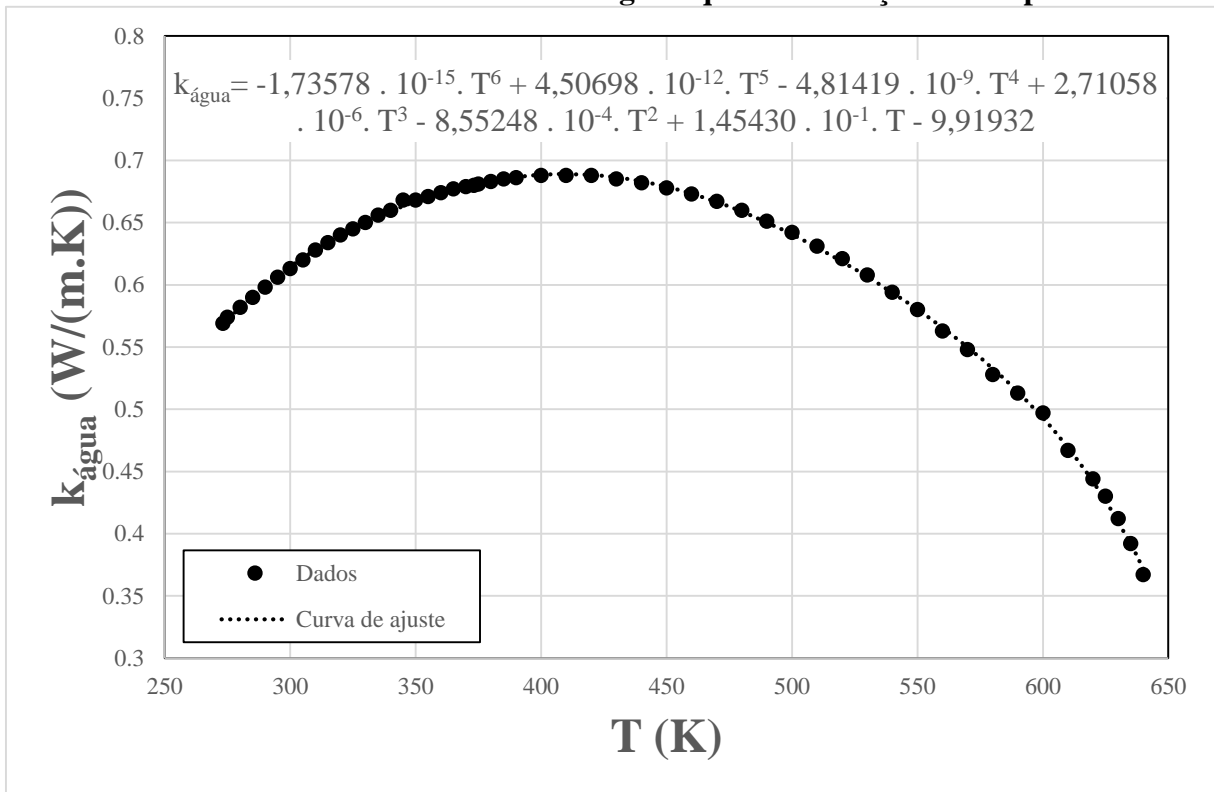
Fonte: Própria autora

No resfriamento ao ar também é importante levar em conta o efeito da transferência de calor por radiação. Por este motivo, também foram calculados os valores de coeficiente de transferência de calor por radiação em diferentes temperaturas, com o auxílio da expressão (41).

#### 4.3.2 Coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) no resfriamento em água

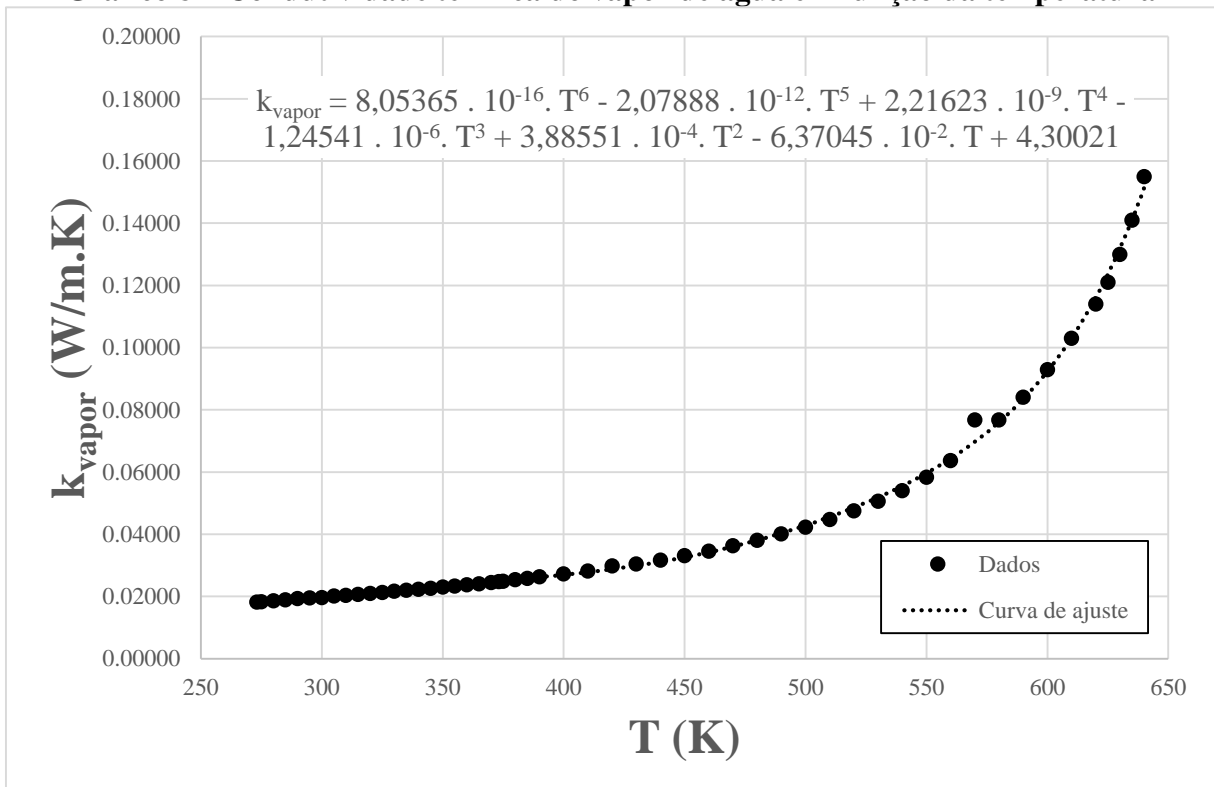
Em relação a transferência de calor no resfriamento em água, utilizou-se apenas o coeficiente de transferência de calor por convecção, uma vez que a convecção é muito mais expressiva do que a radiação em meio líquido. Para a determinação de  $h$ , primeiramente foi necessário encontrar as expressões de variação de algumas propriedades termo físicas da água líquida e do vapor de água em função da temperatura. Tais propriedades e temperaturas foram extraídas de tabelas presentes na obra de Incropera et al. (2012). As curvas dos Gráficos 7 e 8 mostram, respectivamente, a variação da condutividade térmica da água ( $k_{\text{água}}$ ) e da condutividade térmica do vapor de água ( $k_{\text{vapor}}$ ) em função da temperatura.

Gráfico 7 – Condutividade térmica da água líquida em função da temperatura



Fonte: Própria autora

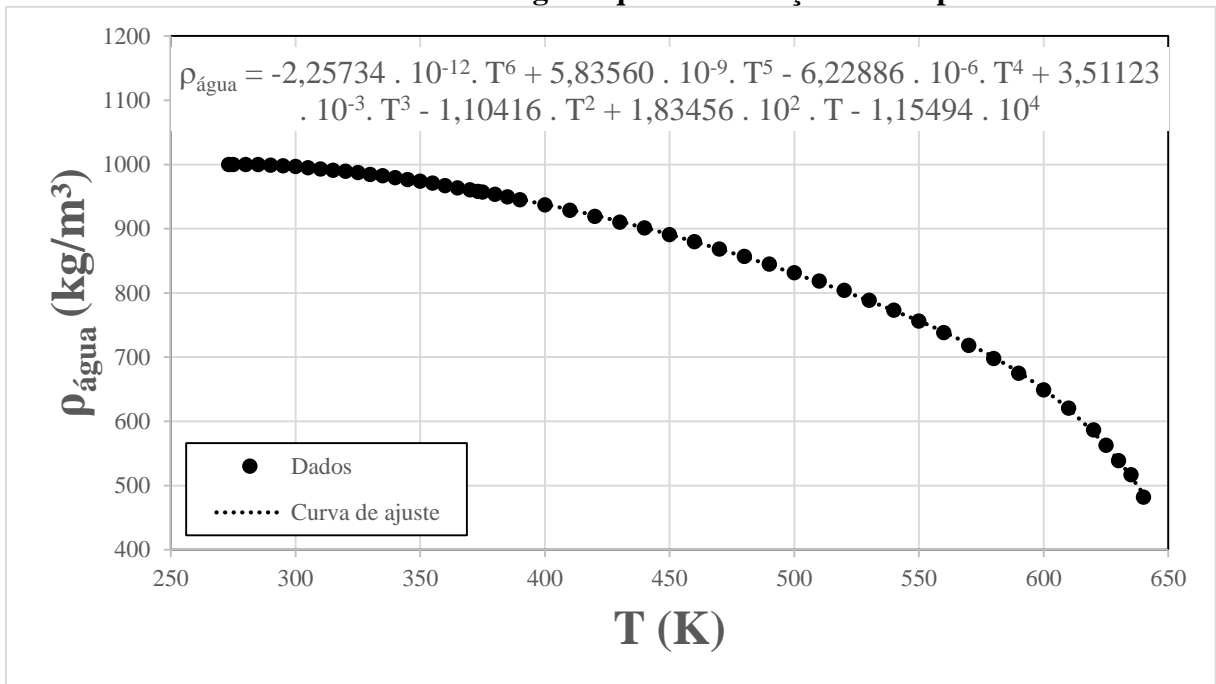
Gráfico 8 – Condutividade térmica do vapor de água em função da temperatura



Fonte: Própria autora

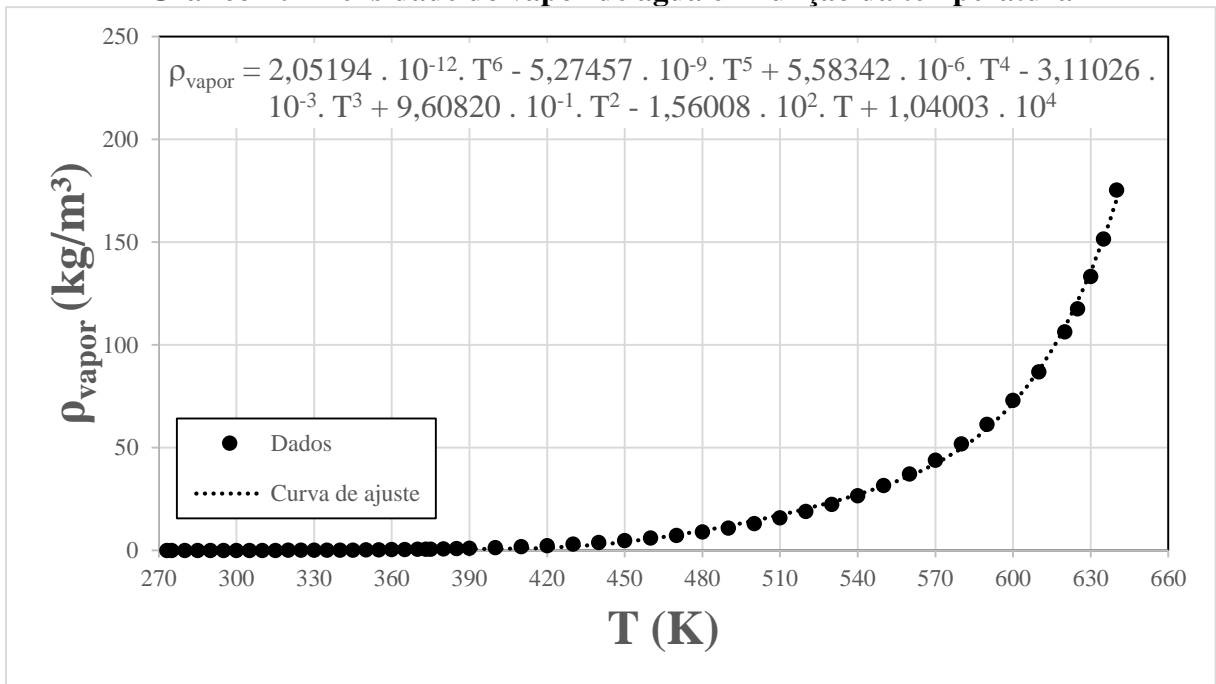
As densidades da água líquida ( $\rho_{\text{água}}$ ) e do vapor de água ( $\rho_{\text{vapor}}$ ), colocadas em função da temperatura, são representadas nos Gráficos 9 e 10, respectivamente.

**Gráfico 9 – Densidade da água líquida em função da temperatura**



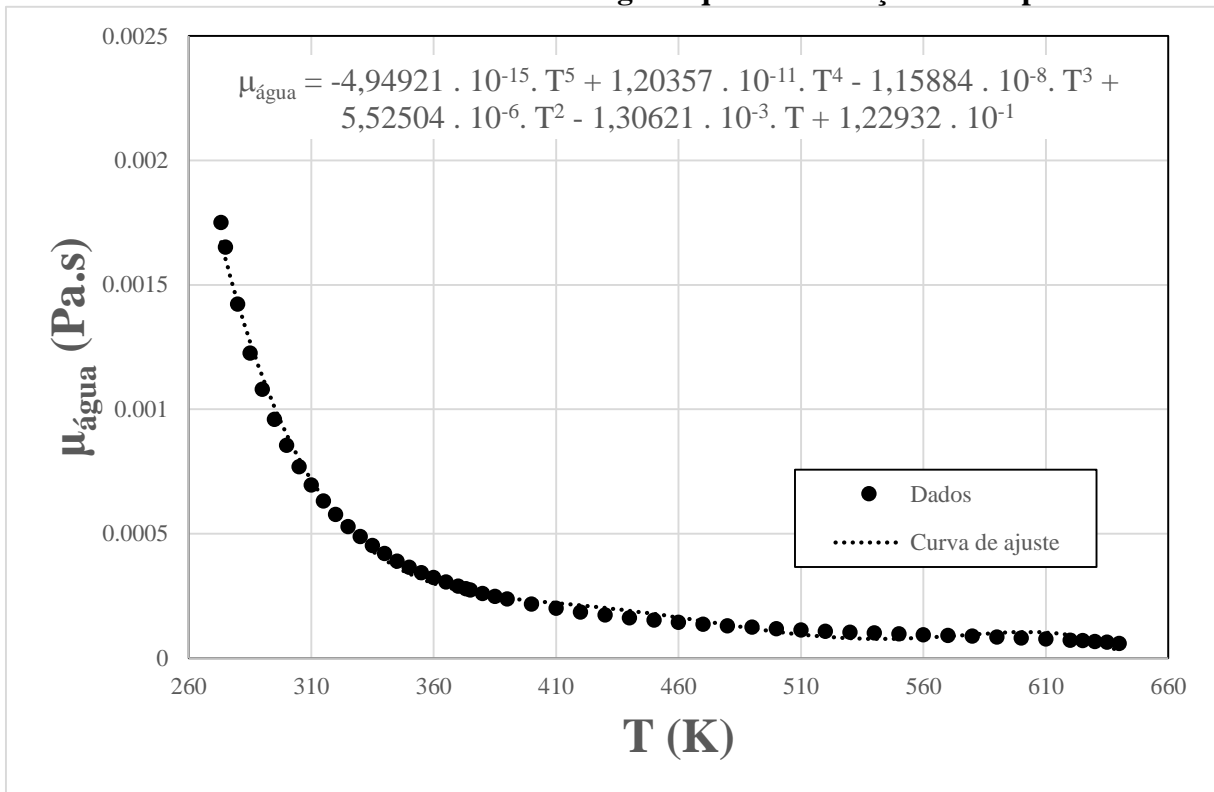
Fonte: Própria autora

**Gráfico 10 – Densidade do vapor de água em função da temperatura**

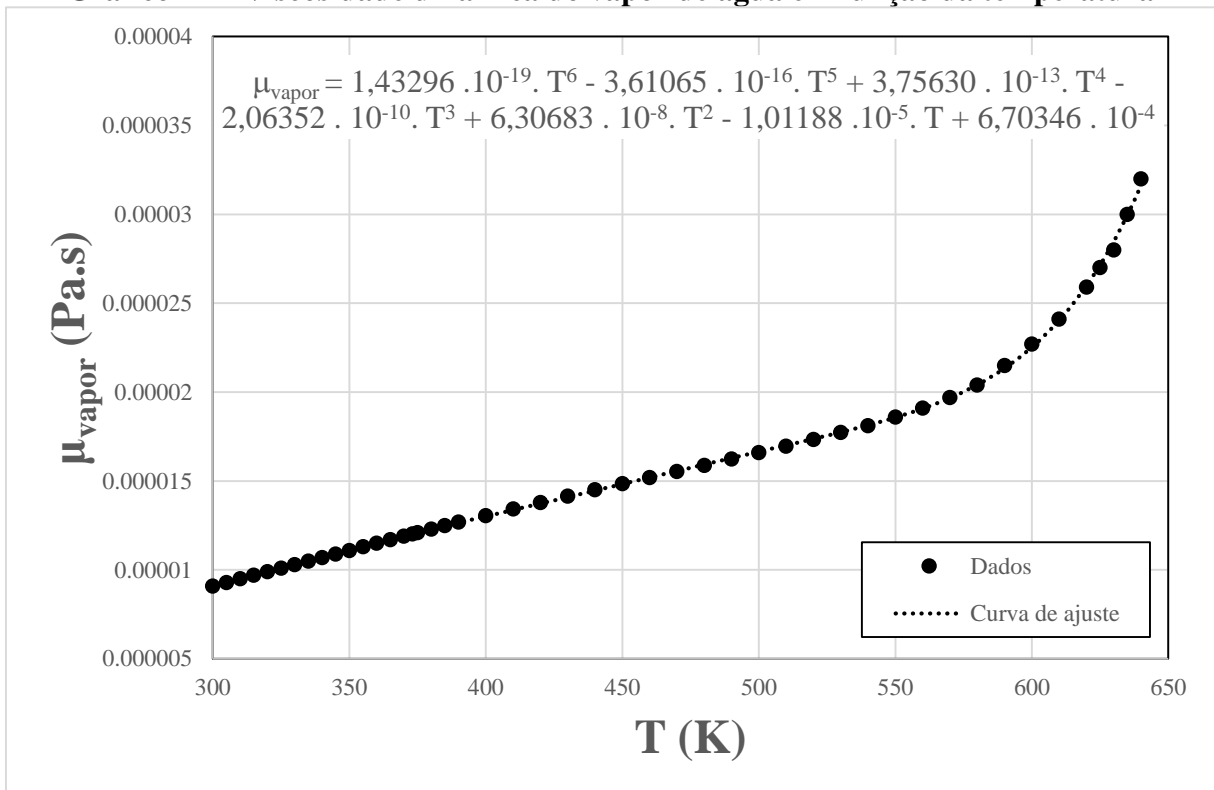


Fonte: Própria autora

Os valores de viscosidade dinâmica da água no estado líquido ( $\mu_{\text{água}}$ ) e na forma de vapor ( $\mu_{\text{vapor}}$ ) são representados nos Gráficos 11 e 12, respectivamente.

**Gráfico 11 – Viscosidade dinâmica da água líquida em função da temperatura**

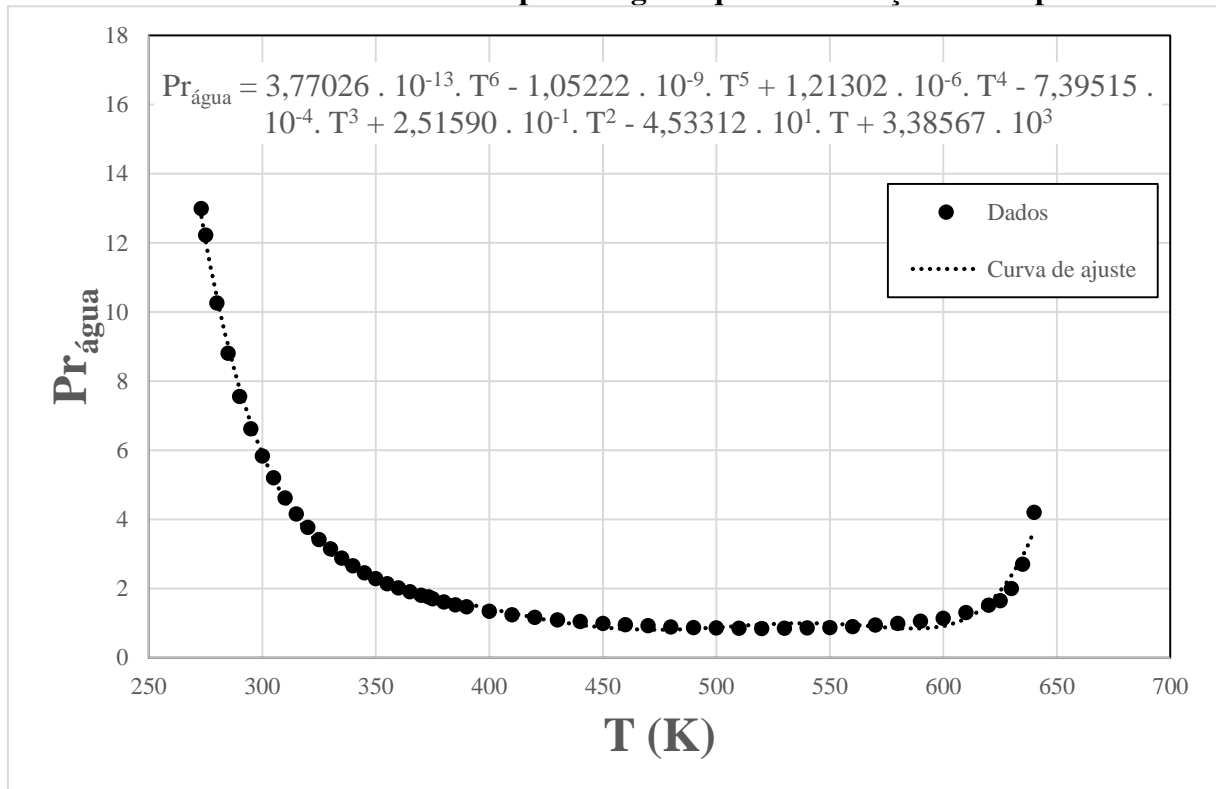
Fonte: Própria autora

**Gráfico 12 – Viscosidade dinâmica do vapor de água em função da temperatura**

Fonte: Própria autora

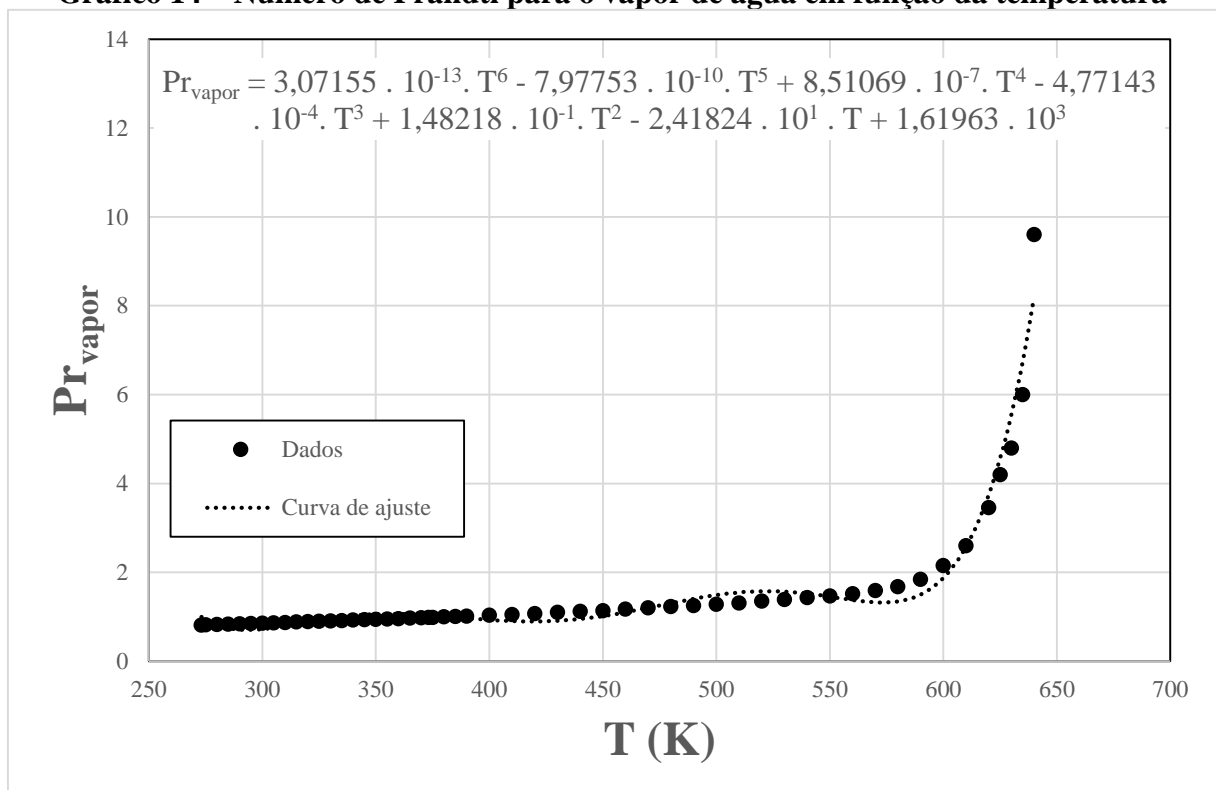
Os valores de Prandtl também foram determinados para a água líquida ( $Pr_{\text{água}}$ ) e para o vapor de água ( $Pr_{\text{vapor}}$ ), Gráficos 13 e 14, respectivamente.

**Gráfico 13 – Número de Prandtl para a água líquida em função da temperatura**



Fonte: Própria autora

**Gráfico 14 – Número de Prandtl para o vapor de água em função da temperatura**

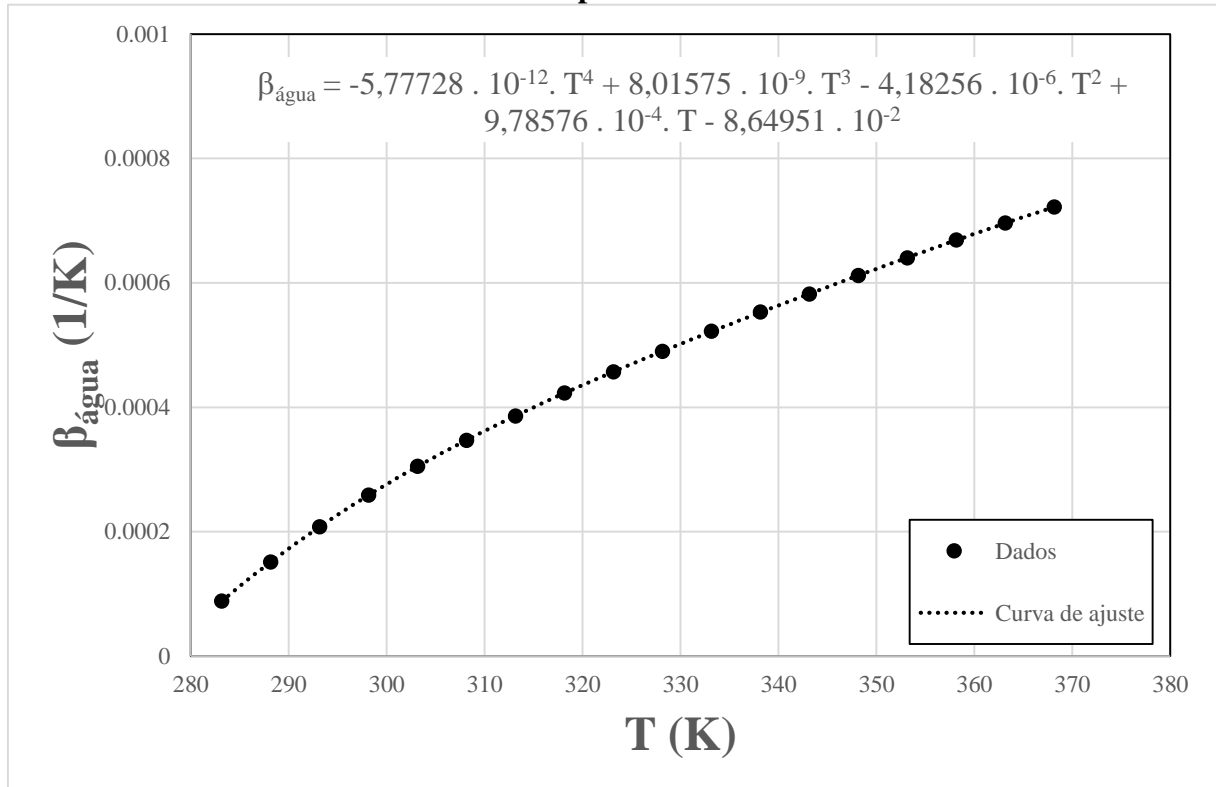




Fonte: Própria autora

O coeficiente de expansão volumétrica térmica para a água líquida ( $\beta_{\text{água}}$ ) foi igualmente determinado, Gráfico 15.

**Gráfico 15 – Coeficiente de expansão volumétrica térmica da água líquida em função da temperatura**

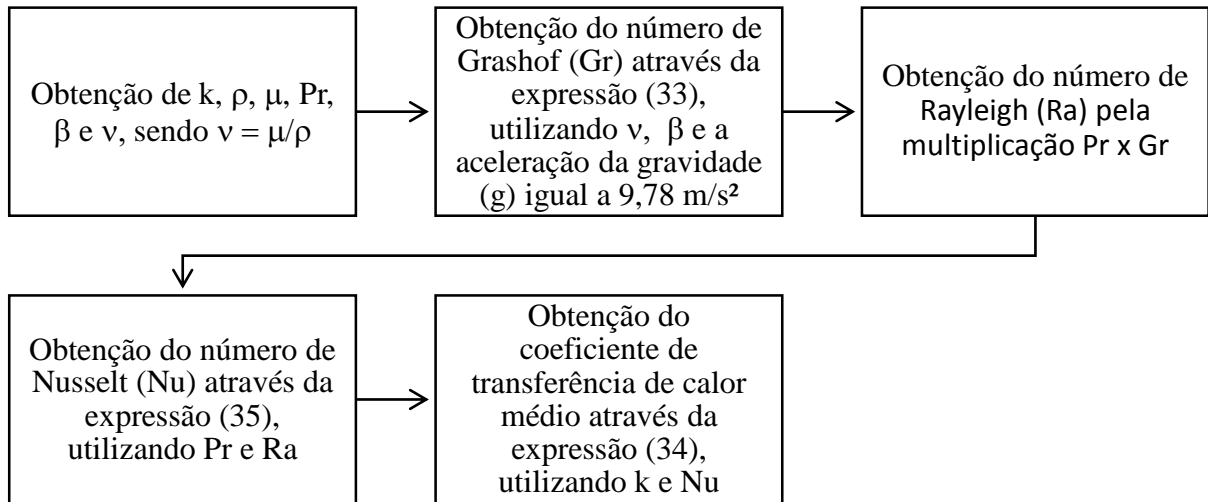


Fonte: Própria autora

Para o vapor de água, foi feita a aproximação  $\beta = 1/\text{Temperatura do filme}$ , válida para gases ideais.

O coeficiente de transferência de calor por convecção, no resfriamento em água, foi calculado como ilustra o esquema da Figura 17.

**Figura 17 – Fluxograma da obtenção do coeficiente de transferência de calor médio através da convecção natural externa**

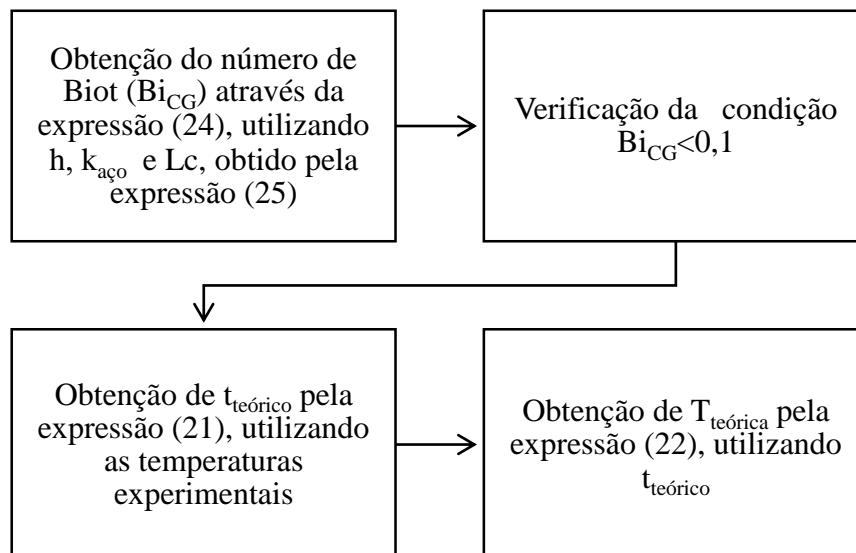


Fonte: Própria autora

#### 4.3.3. Método da capacitância global para o resfriamento ao ar

As equações referentes ao método da capacitância global foram utilizadas para a obtenção de valores teóricos de tempo e de temperatura. A Figura 18 representa a sequência de cálculos efetuados para a obtenção dos valores desejados.

**Figura 18 – Fluxograma do uso das equações do método da capacitância global**



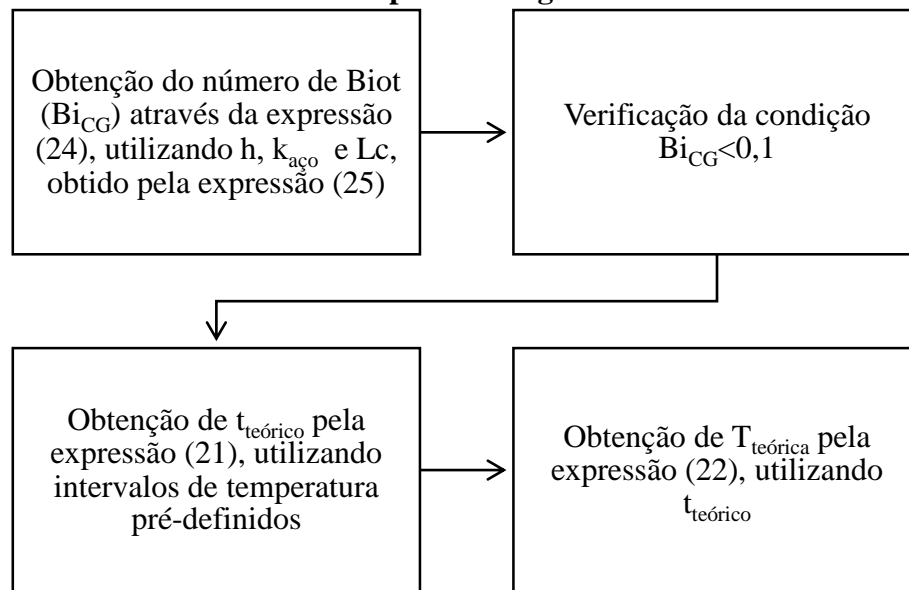
Fonte: Própria autora

Para efeito de comparação os cálculos representados pelo esquema da Figura 18 foram efetuados de duas maneiras: a primeira utilizando apenas o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_{conv}$ ) e a segunda, levando em conta o fenômeno da radiação, ou seja, no lugar de  $h$ , utilizou-se  $h_{conv} + h_{rad}$ .

#### 4.3.4 Método da capacitância global para o resfriamento em água

Os cálculos da transferência de calor no resfriamento em água pelo método da capacitância global estão representados esquematicamente na Figura 19.

**Figura 19 – Fluxograma dos cálculos referentes ao resfriamento em água, pelo método da capacitância global**

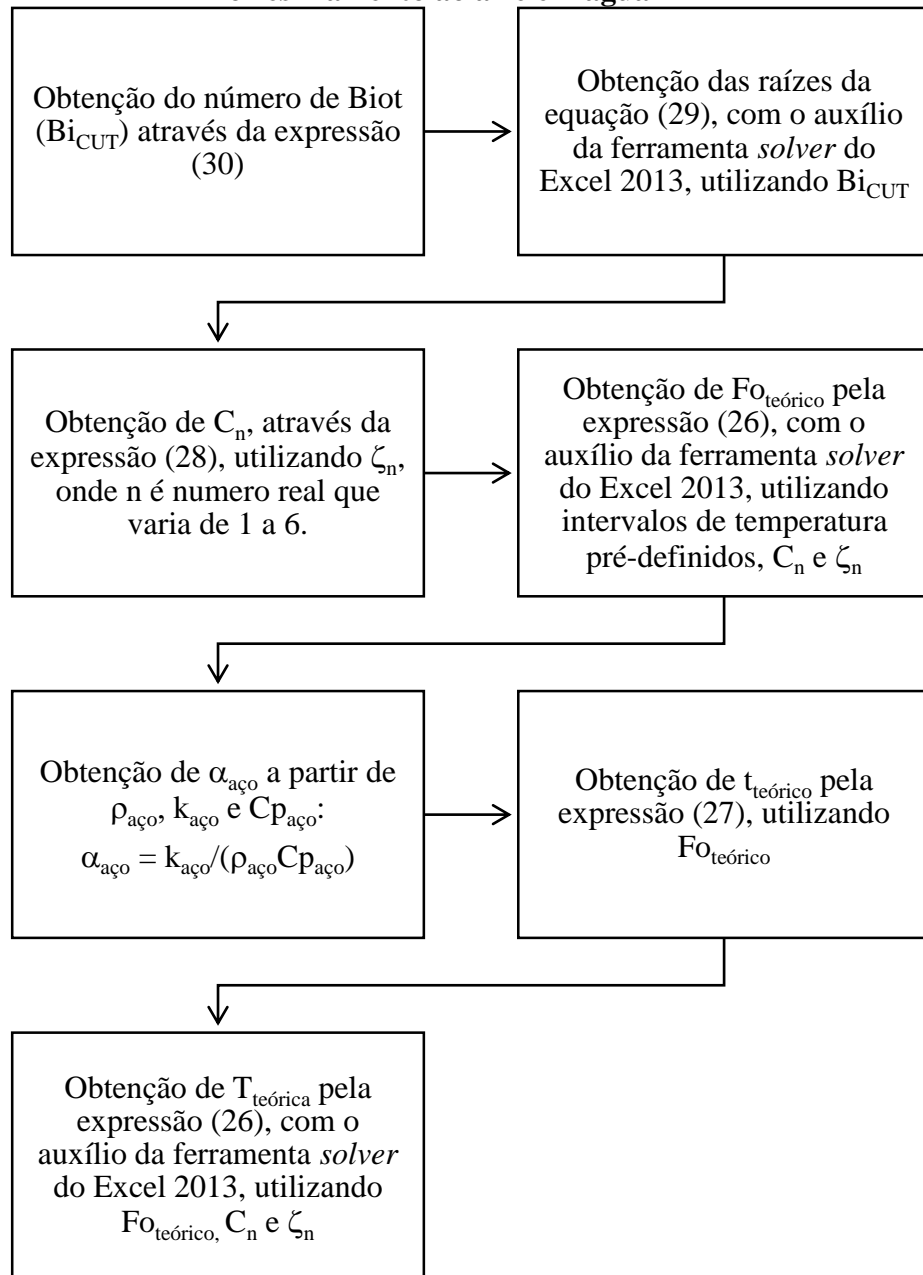


Fonte: Própria autora

#### 4.3.5 Condução unidimensional transiente para o resfriamento ao ar e em água

Os cálculos da transferência de calor no resfriamento ao ar e em água pela condução unidimensional transiente estão representados esquematicamente na Figura 20.

**Figura 20 – Fluxograma dos cálculos referentes à condução unidimensional transiente no resfriamento ao ar e em água**



Fonte: Própria autora

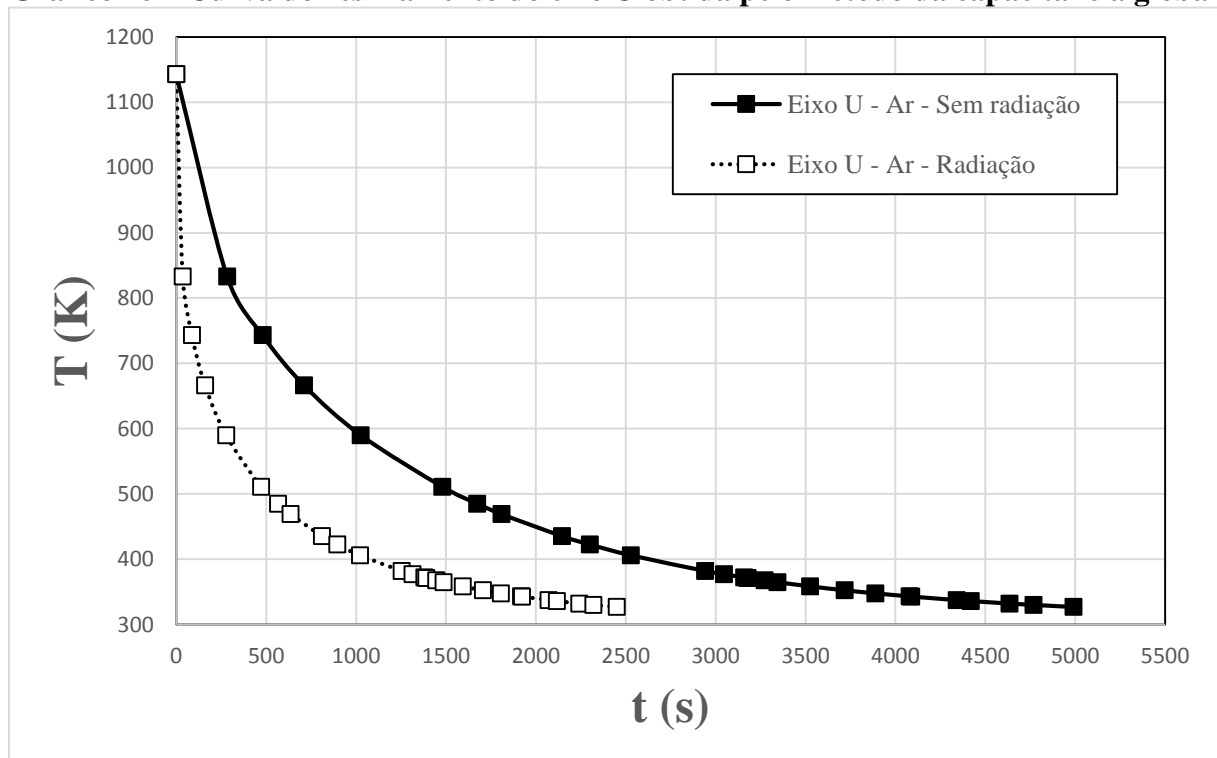
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em virtude das propriedades termofísicas envolvidas nos cálculos da transferência de calor variarem em função da temperatura, tanto no método da capacitância global, quanto na condução unidimensional transiente, foram feitas análises em intervalos de temperatura arbitrários. Os resultados obtidos para cada intervalo de resfriamento foram combinados em uma mesma curva, através da soma do tempo de um intervalo, ao tempo anterior.

### 5.3 Solução analítica pelo método da capacitância global

Para o arrefecimento ao ar, foram obtidas duas curvas de resfriamento para cada eixo: uma referente à transferência de calor por convecção natural externa e a outra referente ao efeito da convecção natural externa somado à radiação térmica. Visto que os três eixos (U, V e W) são do mesmo material e possuem dimensões muito próximas, foram obtidas curvas muito semelhantes. No Gráfico 16 estão representados os resultados dos cálculos para o eixo U.

**Gráfico 16 – Curva do resfriamento do eixo U obtida pelo método da capacitância global**



Fonte: Própria autora

No eixo das ordenadas do Gráfico 16, estão presentes valores de temperatura que variam de 300 K a 1200 K. Esta faixa de temperaturas foi escolhida por abranger a temperatura inicial do

tratamento térmico realizado experimentalmente (1143,15 K) e as temperaturas de início e fim da transformação martensítica para o aço SAE 5150 (de aproximadamente 573,15 K a 373,15 K, conforme a Figura 6).

No eixo das abcissas estão representados valores de tempo de resfriamento, que variam de 0 s a 5500 s. O valor máximo foi escolhido de forma a comportar o tempo total do resfriamento, de 1143,15 K a 325,15 K, para o modelo mais lento, ou seja, o modelo que despreza a transferência de calor por meio do fenômeno da radiação.

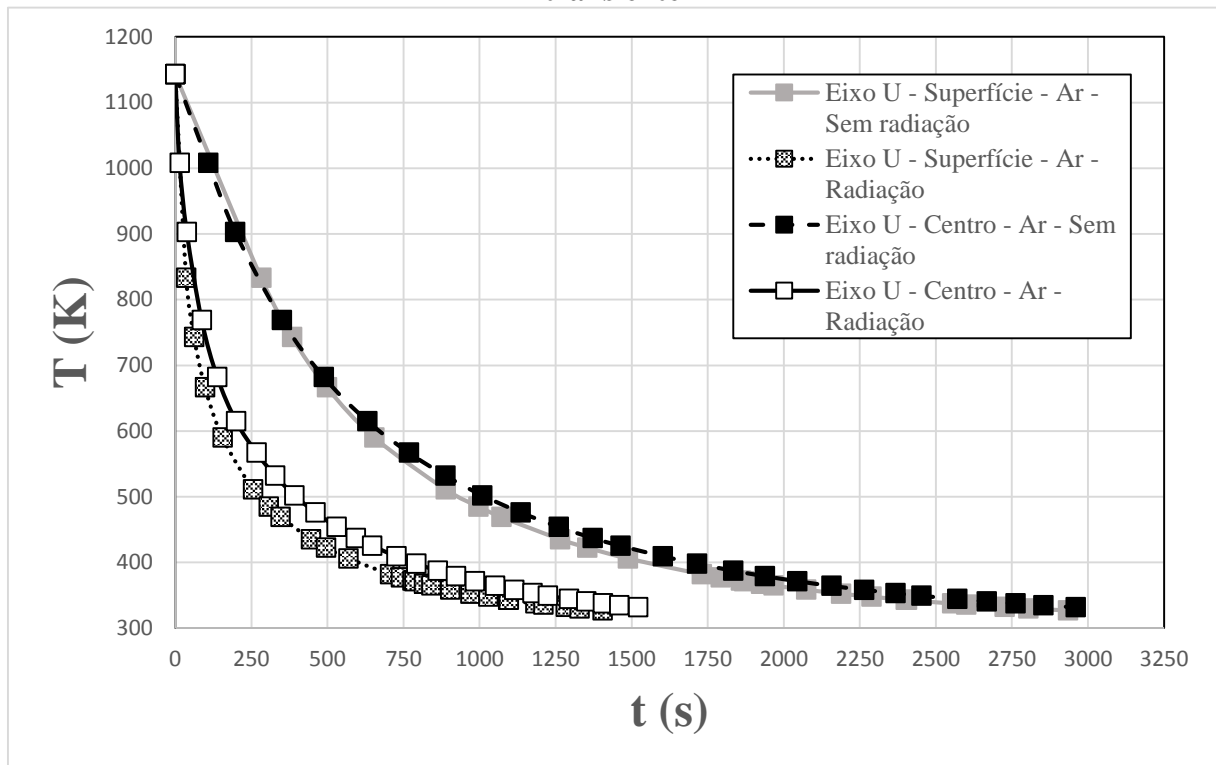
A partir da observação do Gráfico 16 nota-se que a inclusão do coeficiente de transferência de calor por radiação nos cálculos reduz significativamente o tempo de resfriamento. O tempo calculado com base nas transferências de calor por radiação e convecção foi de aproximadamente 49% do tempo calculado levando em conta apenas a convecção natural externa.

Para o resfriamento em água, a análise via método da capacitância global não atendeu aos requisitos de viabilidade determinados por Incropera et al. (2012). Devido ao fato de o coeficiente de transferência de calor em água ser muito elevado, a condição que determina que a transferência de calor no interior do sólido deve ser muito maior do que a transferência de calor do sólido para o meio (número de Biot  $< 0,1$ ), para que a aproximação seja válida, não foi atendida. Portanto, para o resfriamento em água, optou-se pela não inclusão das curvas obtidas pelo método da capacitância global neste trabalho.

#### **5.4 Solução analítica para condução unidimensional transiente**

Os resultados obtidos via condução unidimensional transiente para o resfriamento arrefecimento ao ar dos eixos U, V e W também foram muito semelhantes entre si. No Gráfico 17 são representadas as curvas de resfriamento para o eixo U.

**Gráfico 17 - Curva do resfriamento do eixo U obtida via condução unidimensional transiente**



Fonte: Própria autora

Assim como no gráfico obtido via método da capacitância global, no eixo das ordenadas do Gráfico 17, estão representados valores de temperatura que variam de 300 K a 1200 K.

No eixo das abscissas, por sua vez, estão presentes valores de tempo de resfriamento, que variam de 0 s a 3250 s. O valor máximo foi escolhido de forma a comportar o tempo total do resfriamento, de 1143,15 K a 325,15 K, para o modelo mais lento, ou seja, o modelo que despreza a transferência de calor por meio do fenômeno da radiação.

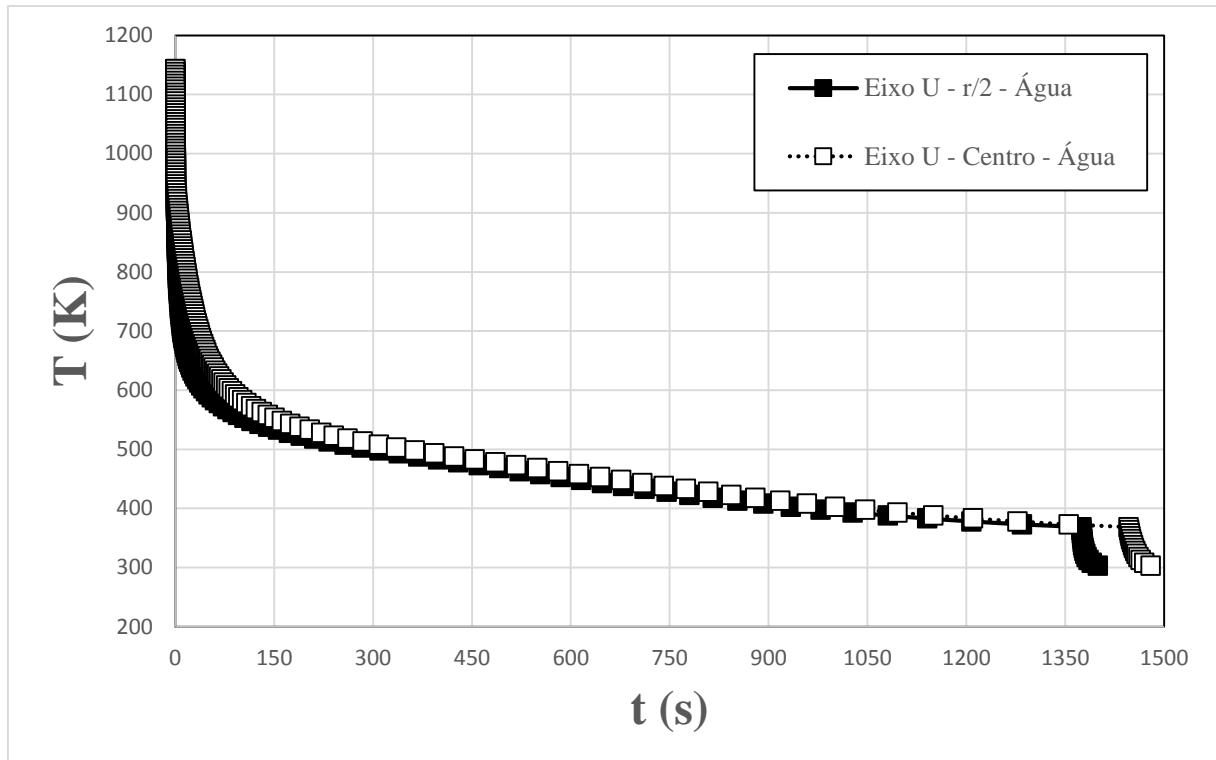
Em virtude do modelo da condução unidimensional transiente não desprezar o gradiente de temperatura no interior do sólido, torna-se possível a análise térmica em diferentes pontos das peças. Na realização deste trabalho, optou-se pela análise em um ponto central e em um ponto na superfície do sólido. Para cada ponto, os cálculos foram feitos com base no coeficiente de transferência de calor por convecção e com base na soma dos coeficientes de transferência de calor por convecção e por radiação, obtendo-se, portanto, um total de quatro curvas para cada eixo.

Através da análise das curvas, observa-se, novamente, que a inclusão do coeficiente de transferência de calor por radiação nos cálculos reduz, em aproximadamente 50%, o tempo de resfriamento. Outro comportamento coerente, observado no Gráfico 17, foi um leve

deslocamento para cima e para a direita das curvas referentes aos centros, em relação as curvas referentes aos pontos superficiais, demonstrando que o resfriamento tende a ser mais lento no centro do que na superfície do metal.

Os resultados obtidos para o resfriamento em água do eixo U são representados no Gráficos 18.

**Gráfico 18 - Curva do resfriamento do eixo U em água obtida via condução unidimensional transiente**



Fonte: Própria autora

Nos eixos das ordenadas do Gráfico 18 estão representados valores de temperatura entre 200 K e 1200 K, uma vez que o resfriamento de interesse para a transformação martensítica está neste intervalo. Aos eixos das abcissas, são atribuídos valores de tempo que variam de 0 s a 1500 s, visto que o tempo total de resfriamento, até a temperatura desejada, está contido neste intervalo.

Devido ao fato de o resfriamento em água ser muito rápido, não foi possível utilizar a aproximação pelos seis primeiros termos da série representada pela expressão (26) para a análise em pontos superficiais. Incropera et al. (2012), alertam que este tipo de aproximação só é válido para valores mínimos do número de Fourier ( $Fo > 0,2$ , para a aproximação pelo primeiro termo da série), ou seja, para tempos de resfriamento que não sejam demasiadamente curtos. Por este motivo, para o resfriamento em água, optou-se pela análise em um ponto central e em um ponto intermediário entre o centro e a superfície da peça.

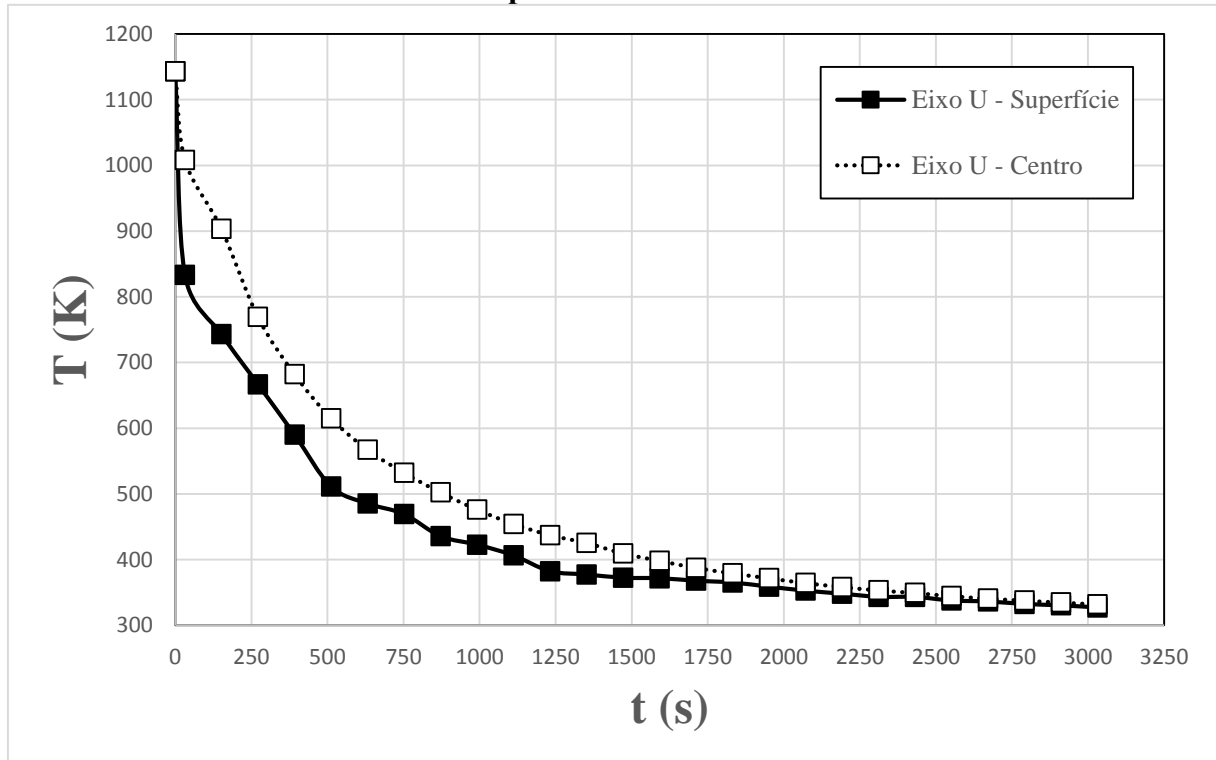


Assim, como no resfriamento ao ar, pela análise do Gráfico 18, é possível perceber que o ponto mais central da peça apresenta um resfriamento mais lento do que o ponto mais próximo ao fluido refrigerante. Nota-se também, uma mudança nas condições de transferência de calor quando a temperatura atinge o ponto de condensação da água: a partir deste momento, a troca de calor é mais intensa.

## 5.5 Resultados experimentais

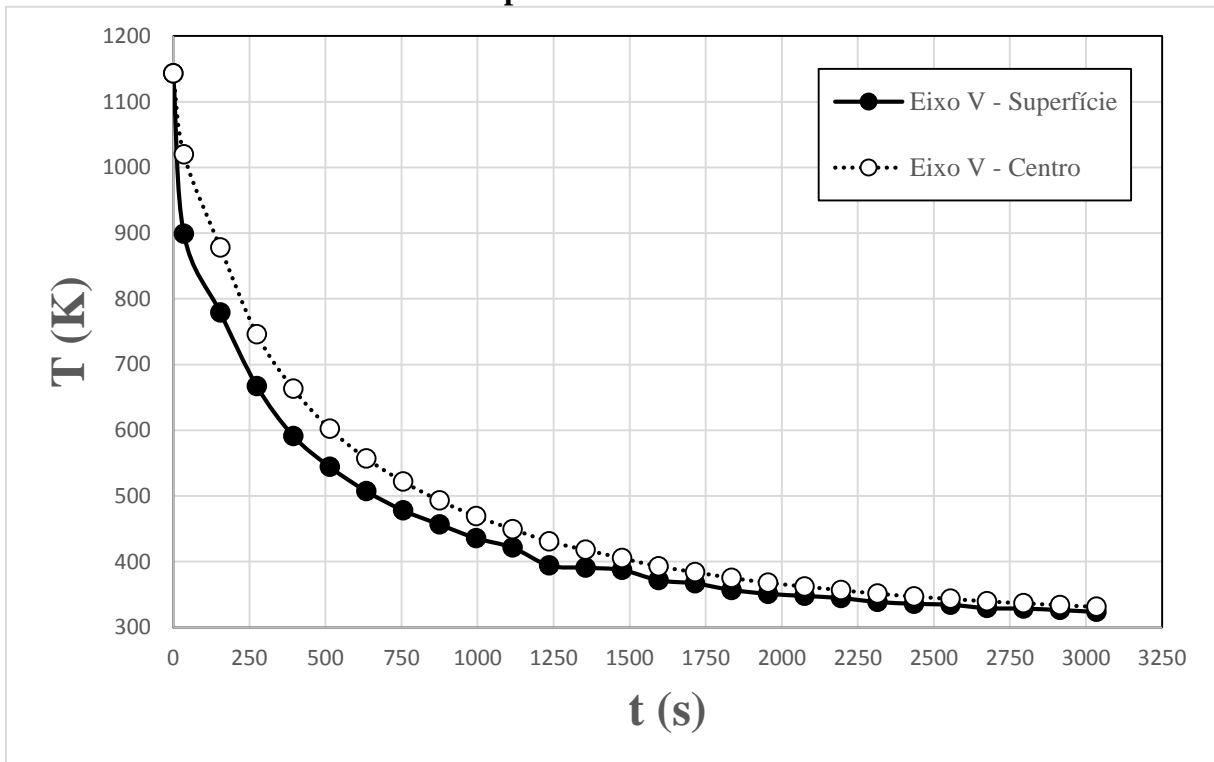
Os resultados experimentais do resfriamento ao ar dos eixos U, V, e W estão representados, respectivamente, nos Gráficos 19, 20 e 21.

**Gráfico 19 – Curva experimental do resfriamento do eixo U**



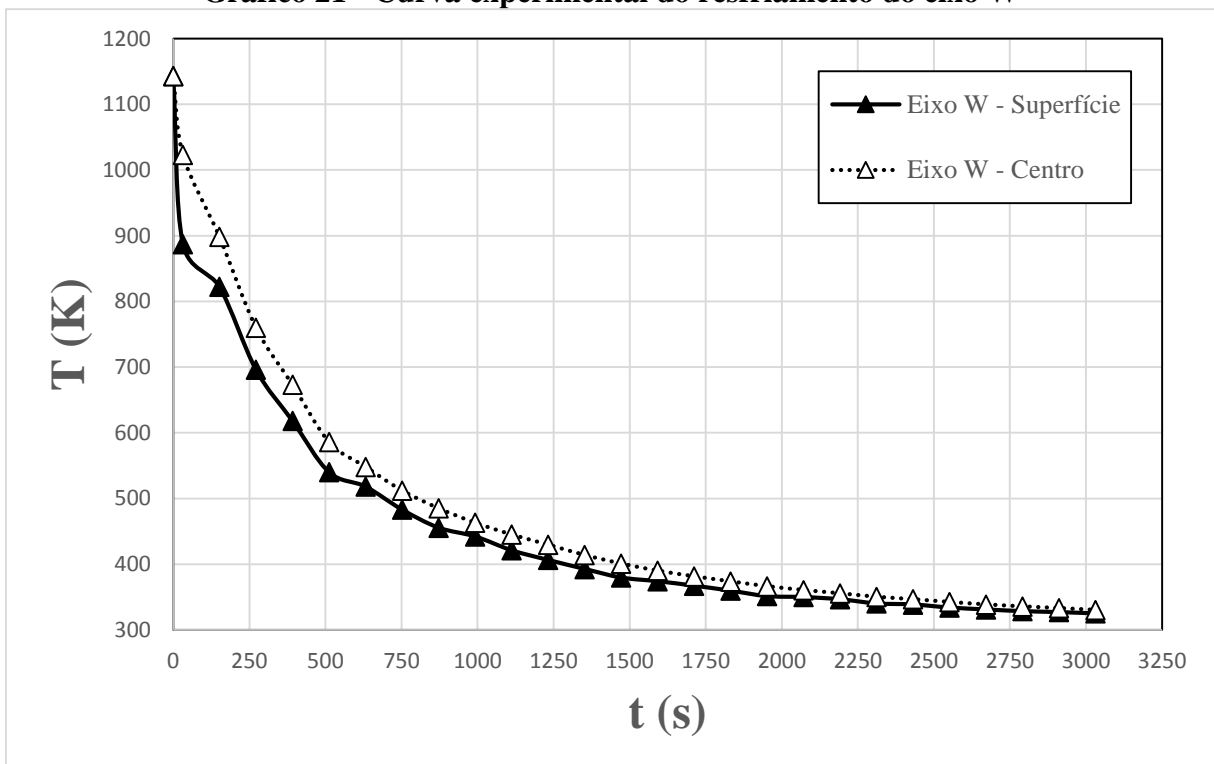
Fonte: Própria autora

Gráfico 20 - Curva experimental do resfriamento do eixo V



Fonte: Própria autora

Gráfico 21 - Curva experimental do resfriamento do eixo W



Fonte: Própria autora

Nos Gráficos 19, 20 e 21 estão representadas as curvas de resfriamento dos eixos U, V e W obtidas de valores experimentais de temperatura (eixo das ordenadas), medidos no centro e na

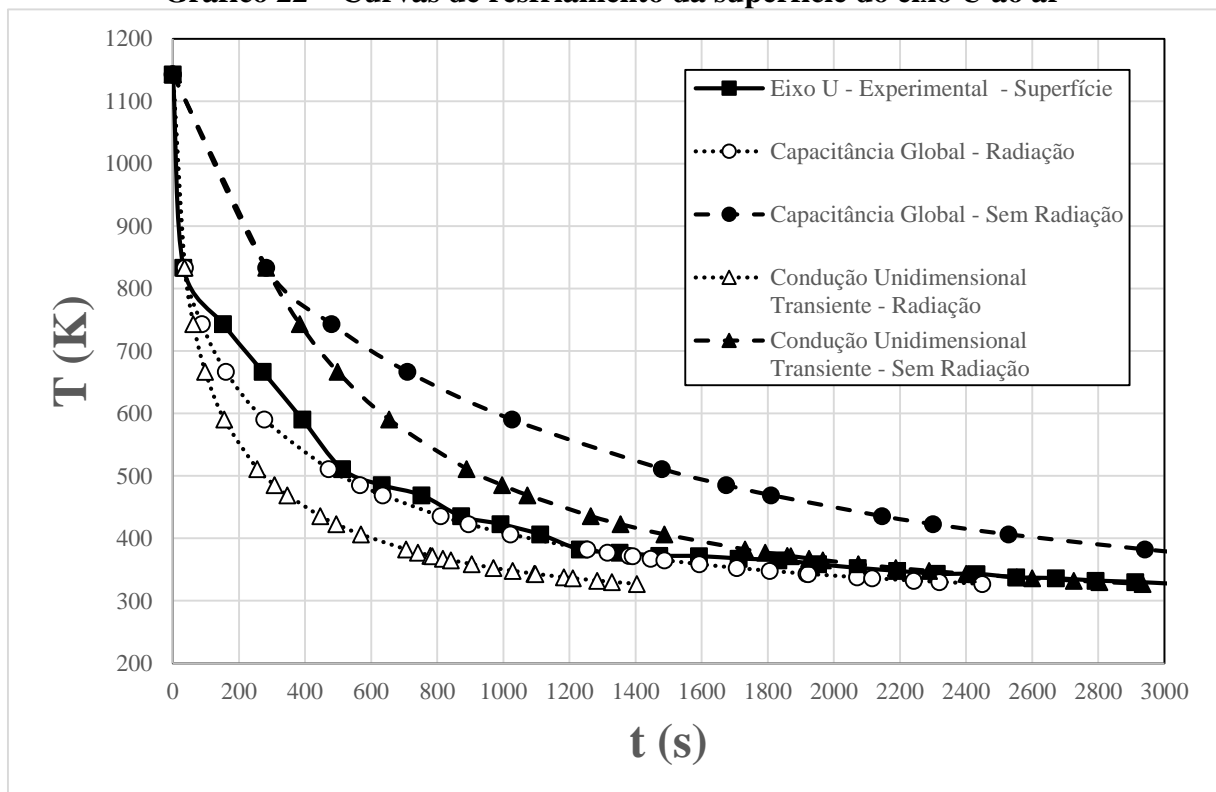
superfície das peças e convertidos para a escala Kelvin, e de tempo, em segundos, (eixo das abcissas).

Assim como na análise teórica, na análise experimental, os três eixos tiveram comportamentos semelhantes entre si, dada a sua similaridades material e geométrica. Em ambos os casos, é possível perceber que, passado o mesmo intervalo de tempo, a temperatura no centro da peça é maior do que a exibida na superfície da mesma, ou seja, o resfriamento é mais intenso na superfície do que no interior do sólido.

## 5.6 Análise comparativa de resultados

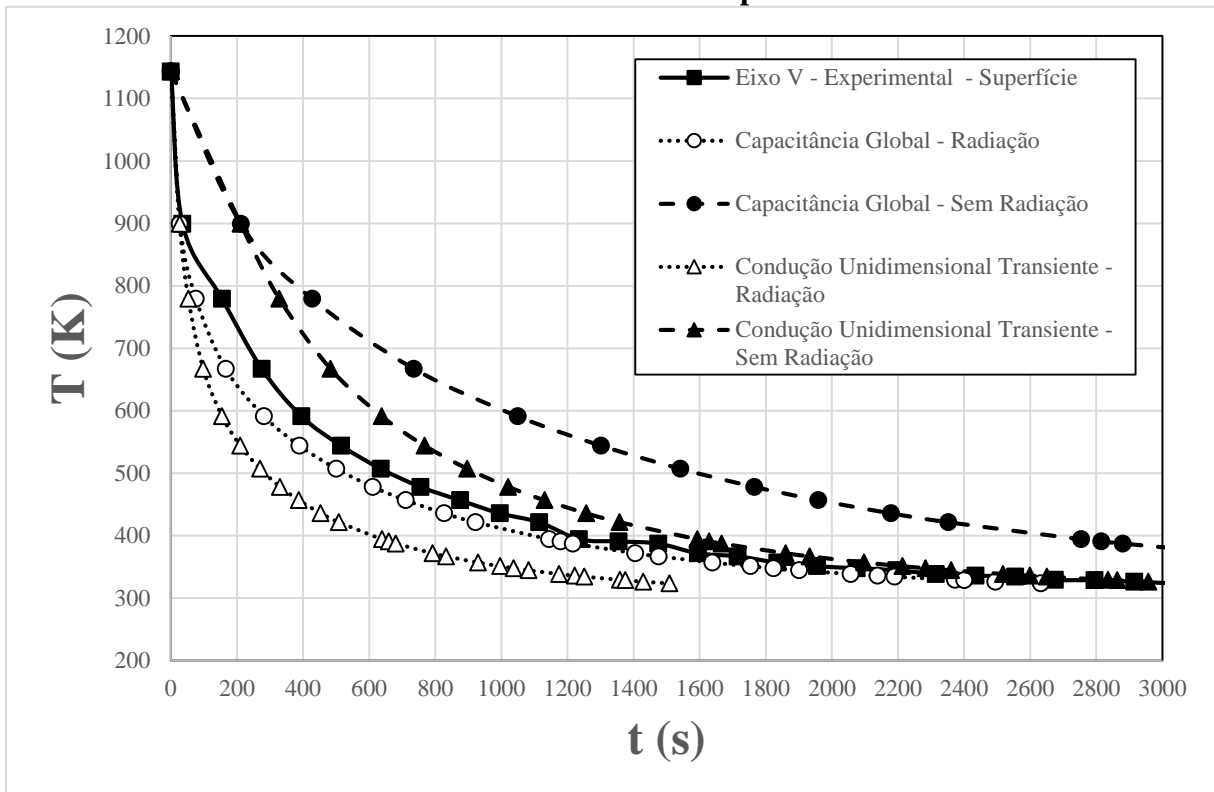
As curvas de resfriamento, ao ar, da superfície do eixos U, V e W estão representadas no Gráficos 22, 23 e 24, respectivamente.

**Gráfico 22 – Curvas de resfriamento da superfície do eixo U ao ar**



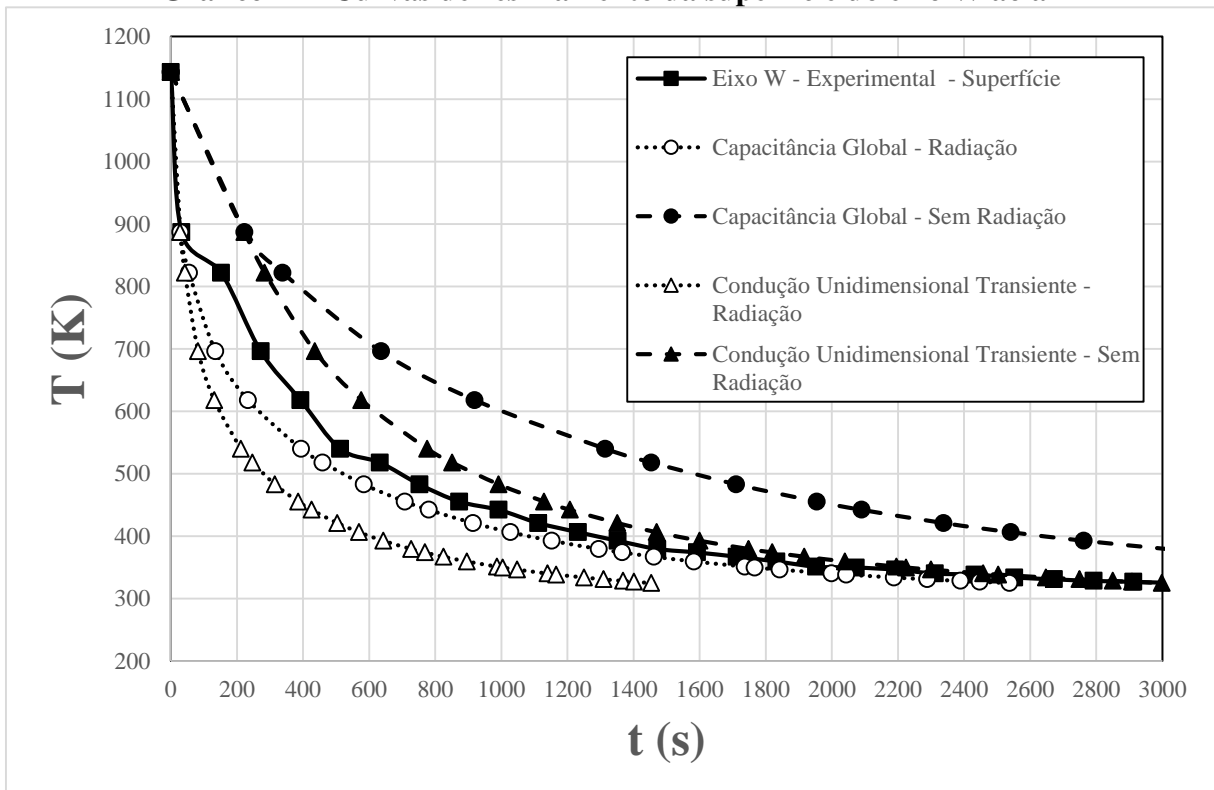
Fonte: Própria autora

Gráfico 23 - Curvas de resfriamento da superfície do eixo V ao ar



Fonte: Própria autora

Gráfico 24 - Curvas de resfriamento da superfície do eixo W ao ar



Fonte: Própria autora

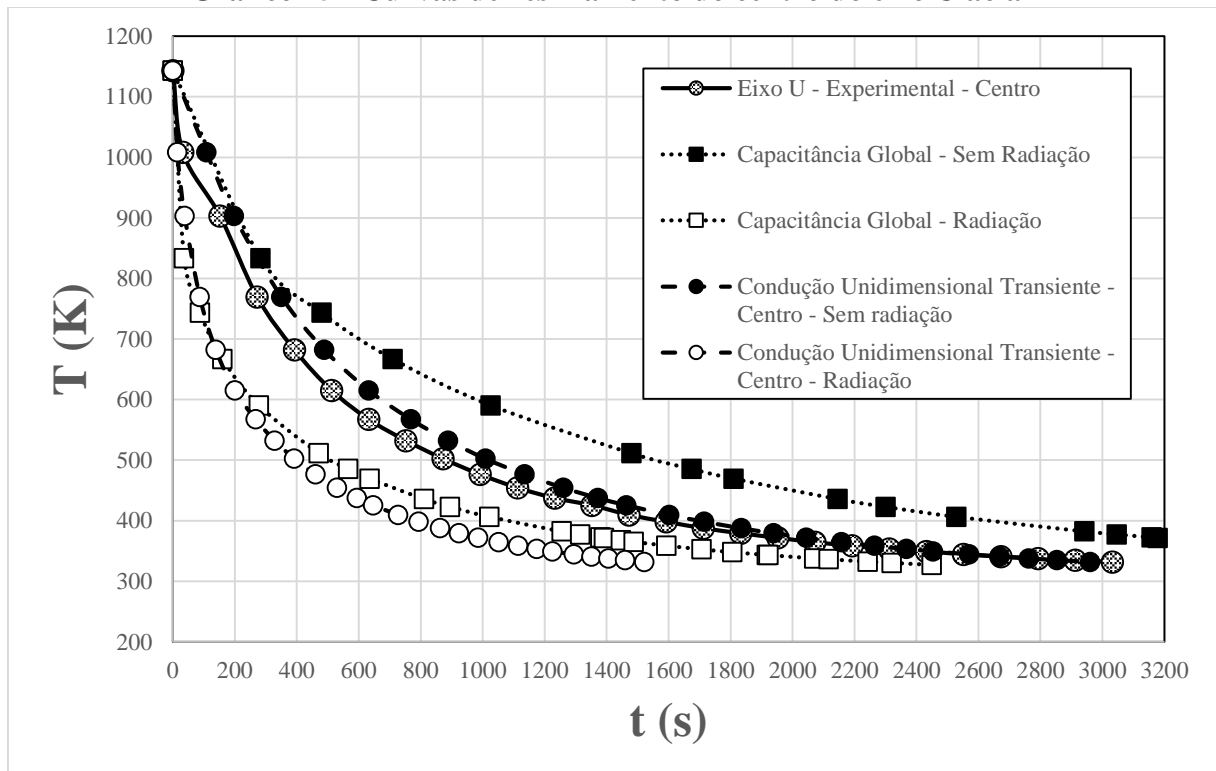
Nos eixos das ordenadas dos Gráficos 22, 23 e 24 estão representados valores de temperatura que variam de 200 K a 1200 K, faixa na qual estão inseridas as temperaturas de maior interesse

no processo de têmpera. Nos eixos das abcissas, estão presentes valores de tempo que variam de 0 s a 3000 s. O tempo de 3000 s foi escolhido como tempo máximo, de forma a priorizar a visualização dentro dos intervalos de resfriamento experimentais, uma vez que o objetivo é comparar os métodos analíticos às curvas experimentais.

A partir da observação dos gráficos, nota-se que o método capacitância global que levou em conta a transferência de calor por convecção e por radiação foi o que mais se aproximou do resultado experimental, seguido pelo método da condução unidimensional transiente que desprezou o fenômeno da radiação.

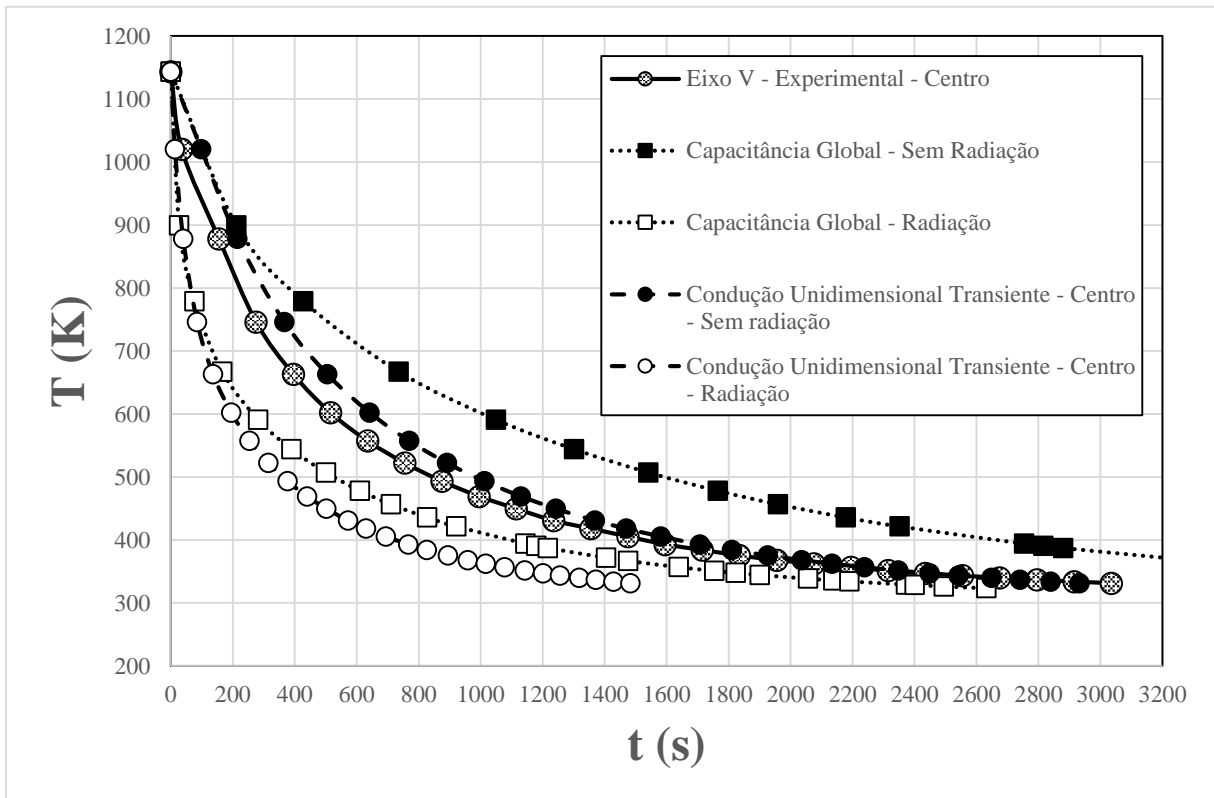
As curvas de resfriamento ao ar, referentes aos pontos centrais dos eixos U, V e W, estão representadas nos Gráficos 25, 26 e 27, respectivamente.

**Gráfico 25 - Curvas de resfriamento do centro do eixo U ao ar**



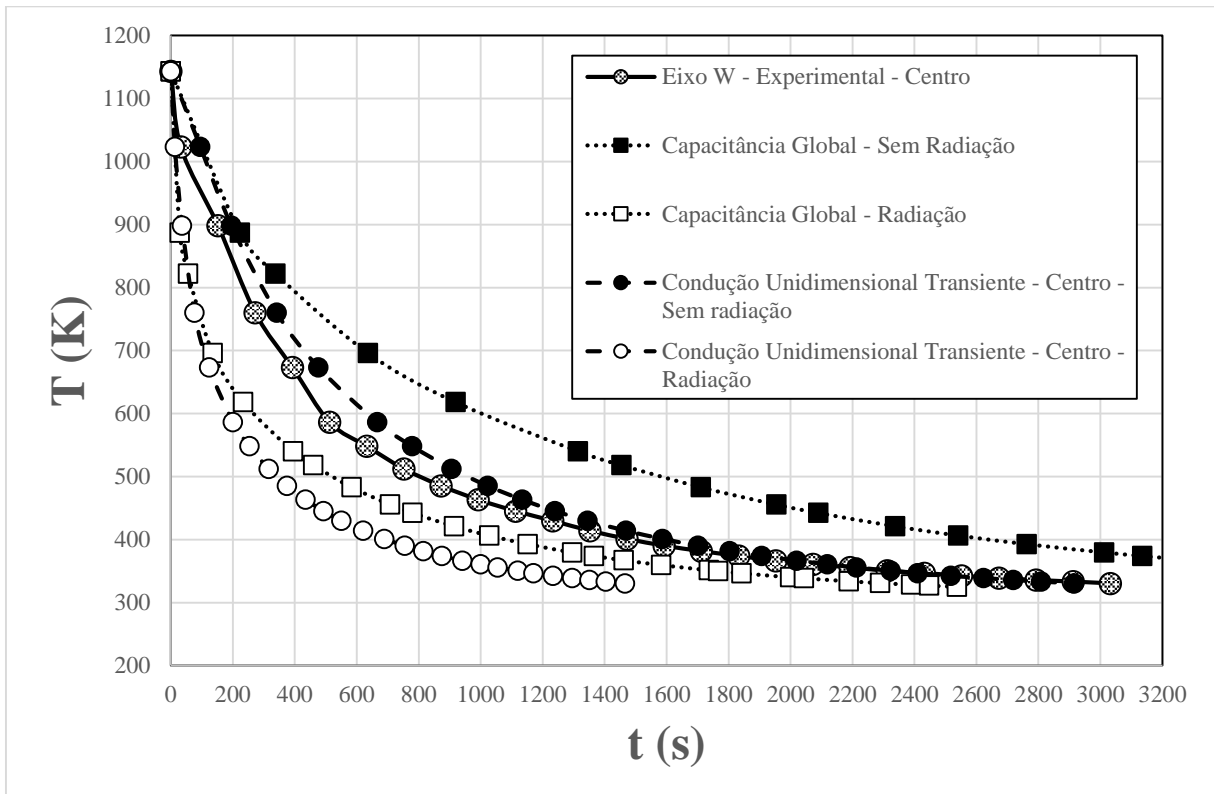
Fonte: Própria autora

Gráfico 26 - Curvas de resfriamento do centro do eixo V ao ar



Fonte: Própria autora

Gráfico 27 - Curvas de resfriamento do centro do eixo V ao ar



Fonte: Própria autora

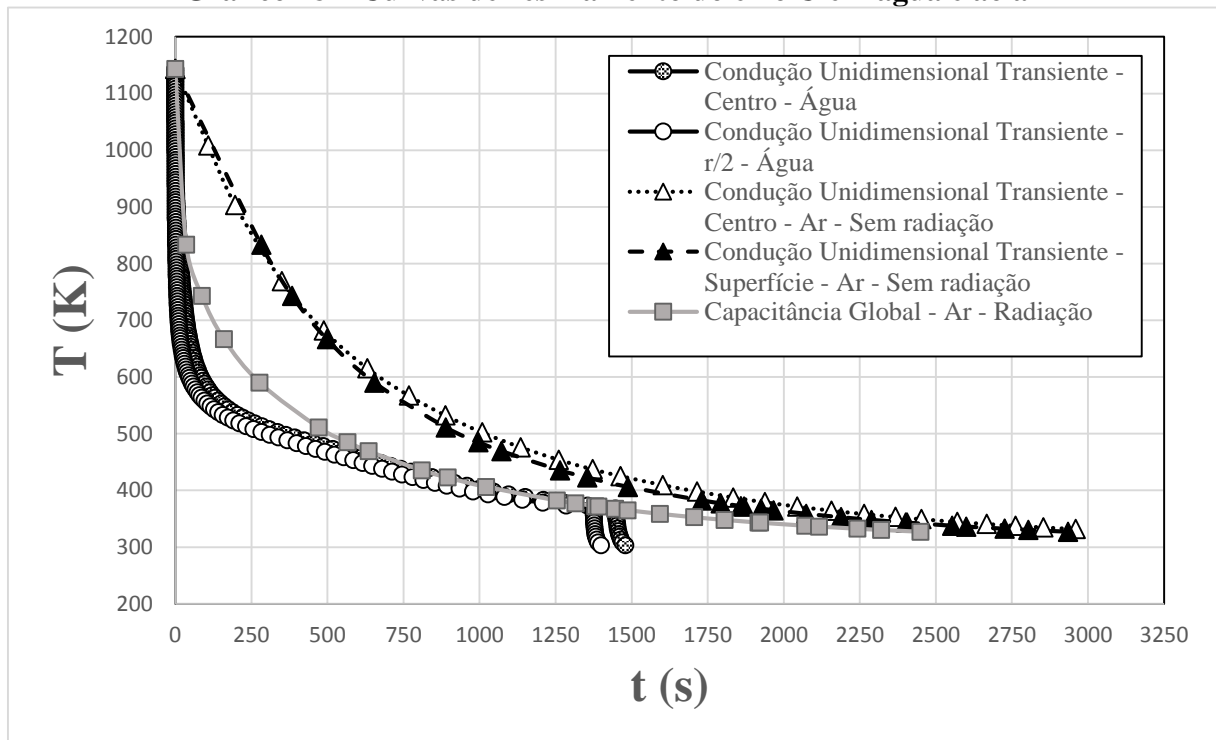
Assim como nos gráficos de resfriamento da superfície, nos Gráficos 25, 26 e 27, os eixos das ordenadas representam valores de temperatura que variam de 0 K a 1200 K. Nos eixos das abcissas, em adequação aos valores experimentais, estão presentes valores de tempo entre 0 s e 3200 s.

Nos três gráficos (25, 26 e 27) é possível observar que o método da condução unidimensional transiente que despreza o efeito da radiação térmica no resfriamento foi o mais próximo da curva experimental, seguido do método da capacitância global que leva em conta tanto a convecção natural externa, quanto a radiação.

Para efeito de comparação, as curvas de resfriamento mais próximas das experimentais para o arrefecimento ao ar foram colocadas ao lado das curvas calculadas para o resfriamento em água.

No Gráfico 28 estão representadas as curvas de resfriamento para o eixo U.

**Gráfico 28 – Curvas de resfriamento do eixo U em água e ao ar**

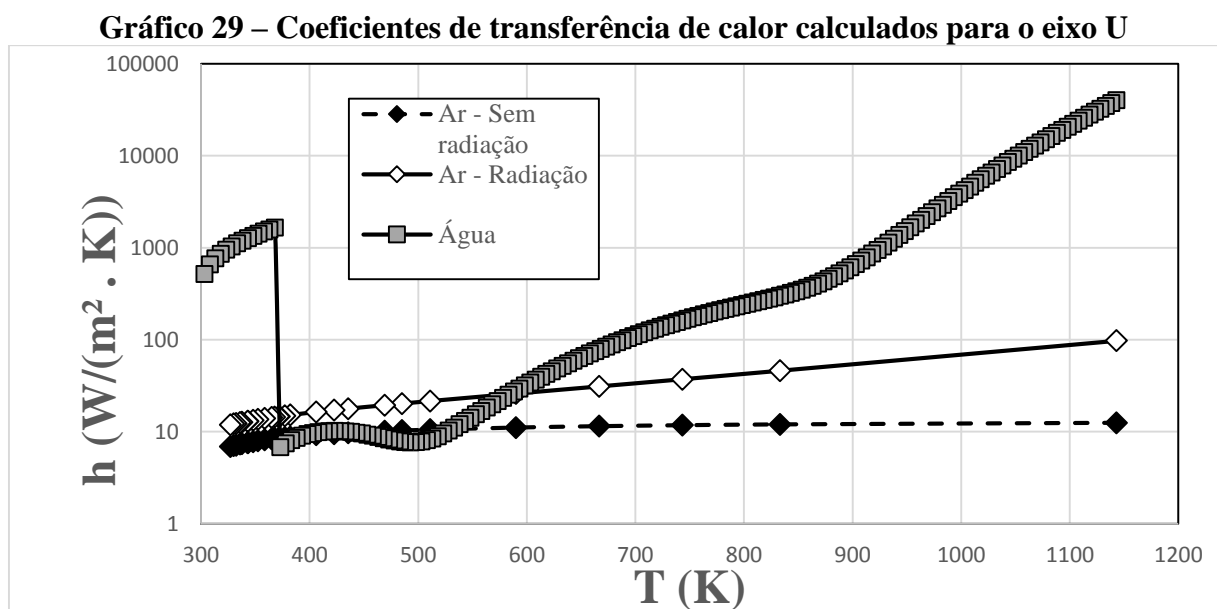


Fonte: Própria autora

No eixo das ordenadas do Gráfico 28 estão os valores de temperatura de 200 K a 1200 K. Já nos eixos das abcissas, estão representados valores de tempo de 0 s a 3250 s. Através da análise das curvas, percebe-se que o resfriamento em água leva cerca da metade do tempo do resfriamento ao ar. Outro detalhe importante que pode ser observado, é o fato de a queda de temperatura ser mais brusca nos primeiros segundos para o resfriamento em água do que para o arrefecimento ao ar. Sabe-se que estes primeiros momentos são os mais importantes no

processo de têmpera, uma vez que, com o passar do tempo, o processo difusional da formação perlítica torna-se mais expressivo, impedindo a transformação martensítica.

Além das curvas de resfriamento, outro importante indicativo da intensidade da transferência de calor é o coeficiente de transferência de calor. Portanto, optou-se pela representação destes valores para as diferentes condições adotadas. No eixo das ordenadas do Gráfico 29 são representados os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção (em ar e em água) e dos coeficientes de transferência de calor por radiação somados aos coeficientes convectivos (arrefecimento ao ar). Nos eixos das abcissas estão as temperaturas absolutas às quais os valores de  $h$ , em  $W/(m^2 \cdot K)$ , estão relacionados.



Fonte: Própria autora

Pela análise do Gráfico 29, percebe-se que o coeficiente de transferência de calor em água é muito maior do que o coeficiente de transferência de calor ao ar, para uma ampla faixa de temperaturas. O fato de  $h$  em água não ser maior do que o  $h$  em ar para todas as temperaturas, possivelmente está ligado a uma limitação da forma como foi abordada a transferência de calor em água neste trabalho. Por se tratar de uma análise mais simplificada, e pela escassez, na literatura, de propriedades termofísicas determinadas para temperaturas tão altas, foram desprezados o efeito da radiação e o calor latente de transformação de água líquida em vapor de água. Tanto um, quanto o outro, possivelmente elevaria o coeficiente de transferência de calor do resfriamento em água, fazendo-o superar, em todas as temperaturas, o correspondente coeficiente para o arrefecimento ao ar.



## 6 CONCLUSÕES

Para o resfriamento do eixo de aço ao ar, o método da capacitância global foi o que melhor se aproximou dos valores medidos. O método da condução unidimensional transiente descreveu uma queda de temperatura mais pronunciada do que a observada experimentalmente, e só aproximou-se do resultado experimental quando o efeito da radiação foi desprezado. Pelos resultados obtidos, conclui-se que, para os aços que possam ser temperados ao ar, dos modelos apresentados neste trabalho, a capacitância global é o mais adequado para a análise do resfriamento.

Contudo, a maior parte dos aços comerciais exige rápidas taxas de resfriamento para a ocorrência da transformação martensítica, tornando necessário o uso da água ou de outros meios líquidos na têmpera. O método da capacitância global mostrou-se inadequado para a análise do arrefecimento dos eixos de aço em água no processo de têmpera. Provavelmente, a possibilidade de aplicação deste método para o resfriamento em água, seria ainda mais remota caso fosse considerada a transferência de calor por ebulição (que também considera o calor latente de transformação de fase e a radiação no filme de vapor).

A solução aproximada do método da condução unidimensional transiente, também encontrou limitações para sua aplicação no resfriamento em água. Na superfície e nas regiões mais externas do cilindro, a aproximação pelos seis primeiros termos da série que representa a solução exata da condução unidimensional transiente foi ineficaz, visto que o número de Fourier é demasiadamente pequeno nestes pontos. Entretanto, o método pode encontrar aplicações úteis na prática industrial, uma vez que é aplicável ao centro do cilindro, ou seja, à região em que a transformação martensítica é mais difícil.

## **7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se a análise experimental do resfriamento de um eixo de aço em água e uma aproximação maior na solução do método da condução unidimensional transiente.

## REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook: heat treating**. 10th ed. [Materials Park, OH], 1991. v. 4.

\_\_\_\_\_. **ASM handbook: properties and selection: irons steels and high performance alloys**. 10th ed. [Materials Park, OH], 1990. v. 1.

\_\_\_\_\_. **Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams**. Materials Park, OH, 1997.

ATKINS, M. **Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels**. Metals Park: American Society for Metals, 1980. Revisão da edição estadunidense.

BUCZEK, A.; TELEJKO, T. Inverse determination of boundary conditions during boiling water heat transfer in quenching operation. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], p. 1324-1329, 2004.

BUCZEK, A.; TELEJKO, T. Investigation of heat transfer coefficient during quenching in various cooling agents. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, [S. l.], v. 44, p. 358-354, Aug. 2013.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, c2007.

CARNEGIE-ILLINOIS STEEL CORPORATION. **U.S.S. Carilloy Steels**. New York: United States Steel, 1938.

CARON, E. J. F. R.; DAUN, K. J.; WELLS, M. A. Experimental heat transfer coefficient measurements during hot forming die quenching of boron steel at high temperatures. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 71, p. 396-404, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.039>>. Acesso em: 7 dez. 2016.

CASARIN, S. J. **Caracterização da temperabilidade de um aço C-Mn microligado ao boro, através da dilatometria e curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo**. 1996. 181 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986a. v. 3.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986b. v. 2.

- FARAHANI, S. D.; KOWSARY, F.; JAMALI, J. Direct estimation of local convective boiling heat transfer coefficient in mini-channel by using conjugated gradient method with adjoint equation. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Tehran, Iran, v. 55, p. 1-7, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.03.004>>. Acesso em 24 ago. 2017.
- GOMEZ, M. et al. Phase transformation under continuous cooling conditions in medium carbon microalloyed steels. **Journal of Materials Science & Technology**, [S. l.], v. 30, p. 511-516, Apr. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2014.03.015>>. Acesso em: 24 ago. 2017.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 643 p. Tradução de: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed.
- KRAUSS, George. **Steels: processing, structure, and performance**. [Materials Park, OH]: ASM International, 2005.
- MACKENZIE, D. S. History of quenching. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, [S. l.], p. 68-73, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/174951508X358437>>. Acesso em: 28 nov. 2017.
- MASSON, Philippe Le et al. A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical “Jominy end-quench” test. **International Journal of Thermal Sciences**, [S. l.], v. 41, p. 517-527, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(02\)01345-5](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(02)01345-5)>. Acesso em: 8 ago. 2017.
- SENGUPTA, J.; THOMAS, B. G.; WELLS, M. A. The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [S. l.], v. 36A, p. 187-204, 2005. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-005-0151-y>>. Acesso em: 7 dez. 2016.
- SILVA, A. L. da C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.
- SILVA, M. J.; ZDANSKI, P. S. B.; VAZ JÚNIOR, M. Forced convection on grey cast iron plate-fins: prediction of the heat transfer coefficient. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 81, p. 1-7, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.11.007>>. Acesso em: 24 ago. 2017.
- THELNING, Karl-Erik. **Steel and its heat treatment: bofors handbook**. [S. l.]: Butterworths, c1967. 584 p.
- VANPAEMEL, J. History of the hardening of steel: science and technology. **Journal de Physique Colloques**, [S. l.], p. 847-854, 1982. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00222126>>. Acesso em: 28 nov. 2017.
- VANSANT, James H. **Conduction heat transfer solutions**. Livermore, CA: University of California, 1983.

VELHO, H. F. de C. **Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [2001]. Notas do mini-curso apresentado durante o IV Encontro de Modelagem Computacional em Nova Friburgo (RJ), promovido pelo IPRJ-UERJ. Disponível em: <<http://www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

ZHANG, Z.; FARRAR, R. A. **An atlas of continuous cooling transformation (CCT) diagrams applicable to low carbon low alloy weld metals.** London: The Institute of Materials, 1995.