

LUCAS SONEGO FERNANDES

SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO A AR DE ARAME EM UMA LINHA DE  
GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA

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

Orientador: Prof. Dr. Francis H. R. França

Porto Alegre  
2010



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO A AR DE ARAME EM UMA LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA**

**LUCAS SONEGO FERNANDES**

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

Prof. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. PAULO OTTO BEYER  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. HORÁCIO ANTÔNIO VIELMO  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. SÉRGIO LUIZ FREY  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2010

de modo especial, a Deus, que me deu sabedoria  
no uso do conhecimento adquirido

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de obtenção deste título e formação acadêmica.

Ao meu orientador Prof Dr. Francis H. R. França pelo conhecimento transmitido, pela dedicação, orientação e condução do trabalho.

Aos meus pais Paulo Sérgio e Rosimere que me passaram o conhecimento mais valioso e que mudou a minha vida.

Aos meus irmãos Sérgio e Natália pela compreensão e pelas discussões sadias entre medicina e engenharia mecânica.

A minha namorada Carolina que mesmo longe sempre esteve ao meu lado com muito amor e me apoiou nas decisões tomadas, sendo o ponto de apoio nos momentos difíceis do curso.

Ao meu amigo Tiago pelo apoio e auxílio dedicado no trabalho.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, que me acompanharam em todos esses anos, pelo imenso aprendizado profissional.

“Não seja sábio aos seus próprios  
olhos; Tema o Senhor e  
evite o mal. Isso lhe dará  
saúde ao corpo e vigor aos ossos”

Provérbios 3.7-8

FERNANDES, L. S. **Simulação do resfriamento a ar de arame em uma linha de galvanização contínua**. 2010. 23j. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **RESUMO**

Neste trabalho, apresenta-se uma simulação do resfriamento a ar de arame na indústria para a estabilização das propriedades mecânicas finais do material, impedindo assim o endurecimento por precipitação. Antes de ser galvanizado, o arame necessita passar pelo recozimento, a fim de remover o encruamento decorrente da trefilação e se tornar adequado às exigências de resistência à tração e de ductilidade. Uma análise da troca térmica do arame saindo da cuba de recozimento com o ar atmosférico e ventilação forçada é apresentada. A metodologia empregada tem como base as equações de transferência de calor, que servem de alicerce para a elaboração de uma simulação computacional capaz de contemplar a velocidade da linha de galvanização. Inclusão de ventilação forçada e alteração da velocidade de produção são apresentados como solução do problema.

**PALAVRAS-CHAVES:** Resfriamento a ar, arame, simulação computacional, transferência de calor.

FERNANDES, L. S. **Simulation of wire air cooling in a continuous galvanizing line**. 2010. 23j. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **ABSTRACT**

This paper presents a wire air cooling simulation in the industry for the final mechanical properties stabilization avoiding precipitation hardening. Before being galvanized, the wire needs to pass through an annealing in order to reduce its strain hardening by wire drawing process and becomes adequate according to the clients requirements of tensile strength and ductility. A heat exchange analysis between the wire leaving the annealing bath and the air flow is done. The employed methodology is based on heat transfer equations, which serve as foundation for the elaboration of a computational simulation capable of contemplating the galvanizing line speed and forced ventilation. Inclusion of forced ventilation and changing the production speed are presented as the problem solution.

**KEYWORDS:** Air cooling, Wire, Computational simulation, Heat transfer

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. DESENVOLVIMENTO .....	1
2.1. Revisão Bibliográfica .....	1
2.1.1 Endurecimento por precipitação .....	1
2.1.2 Método da capacitância concentrada.....	2
2.1.3 Método de diferenças finitas.....	2
2.2. Apresentação do Problema.....	3
2.3. Metodologia .....	5
2.3.1. Análise da transferência de calor no arame .....	6
2.3.2. Condução térmica no resfriamento do arame .....	7
2.3.3. Convecção no resfriamento do arame .....	7
2.3.4. Radiação no resfriamento do arame .....	10
2.3.5. Advecção no resfriamento do arame .....	11
2.3.6. Equação geral do problema .....	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	11
3.1. Validade do método da capacitância concentrada.....	13
3.2. Convecção combinada livre e forçada.....	13
3.3. Convergência do modelo .....	14
3.4. Validação do modelo .....	14
3.5. Condição atual da linha de galvanização .....	15
3.6. Variação da velocidade do arame.....	15
3.7. Adição de ventiladores no resfriamento .....	15
3.8. Efeito dos ventiladores com a variação da velocidade do arame .....	15
3.9. Efeito da temperatura ambiente no resfriamento do arame .....	15
3.10. Conclusões .....	15

REFERÊNCIAS .....	16
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....	16
APÊNDICES .....	17
ANEXOS .....	19

## **1. INTRODUÇÃO**

O resfriamento do arame é uma etapa muito importante no processo de galvanização por imersão e não pode ser caracterizado, simplesmente, pela redução de temperatura. Tanto para as etapas posteriores ao resfriamento no processo de zincagem bem como para a resistência de ruptura à tração do arame, a taxa de resfriamento é um parâmetro que está diretamente ligado às restrições impostas pelos clientes. Dependendo do processo posterior à galvanização, a ductilidade e o limite de resistência à ruptura são propriedades fundamentais, que precisam ser satisfeitas e estar dentro dos limites impostos pelas etapas seguintes. O controle dessa taxa de resfriamento torna-se uma ferramenta muito útil no controle do processo de zincagem e é o foco do presente trabalho.

O abastecimento da linha de galvanização é feito pelas máquinas de trefila, onde o fio-máquina, oriundo das laminações, tem seu diâmetro reduzido pelo processo de conformação a frio com o uso de fieiras ou cassetes. Devido à redução da seção do arame e a conseqüente elevação da temperatura do trefilado, há um alongamento dos grãos, gerando um aumento no limite de resistência à tração e, com isso, uma redução da ductilidade. Dependendo da aplicação dos trefilados, essa elevação da resistência de ruptura à tração e diminuição da ductilidade impossibilita qualquer trabalho manual ou até mesmo mecanizado, seja na construção civil, na fabricação de telas, na farparia. Isso faz com que os arames necessitem de um recozimento, a fim de amenizar as propriedades alteradas no processo de trefilação. O resfriamento deve proporcionar ao arame as condições necessárias para que não haja uma perda de calor tão acelerada que possibilite a ocorrência do endurecimento por precipitação, gerando um descontrole nas propriedades mecânicas do material.

Uma linha de zincagem com parâmetros desconhecidos não consegue alcançar a estabilidade necessária para garantir aos clientes as propriedades desejadas. Por isso, a realização de testes é indispensável, apesar de ocupar espaço de produção e aumentar os custos do processo.

O principal objetivo deste trabalho é criar um modelo de transferência de calor para o cálculo da taxa de resfriamento, para conhecer a temperatura do arame no momento em que este atinge a etapa de refrigeração à água, que é o ponto mais crítico desse processo térmico. Assim, os testes na linha de galvanização terão como base os resultados do modelo.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

O cálculo transiente da transferência de calor no arame após o seu recozimento obriga a atenção a uma série de fatores que são indispensáveis no modelo térmico-matemático. Propriedades térmicas do aço, condições da superfície, velocidade da linha de produção e temperatura ambiente são exemplos de dados que podem alterar os resultados e acarretar em custos e perdas na produção se o modelo for efetivamente utilizado.

### **2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1.1 Endurecimento por precipitação**

Um fenômeno que pode afetar as propriedades mecânicas finais dos arames em uma linha de galvanização contínua é o endurecimento por precipitação ou também chamado de envelhecimento por precipitação. Segundo TOMAZELLI (1986), o arame recozido resfriado bruscamente na água não tem tempo suficiente para que ocorra a difusão dos átomos de carbono. Com isso, a liga se encontra numa situação instável, fora do equilíbrio. Portanto, ocorre a formação e o crescimento de núcleos precipitados, apresentando uma estrutura chamada de carboneto  $\epsilon$ , extremamente endurecedora. Sua precipitação resulta no

endurecimento da matriz ferrítica, elevando a resistência à tração e diminuindo a capacidade de alongamento do arame. Assim, após alguns dias, a resistência à tração será maior do que logo após a galvanização do arame. Em suma, quanto mais alta a temperatura do arame na entrada da água, maior o número de precipitados e maior a dureza final (resistência de ruptura à tração).

Finalmente, segundo TOMAZELLI (1986), a 350°C, a separação entre um átomo e outro do carbono é três vezes maior que à temperatura de recozimento e a partir de 400°C inicia um aumento acentuado da separação atômica. Pode-se dizer então que se o arame entrar no tanque de refrigeração à água a no máximo 350°C, o fenômeno do endurecimento por precipitação é bloqueado definitivamente.

### 2.1.2 Método da capacitância concentrada

Dos métodos de abordagem em problemas transientes com transferência de calor, existem dois importantes: capacitância concentrada e efeitos espaciais. O primeiro deles despreza a variação de temperatura no interior do sólido, ou seja, no caso deste trabalho, o arame não teria variação de temperatura na sua seção transversal. Já o método dos efeitos espaciais, por sua vez, considera o gradiente térmico no interior do sólido.

Em análises unidimensionais, pode-se considerar a temperatura como uniforme na seção do arame em qualquer instante durante o processo transiente, dependendo das condições do problema. Mesmo que essa condição não seja satisfeita na realidade, se a resistência térmica entre o sólido e sua vizinhança for grande, comparada com a resistência à condução no seu interior, têm-se resultados bem aproximados (INCROPERA; DEWITT, 2002).

O parâmetro que serve de critério para a utilização desse método é o número adimensional de Biot, que fornece uma medida relativa entre a variação da temperatura no sólido e entre sua vizinhança:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.1)$$

onde  $Bi$  é o número de Biot,  $h$  é o coeficiente de convecção em  $W/m^2K$ ,  $L_c$  é o comprimento característico e  $k$  é a condutividade térmica do material em  $W/m.K$ .

O comprimento característico para cilindros longos é dado pela metade do raio da seção transversal. Para utilização segura do método da capacitância concentrada, deve-se verificar se o número de Biot é menor que 0,1 (INCROPERA; DEWITT, 2002).

### 2.1.3 Método de diferenças finitas

Para problemas estacionários e transientes, as soluções analíticas às vezes são restritas às geometrias e condições de contorno simples. Em alguns casos, os resultados gerados por esses métodos de resolução podem apresentar erros que tornam a análise incapaz de representar a realidade física (MUOJEKWO; POPS, 2000). Para isso, recorre-se aos métodos numéricos. No caso presente neste trabalho, a temperatura do arame não é uniforme ao longo da extensão entre cuba de recozimento e tanque de refrigeração, ou seja, não se pode analisar o arame com um simples cilindro submetido a um escoamento durante alguns segundos. Nessa situação, usa-se o método de aproximação das diferenças finitas, dividindo a extensão do arame em pequenos volumes de controle. A precisão do método pode ser melhorada com o aumento do número de divisões no arame, diminuindo o erro embutido na consideração da temperatura uniforme em cada volume (INCROPERA; DEWITT, 2002). Tanto para o caso

deste trabalho quanto para os casos bi e tridimensionais (transientes e estacionários), o método de diferenças finitas, tem ótima precisão e é indicado como melhor opção em relação ao custo comparado com testes experimentais.

Aplicando o balanço de energia em um volume de controle, pelo método das diferenças finitas se consegue abranger toda a extensão do arame com as mesmas considerações tomadas no primeiro volume.

## 2.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O tema proposto foi escolhido por estar relacionado com um problema enfrentado na rotina de trabalho. Um cliente de arames BWG 18 (Birmingham Wire Gauge 18), com diâmetro de 1,24 milímetros, que fabrica telas com o arame galvanizado comprado da Gerdau Riograndense, registrou uma reclamação após os arames começarem a romper constantemente nas suas máquinas. O limite superior de resistência de ruptura à tração requerido pelo fabricante é de 500 MPa. Se o material possuir um limite de resistência acima desse valor, nas próprias máquinas de telas o arame rompe, ou seja, não suporta o alongamento necessário na confecção das telas, onde o material é alongado devido à forte flexão. Sendo assim, ele rompe por estar mais frágil já que a capacidade de o material se alongar está diretamente ligada a essa propriedade mecânica.

O problema apresentado pelo cliente foi analisado na linha de galvanização, onde o arame é produzido. O resultado dos ensaios de tração dos arames trazidos pelo fabricante de telas e do material produzido na usina mostrou uma grande divergência de valores. Porém, com amostras obtidas direto da linha de galvanização e com o acompanhamento do tempo de estoque, verificou-se que para alguns arames a resistência de ruptura à tração aumentava com o passar dos dias, passando do limite superior de resistência adequado. Notou-se que algumas amostras extrapolaram o limite superior de resistência exigido, comprovando o problema. Diante disso, um fenômeno foi citado como causador do problema: o envelhecimento do arame ou endurecimento por precipitação.

Dependendo da temperatura do arame quando chega ao tanque de resfriamento à água, a resistência de ruptura à tração do arame galvanizado pode aumentar razoavelmente com o passar dos dias, devido à migração de carbonetos para junto da linha central do arame. A única saída para o bloqueio total desse fenômeno é resfriar o arame ao ar o máximo possível, o que pode acarretar, no entanto, em perdas de produtividade. Conforme TOMAZELLI (1986), a temperatura máxima do arame na entrada do tanque de refrigeração à água é de 350°C, o que faz com que a saturação promovida pelo resfriamento brusco possa ser desprezível, em termos de alteração de resistência.

Como primeira ação, alguns testes com diferentes configurações na linha de galvanização foram executados a fim de se obter um resfriamento mais brando.

O primeiro teste foi aumentar o percurso do arame desde a cuba de recozimento até o tanque de refrigeração à água com roldanas, ou seja, de um caminho horizontal e retilíneo passou-se para um caminho triangular. O segundo, terceiro e quarto testes foram realizados com a adição de dois ventiladores (sem o *looping*) na saída da cuba de recozimento, mantendo-se a configuração tradicional da linha de galvanização. As roldanas, no primeiro teste, aumentaram significativamente o limite de resistência do arame devido ao seu alongamento. Nos outros três testes, os resultados foram melhores em relação ao primeiro, com destaque para a configuração somente com ventiladores.

Mesmo com o bom resultado na implantação de ventiladores para convecção forçada, não se pode garantir o bloqueio do fenômeno do envelhecimento sem conhecer a temperatura do arame na entrada da refrigeração à água, pois os testes evidenciaram a ascensão do limite de resistência conforme o passar dos dias. Para isso, utilizou-se a termografia na

medição térmica dos arames. Sem sucesso, os resultados de temperatura não satisfizeram ao objetivo devido à falta de conhecimento das propriedades térmicas da superfície do arame, visto que as câmeras termográficas dependem da emissividade do material em análise como dado de entrada. A Figura B.1 (ANEXO B) mostra a imprecisão e inexatidão das medições tomadas variando-se a propriedade do arame. Alterando a emissividade nos dois locais mostrados na figura, a redução de temperatura ao longo do arame é desrespeitada.

Todo esse quadro de incertezas reforça a necessidade de se criar outro meio para a obtenção quantitativa da taxa de resfriamento do arame. Um cálculo da transferência de calor será feito para se ter o controle do processo de resfriamento do arame BWG 18, bloqueando o efeito do endurecimento por precipitação e garantindo a estabilização do processo, bem como das propriedades mecânicas finais do arame.

### 2.3. METODOLOGIA

Em uma análise de transferência de calor, é necessário conhecer todos os meios de troca energética e todo o cenário que engloba o fenômeno. A metodologia de abordagem do problema do resfriamento do arame será a proposta por MUOJEKWU e POPS (2000). Seguem abaixo os passos para conhecimento total das condições de troca térmica:

- 1) Modos de transferência de calor e regime;
- 2) Definir dimensões;
- 3) Identificar o material;
- 4) Propriedades termofísicas conhecidas;
- 5) Condições de fronteira ou iniciais conhecidas;
- 6) Selecionar método numérico;
- 7) Discretizar geometria;
- 8) Convergência do modelo;
- 9) Validação do modelo.

Como o problema apresentado se dá em uma linha de produção de arames galvanizados, a etapa anterior de recozimento pode influenciar e alterar as condições superficiais do arame e será considerada principalmente na análise da perda por radiação. Todos os modos de transferência de calor que se enquadram no problema serão analisados e mostrados nos próximos tópicos com o objetivo de chegar-se a uma equação geral do fenômeno, capaz de contemplar velocidade da linha de galvanização, temperatura ambiente e a adição de ventilação forçada.

#### 2.3.1. Análise da transferência de calor no arame

No caso do arame em análise, o BWG 18, a temperatura do recozimento é de 720°C. Após a sua saída da cuba de chumbo, o material vai resfriando principalmente através de dois importantes fenômenos térmicos: convecção (livre e forçada) e radiação. A diferença de temperatura entre o arame e o ar ambiente gera a convecção e a diferença de temperatura entre o arame e sua vizinhança a radiação. Essa transferência de calor ocorre em 8 metros de extensão entre o final da cuba de recozimento e o tanque de refrigeração à água. Por isso, o resfriamento pode ser controlado somente através da velocidade do arame.

Como o problema é transiente e o método utilizado será o de diferenças finitas, é importante dividir o arame em volumes de controle para se fazer o balanço energético. Na Figura 2.1, pode-se visualizar o balanço de energia. A velocidade, identificada pela seta, está inserida na figura somente pela informação do sentido da linha de galvanização, pois a primeira lei da termodinâmica precisa ser satisfeita para todo e qualquer instante de tempo. Ainda na figura, as energias que entram no volume de controle são: condução  $Q_{cd(i-1)}$  e

advecção  $Q_{ad}(i-1)$  (transporte de energia interna do material). Já a convecção  $Q_{cv}(i)$ , a radiação  $Q_{rd}(i)$ , a condução  $Q_{cd}(i+1)$  e a advecção  $Q_{ad}(i+1)$  são as energias que saem do volume de controle. Os índices  $i$ ,  $i+1$  e  $i-1$  são os indicadores dos volumes de controle, que serão mais tarde utilizados para o cálculo geral de transferência de calor.

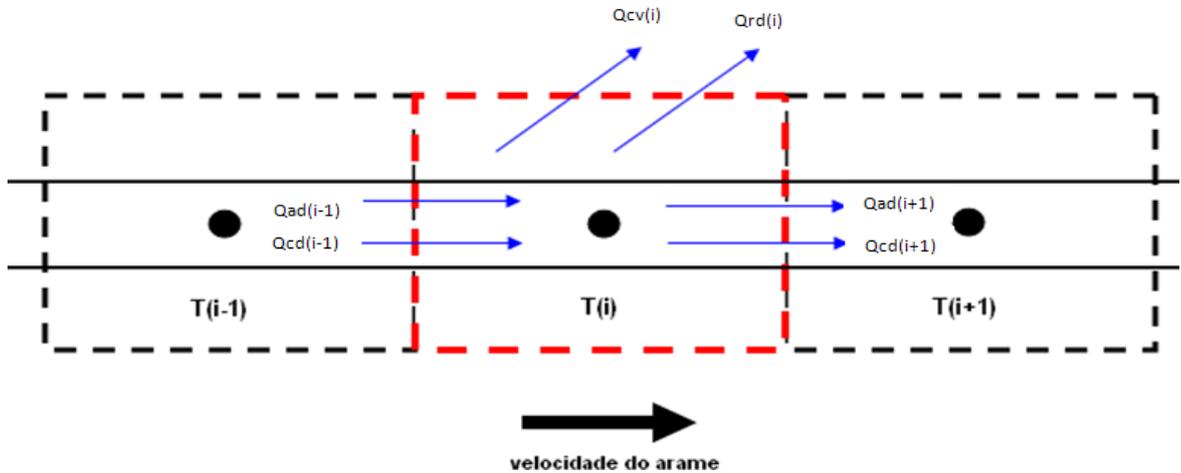


Figura 2.1 – Conservação de energia em um volume de controle

Como a advecção está sendo considerada devido ao movimento do arame, a parcela da taxa de variação da energia interna não precisa ser adicionada à equação geral da conservação de energia. Assim, a equação 2.1 representa a transferência de calor entre o arame e sua vizinhança:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0 \quad (2.2)$$

onde  $\dot{E}_e$  é a taxa de energia que entra em W, e  $\dot{E}_s$  a taxa de energia que sai em W.

### 2.3.2. Difusão térmica no resfriamento do arame

Havendo um gradiente de temperatura ao longo da extensão do arame, há, conseqüentemente, condução térmica ocorrida pelo transporte de energia (movimentação aleatória dos átomos). O sentido dessa transferência de calor é na direção da velocidade do fio e está relacionada com a diferença de temperatura entre cada volume de controle, como mostra a Figura C.1 (ANEXO C).

A equação 2.2 é a equação da difusão do calor para todas as direções, uma ferramenta necessária na análise da condução:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde  $\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$  é o fluxo líquido de calor por condução na direção x em W/m<sup>3</sup>,  $\frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right)$  é

o fluxo líquido de calor por condução na direção y em W/m<sup>3</sup>,  $\frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$  é o fluxo líquido de

calor por condução na direção  $z$  em  $W/m^3$ ,  $\dot{q}$  é a geração de energia em  $W/m^3$ ,  $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$  é a energia armazenada em  $W/m^3$  e  $k$  é a condutividade térmica do material em  $W/m.K$ .

Como no caso deste trabalho a difusão térmica no arame é unidimensional e sem fonte de energia, a equação 2.3, acompanhada das referências mostradas na Figura 2.1, se resume em:

$$Q_{cd,i-1} - Q_{cd,i} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do material em  $W/m.K$ .

### 2.3.3. Convecção por advecção no resfriamento do arame

Seguindo o arame no seu trajeto de resfriamento, depara-se com o efeito do ar na superfície do material. Essa transferência de energia causada pelo movimento global do fluido sobre o arame depende principalmente da velocidade linear do arame, que é a velocidade tangencial imposta pelas bobinas de tração da linha de galvanização. Considerando em um volume de controle uma temperatura uniforme  $T_i$  no material e  $T_\infty$  como sendo a temperatura do ar ambiente, o fluxo de calor por convecção é representado pela lei de resfriamento de Newton como:

$$q'' = h(T_i - T_\infty) \quad (2.5)$$

onde  $q''$  é o fluxo de calor por convecção em  $W/m^2$  e  $h$  é o coeficiente de troca de calor por convecção em  $W/m^2.K$ .

O coeficiente de convecção por advecção  $h$  não pode ser visto apenas como um valor tabelado. Dependendo basicamente da geometria do material, de suas condições de superfície, das propriedades térmicas do fluido e da natureza de seu movimento, o coeficiente de troca de calor por convecção está para a convecção assim como o coeficiente de condutividade térmica está para a condução térmica.

No caso do BWG 18, a velocidade nominal na linha de galvanização é de 90 metros por minuto, ou melhor, 1,5 metros por segundo. Esse fato faz com que a análise da convecção no resfriamento a ar do arame não se limite somente à convecção livre, como sendo um corpo sem movimento inserido em um fluido estagnado. Entretanto, a convecção forçada precisa ser adicionada ao problema devido ao movimento relativo da superfície do material com o ar ambiente.

Para a obtenção dos coeficientes de convecção livre e forçada, precisa-se primeiro definir o tipo de escoamento do problema. Sabe-se que a grande maioria dos problemas práticos não é submetida às condições teóricas, ou seja, configurações laminares de escoamento são praticamente impossíveis em problemas reais. Por isso, será considerado o escoamento turbulento para a análise do resfriamento do arame.

Os coeficientes de convecção são estimados através de correlações empíricas para uma dada geometria e condições de escoamento. A expressão algébrica para essas correlações é do tipo:

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^n \quad (2.6)$$

onde  $Nu_D$  é o gradiente adimensional de temperatura,  $C$ ,  $m$  e  $n$  são coeficientes,  $Re_D$  é o número adimensional de Reynolds e  $Pr$  é a razão entre as difusividades de momento e térmica em  $(Cp.\mu)/k$  ou  $\nu/\alpha$ .

Seguindo as recomendações usuais, todas as propriedades do ar serão calculadas a partir da temperatura de filme, como mostra a equação 2.7:

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (2.7)$$

onde  $T_f$  é a temperatura de filme em K,  $T_s$  é a temperatura da superfície do material em K e  $T_\infty$  é a temperatura do ar ambiente em K.

Para a convecção livre em um cilindro horizontal longo (o que mais se aproxima do arame nas condições da linha de produção de galvanizados), Churchill e Chu (1975) recomendam a seguinte correlação:

$$Nu_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{\left[ 1 + (0,559/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.8)$$

onde  $Ra$  é o número de Rayleigh.

O número de Rayleigh é baseado no comprimento característico da geometria (no caso de corpos cilíndricos se considera o diâmetro) e é dado por:

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \quad (2.9)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade em  $m/s^2$ ,  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrico do fluido em  $1/K$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície em K,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido em  $m^2/s$  e  $\alpha$  é a difusividade térmica do fluido em  $m^2/s$ .

Para a convecção forçada, é necessária outra correlação contemplando o escoamento paralelo do ar ao redor da superfície do arame. Como visto anteriormente, para cada geometria com uma condição de escoamento existe uma correlação diferente para obtenção do coeficiente convectivo  $h$ . A correlação da equação 2.6 acima foi desenvolvida por Churchill e Chu e somente pode ser utilizada para cilindros em convecção livre e não para o caso da convecção forçada do resfriamento do arame. São encontradas, na literatura, correlações para convecção forçada em cilindros submetidos a escoamento transversal, o que não se aplica a esse tipo de convecção. Por isso, será considerada a correlação para placa plana em escoamento paralelo. Essa aproximação leva em conta a troca térmica entre a superfície do arame com o ar como se o material fosse uma placa. A superfície da placa em contato com o ar será a do arame, analogamente. A correlação para obtenção do coeficiente convectivo para o caso da convecção forçada é a da equação 2.7 que segue abaixo:

$$Nu_L = 0,029 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad 0,6 < Pr < 60 \quad (2.10)$$

Para o caso de se adicionar ventiladores para aumento do coeficiente convectivo no resfriamento do arame, aplica-se a correlação proposta por Churchill e Bernstein, cobrindo toda faixa de Reynolds e uma ampla faixa de Prandtl:

$$Nu_D = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.11)$$

onde  $Re_D$  é da forma:

$$Re_D = \frac{uD}{\nu} \quad (2.12)$$

onde  $u$  é a velocidade de ventilação em m/s,  $D$  é o diâmetro do arame em metros e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar em m<sup>2</sup>/s.

Em problemas onde há convecção forçada e convecção livre, usa-se uma relação que serve como um parâmetro importante na consideração ou não da convecção natural. Para verificação quantitativa da parcela de contribuição desses dois modos de convecção, usa-se a relação entre o número adimensional de Grashof sobre o número adimensional de Reynolds elevado ao quadrado. Se o valor for muito menor do que 1,0, a convecção livre pode ser desprezada e se for muito maior do que 1,0 a convecção forçada pode ser desconsiderada. O número de Grashof é dado por:

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \quad (2.13)$$

onde  $Gr_D$  é o número adimensional de Grashof.

Com todos os números de Nusselt calculados, o coeficiente para convecção livre pode ser calculado através da relação abaixo, obtida através da definição do coeficiente de convecção e dos números adimensionais de Reynolds e Prandtl:

$$h_{cl} = \frac{Nu_{D(livre)} k_a}{D} \quad (2.14)$$

onde  $h_{cl}$  é o coeficiente de convecção livre em W/m<sup>2</sup>.K,  $k_a$  é a condutividade térmica do fluido em W/m.K e  $Nu_{D(livre)}$  é o número de Nusselt total.

Com o número de Nusselt da equação 2.8, tem-se o coeficiente de convecção devido ao movimento do arame:

$$h_{cf} = \frac{Nu_L k_a}{L} \quad (2.15)$$

onde  $h_{cf}$  é o coeficiente de convecção forçada devido ao movimento do arame em W/m<sup>2</sup>.K

Com o número de Nusselt da equação 2.9, obtém-se o coeficiente de convecção devido ao escoamento transversal de ventilação forçada:

$$h'_{cf} = \frac{Nu_D k_a}{D} \quad (2.16)$$

onde  $h'_{cf}$  é o coeficiente de convecção para ventilação forçada em W/m<sup>2</sup>.K.

Correlacionando-se os resultados mistos de transferência de calor por convecção, tem-se a equação 2.17 para obtenção do coeficiente convectivo total:

$$Nu_{D(total)}^3 = Nu_{forçado}^3 + Nu_{livre}^3 \quad (2.17)$$

onde  $Nu_{D(total)}$  é o número de Nusselt total,  $Nu_{forçado}$  é o número de Nusselt para ventilação forçada e para o movimento do arame e  $Nu_{livre}$  é o número de Nusselt para o caso de convecção livre.

#### 2.3.4. Radiação no resfriamento do arame

O arame BWG 18 saindo da cuba do recozimento está na temperatura de recristalização, 720°C. A essa temperatura o material está incandescente e vai se resfriando e retornando a sua coloração normal chegando ao tanque de refrigeração à água. A radiação é importante no local devido à alta temperatura da superfície suja de chumbo fundido, e será considerada nos cálculos da transferência de calor. Na seção 2.3.1, foi visto que o arraste de chumbo pelo arame acarreta em uma película do metal ao redor do arame, mudando a condição da superfície. A partir desse fato, a equação 2.8, da radiação do calor, pode ser definida pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \varepsilon_{pb_i} (T_i^4 - T_{viz}^4) \quad (2.18)$$

onde  $\dot{q}_{rad}$  é o fluxo de calor por radiação em W/m<sup>2</sup>,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann em W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>,  $\varepsilon_{pb_i}$  é a emissividade do chumbo,  $T_i$  é a temperatura da superfície do arame em K e  $T_{\infty}$  é a temperatura da vizinhança em K.

No cálculo de radiação, será usada a consideração do arame inserido em uma grande vizinhança.

#### 2.3.5. Advecção no resfriamento do arame

Do item 2.3.1, a análise da advecção entra no problema como a variação da energia interna dentro do volume de controle. Com o movimento linear do arame, tem-se sua entrada a uma temperatura de fronteira que pode-se considerar como  $T_{i-1}$  e a saída a uma temperatura de fronteira  $T_{i+1}$ . Isso pode ser descrito na forma:

$$\dot{q}_{adv(entrada)} = u \rho C_{p_{i-1}} T_{i-1} \quad (2.19)$$

onde  $\dot{q}_{adv(entrada)}$  é o fluxo de calor por advecção em W/m<sup>2</sup>,  $u$  é a velocidade do arame em m/s,  $\rho$  é a densidade do material em kg/m<sup>3</sup>,  $C_{p_{i-1}}$  é o calor específico do material em J/kg.K e  $T_{i-1}$  é a temperatura no volume de controle em K.

E, para a advecção de saída, tem-se:

$$\dot{q}_{adv(saída)} = u\rho C_{p_{i+1}} T_{i+1} \quad (2.20)$$

### 2.3.6. Equação geral do problema

Juntando-se todos os termos de entrada e saída conforme a equação 2.1 chega-se na equação geral do sistema em um volume de controle conforme Figura 2.1:

$$\begin{aligned} \rho u A_{cs} C_{i-1} T_{i-1} + \left( \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \right) k_{i-1} = \rho u A_{cs} C_{i+1} T_{i+1} + \left( \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x} \right) k_i + h_i A_{sur} (T_i - T_\infty) \\ + \varepsilon_{pb_i} A_{sur} \sigma (T_i^4 - T_{viz}^4) \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde todos os índices  $i$  se referem aos volumes de controle e  $\Delta x$  é o comprimento do volume de controle em metros.

Através do método de diferenças finitas, discretiza-se a parcela da condução para o cálculo nos pontos nodais (equação 2.4):

$$\begin{aligned} \rho u A_{cs} C_{i-1} T_{i-1} + \left( \frac{VK_{i-1}}{\Delta x^2} \right) T_{i-1} - 2 \left( \frac{VK_i}{\Delta x^2} \right) T_i + \left( \frac{VK_i}{\Delta x^2} \right) T_{i+1} = \rho u A_{cs} C_{i+1} T_{i+1} \\ - h_i A_{sur} (T_i - T_\infty) - \varepsilon_{pb} \sigma A_{sur} (T_i^4 - T_{viz}^4) \end{aligned} \quad (2.22)$$

onde  $\Delta x$  é o comprimento do volume de controle em metros,  $A_{cs}$  é a área da seção transversal do arame em m<sup>2</sup>,  $A_{sur}$  é a área da superfície do volume de controle em m<sup>2</sup> e  $V$  é o volume do arame no volume de controle em m<sup>3</sup>.

Isolando  $T_{i+1}$  e multiplicando os termos pela respectiva área (superficial para o caso de convecção e radiação ou transversal para o caso de condução e advecção) ou pelo volume (no caso da condução), tem-se, portanto, a forma geral da transferência de calor no arame equacionada.

$$\begin{aligned} T_{i+1} \\ = \frac{\rho u A_{cs} C_{i-1} T_{i-1} - h_i A_{sur} (T_i - T_\infty) - \varepsilon_{pb} \sigma A_{sur} (T_i^4 - T_{viz}^4) + \left( \frac{VK_{i-1}}{\Delta x^2} \right) T_{i-1} - 2 \left( \frac{VK_i}{\Delta x^2} \right) T_i}{\rho u A_{cs} C_{i+1} - \left( \frac{VK_i}{\Delta x^2} \right)} \end{aligned} \quad (2.23)$$

A solução da equação anterior para toda a extensão do arame é resolvida aplicando-se um método iterativo. Como  $T_{i+1}$  é a temperatura que se quer encontrar,  $T_i$  e  $T_{i-1}$  precisam ser conhecidas para a primeira iteração. Assim, elas serão consideradas iguais à temperatura do chumbo fundido na cuba de recozimento, 720 C.

Tanto na convecção (forçada e livre), na condução, na radiação e na advecção as propriedades termofísicas do material e do ar são essenciais para se obter resultados confiáveis. Como há variação de temperatura ao longo do comprimento do arame, essas propriedades não são constantes. Portanto, a partir da Tabelas A.1 e A.2 (Apêndice A), cada propriedade é equacionada através de linhas de tendência em função da temperatura. As equações do apêndice B, com todas as propriedades na temperatura de filme para o ar, mostram essa consideração importante que será considerada no modelo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. VALIDADE DO MÉTODO DA CAPACITÂNCIA CONCENTRADA

Para as duas condições extremas de temperatura no arame, o número de Biot satisfaz o método usado na análise da transferência de calor no arame. Da equação 2.1 tem-se para a saída da cuba de recozimento:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{80,85 \frac{0,00124}{4}}{30,54} = 8,354 \times 10^{-4}$$

E para a chegada no tanque de refrigeração à água:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{76,82 \frac{0,00124}{4}}{35,61} = 6,867 \times 10^{-4}$$

#### 3.2. CONVECÇÃO COMBINADA LIVRE E FORÇADA

Pela relação entre o número de Grashof e o número de Reynolds, mostrada na seção 2.3.3, obtém-se para a saída do arame da cuba de recozimento:

$$\left. \frac{Gr_D}{Re_D^2} \right)_{saída, Pb} = 1,21 \times 10^{-2}$$

E, para a chegada do arame ao tanque de refrigeração, tem-se:

$$\left. \frac{Gr_D}{Re_D^2} \right)_{entrada, refrigeração} = 9,457 \times 10^{-3}$$

Como os valores acima não são considerados nem tão próximos e nem tão distantes de 1,00, a convecção livre será considerada no modelo.

### 3.3. CONVERGÊNCIA DO MODELO

Analisando a equação 2.12, a convergência está ligada diretamente ao tamanho do volume de controle. Variando-se esse parâmetro pode-se verificar a variação do resultado da temperatura do arame na entrada no tanque de refrigeração, como mostra o gráfico abaixo.

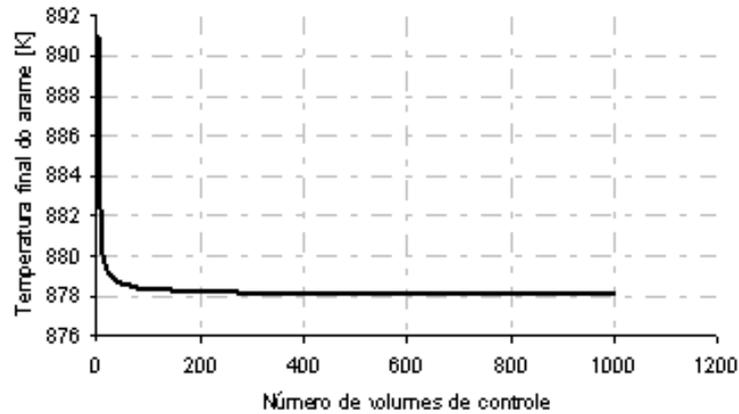


Figura 3.1 – Convergência da malha

Do gráfico acima, conclui-se que para uma malha acima de aproximadamente 300 volumes de controle a convergência do modelo é atingida.

### 3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Do item 2.2, a medição da temperatura do arame através de instrumentos é muito complicada. Essa imprecisão está relacionada à obtenção das temperaturas absolutas, pois qualquer alteração nos dados da emissividade gera uma variação considerável no resultado. Embora haja essa inconsistência na medição térmica, seja com termografia ou pirometria (que dependem da mesma propriedade), pode-se medir as variações de temperatura, o que independe dos dados do material e que torna possível a comparação com o resultado do modelo. Assim, com uma câmera termográfica FLYR, registrou-se a variação de temperatura com a variação da velocidade da linha de galvanização (de 80 metros por minuto até 60 metros por minuto). A Figura E.1 (ANEXO E) mostra os resultados da termografia e a comparação com os resultados do modelo.

Mesmo com os valores da variação de temperatura próximos entre a termografia e o modelo, nota-se, no resultado da medição, a emissividade considerada 0,9 devido ao limite de temperatura da lente da câmera. Esse valor é elevado em comparação com o valor considerado no modelo para esse local da análise, de aproximadamente 0,11. Para garantir a validação do modelo nesse caso, pode-se aplicar a similaridade de energia de radiação para a medição partindo da forma convencional do poder emissivo, ou seja, varia-se a emissividade do material igualando-se a energia térmica. Então:

$$\varepsilon_M \sigma T_M^4 = \varepsilon_R \sigma T_R^4 \quad (3.1)$$

onde  $\varepsilon_M$  é a emissividade usada na medição,  $T_M$  é a temperatura obtida na medição em K,  $\varepsilon_R$  é a emissividade real usada no modelo e  $T_R$  é a temperatura real em K.

A partir equação 3.1, a Tabela E.1 (ANEXO E) corrige os valores de temperatura e emissividade da termografia e os compara com os resultados do modelo para cada velocidade

e emissividade usada. A variação entre os valores de temperatura corrigidos da termografia e do modelo é de aproximadamente 2°C para a velocidade de 80 metros por minuto e de aproximadamente 10°C para a velocidade de 60 metros por minuto.

### 3.5. CONDIÇÃO ATUAL DA LINHA DE GALVANIZAÇÃO

Os arames do tipo BWG 18 são produzidos a uma velocidade de 90 metros por minuto, não havendo ventilação forçada no resfriamento a ar após a cuba de recozimento. Sob essa condição, o gráfico abaixo mostra a variação da temperatura no arame ao longo dos 8 metros entre recozimento e refrigeração à água.

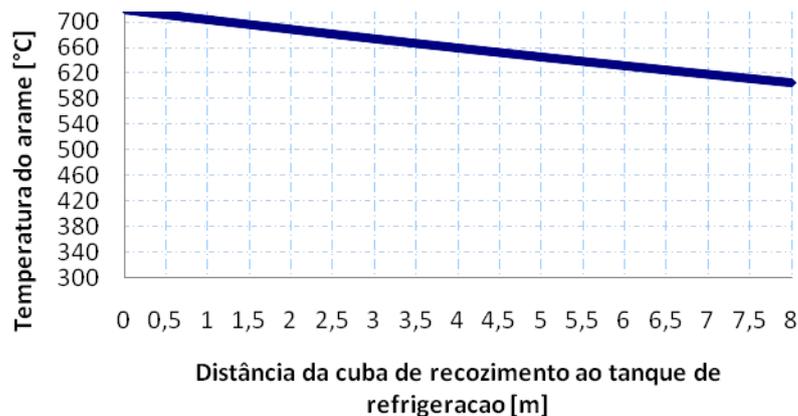


Figura 3.2 – Variação da temperatura no arame para velocidade de 90 metros por minuto

Pelo gráfico da Figura 3.2, tem-se que a temperatura de entrada do arame no tanque de água é de aproximadamente 600°C, o que comprova o acontecimento do fenômeno de endurecimento do arame por precipitação.

### 3.6. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO ARAME

Como na produção normal do BWG 18 na linha de galvanização o arame chega à água a aproximadamente 600°C, variou-se sua velocidade e obteve-se o gráfico da Figura 3.3, onde mostra a variação da temperatura do arame no local de entrada do tanque de refrigeração.

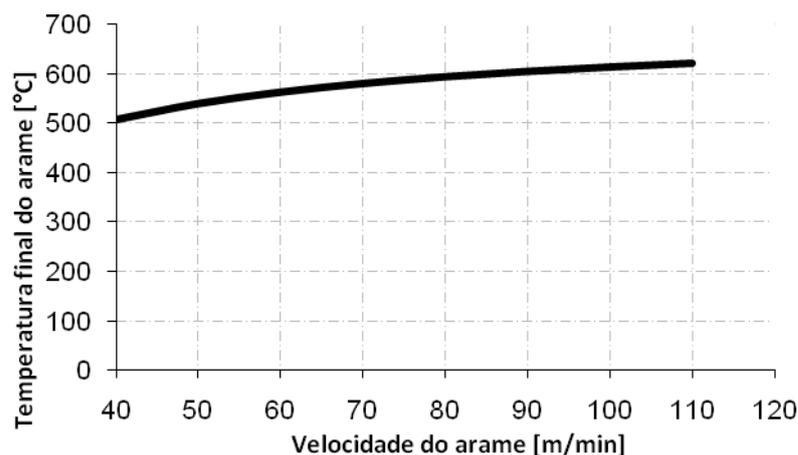


Figura 3.3 – Variação da temperatura do arame com a variação da velocidade de produção

### 3.7. INCLUSÃO DE VENTILADORES NO RESFRIAMENTO

Com o objetivo de aumentar a taxa de resfriamento a ar, adicionaram-se, no modelo, quatro ventiladores na extensão dos oito metros desde a cuba de recozimento. Com cada aparelho produzindo um escoamento de ar de aproximadamente 15 metros por segundo, o gráfico da Figura 3.4 mostra os resultados obtidos para temperatura do arame a 90 metros por minuto na entrada da água para cada ventilador adicionado.

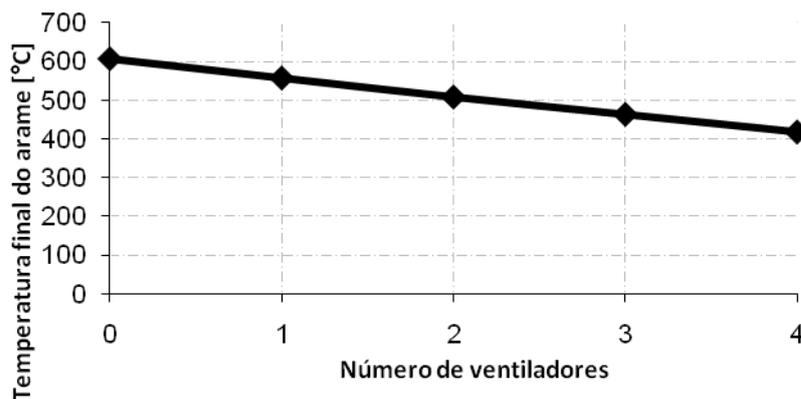


Figura 3.4 – Variação da temperatura no arame na chegada à água em função do número de ventiladores instalados

### 3.8. EFEITO DOS VENTILADORES COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO ARAME

Ainda com os ventiladores no sistema, variou-se a velocidade do arame de 45 até 90 metros por minuto e obteve-se o resultado da Figura 3.5 para quatro ventiladores.

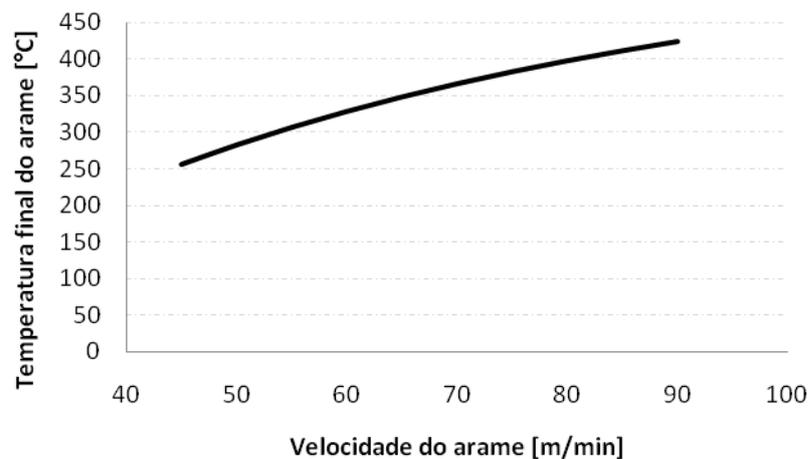


Figura 3.5 – Temperatura final do arame com adição de ventilação forçada em função da variação da velocidade da linha de galvanização

### 3.9. EFEITO DA TEMPERATURA AMBIENTE NO RESFRIAMENTO DO ARAME

Como na área onde o arame é produzido a variação de temperatura no ano é de aproximadamente 30°C, a Figura D.1 (ANEXO D) mostra o efeito disso na temperatura final do arame para uma velocidade de 90 metros por minuto.

### **3.10. CONCLUSÕES**

Uma simulação computacional com base nas equações de transferência de calor foi apresentada para o caso do resfriamento a ar de arame, contemplando principalmente a velocidade de produção e a inclusão de ventilação forçada. O modelo foi validado por comparação de radiação a partir de medição termográfica.

Os resultados mostram que os atuais parâmetros da linha de galvanização para velocidade e o seu resfriamento a ar não bloqueiam o fenômeno de endurecimento por precipitação. A temperatura de chegada no tanque de refrigeração à água varia de 600 a 620°C, dependendo da temperatura ambiente, o que é muito distante dos 350°C sugeridos por TOMAZELLI (1986).

Com a adição de ventilação forçada ao longo dos 8 metros de resfriamento a ar e diminuindo a velocidade do arame para 70 metros por minuto, consegue-se atingir a temperatura desejada. Para alcançar o mesmo resultado, porém sem os ventiladores, deve-se reduzir a velocidade do material de 90 para 17 metros por minuto, o que acarreta uma perda de produção de 20 toneladas mensais em comparação à produtividade dos 70 metros por minuto propostos com ventilação forçada.

Portanto, para de fato impedir o fenômeno que aumenta a resistência de ruptura à tração do arame ao longo dos dias impedindo a fabricação de telas, é necessária a redução da velocidade de 90 para 70 metros por minuto e a adição de quatro ventiladores (Omar Brasil, 380V, 18860W, 600mm de diâmetro) com vazão volumétrica de 15000 metros cúbicos por hora. Para isso, um investimento inicial de R\$ 8000,00 e um custo mensal de R\$ 1500,00 são necessários.

## REFERÊNCIAS

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. S.S. **Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder**. 18 ed. 1975.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002

MUOJEKWO, C. A.; POPS, H. **Heat transfer fundamentals and their applications to wire manufacturing processes**. Wire journal international, 2000.

TOMAZZELLI, P. **Influência da velocidade de resfriamento sobre o endurecimento de arames galvanizados em linha contínua**. Relatório técnico – Siderúrgica Riograndense S.A. 1986.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BEJAN, A. **Convective heat transfer**. 2 ed. John Wiley & Sons, 1995.

FOX, R. W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. .5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

KAYS, W. M.; CRAWFORD, M. E. **Convective heat and mass transfer**. 2 ed. McGraw-Hill Book |Company, 1980.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Taylor & Francis, 1980.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. **Thermal radiation heat transfer**. 4 ed. Nova Iorque. Taylor and Francis, 2001

## APÊNDICE A – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS<sup>a</sup>

Tabela A.1 – Propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica

T [K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [kJ/kg.K]	$\mu \cdot 10^7$ [N.s/m <sup>2</sup> ]	$\nu \cdot 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$k \cdot 10^3$ [W/mK]	$\alpha \cdot 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	Pr
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,69
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726

<sup>a</sup>Adaptação de INCROPERA;DEWITT (2002)

Tabela A.2 – Propriedades termofísicas do aço baixo carbono (Mn≤1%, Si≤0,01%)<sup>a</sup>

Propriedades a 300K				Propriedades a varias temperaturas [K]			
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [kJ/kg.K]	$k \cdot 10^3$ [W/mK]	$\alpha \cdot 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	$k$ [W/m.K] / $C_p$ [kJ/kg.K]			
				400	600	800	1000
7854	434	60,5	17,7	56,7 / 487	48,0 / 559	39,2 / 685	30,0 / 1169

<sup>a</sup>Adaptação de INCROPERA;DEWITT (2002)

## APÊNDICE B – EQUAÇÕES DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

1) Propriedades do arame e do chumbo:

$$k_i = -0,0439T_i + 74,134 \quad (\text{B.1})$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do aço em W/mK e  $T_i$  é a temperatura do arame no volume de controle em K

$$C_i = 2 \times 10^{-3} T_i^2 - 1,5941 T_i + 770,85 \quad (\text{B.2})$$

onde  $C$  é o calor específico do aço em J/kg.K.

$$\varepsilon_{pb_i} = 1,52 \times 10^{-4} T_i - 0,0147 \quad (\text{B.3})$$

onde  $\varepsilon_{pb}$  é a emissividade do chumbo.

2) Propriedades do ar:

$$\text{Pr}_i = 4 \times 10^{-2} T_{f_i}^2 - 4 \times 10^{-4} T_{f_i} + 0,792 \quad (\text{B.4})$$

onde  $\text{Pr}_i$  é o número adimensional de Prandtl.

$$\rho_i = 2 \times 10^{-6} T_{f_i}^2 - 4 \times 10^{-3} T_{f_i} + 2,1099 \quad (\text{B.5})$$

onde  $\rho_i$  é a densidade do ar em kg/m<sup>3</sup>.

$$\alpha_i = 5 \times 10^{-11} T_{f_i}^2 + 1 \times 10^{-9} T_{f_i} - 3 \times 10^{-5} \quad (\text{B.6})$$

onde  $\alpha_i$  é a difusividade térmica do ar em m<sup>2</sup>/s.

$$\nu_i = 6 \times 10^{-11} T_{f_i}^2 + 7 \times 10^{-8} T_{f_i} - 5 \times 10^{-5} \quad (\text{B.7})$$

onde  $\nu_i$  é a viscosidade cinemática do ar em m<sup>2</sup>/s.

$$k_{ai} = -8 \times 10^{-9} T_{f_i}^2 + 5 \times 10^{-8} T_{f_i} - 5,9 \times 10^{-3} \quad (\text{B.8})$$

onde  $k_{ai}$  é a condutividade térmica do ar em W/mK.

$$\mu_i = 1 \times 10^{-10} T_{f_i}^2 + 8 \times 10^{-8} T_{f_i} - 5 \times 10^{-5} \quad (\text{B.9})$$

onde  $\mu_i$  é a viscosidade do ar em kg/s.m.

$$Cp_i = -3 \times 10^{-7} T_{f_i}^2 + 0,2048 T_{f_i} + 934,51 \quad (\text{B.10})$$

onde  $Cp_i$  é a viscosidade do ar em kg/s.m.

## ANEXO A – TESTES NA LINHA DE GALVANIZAÇÃO

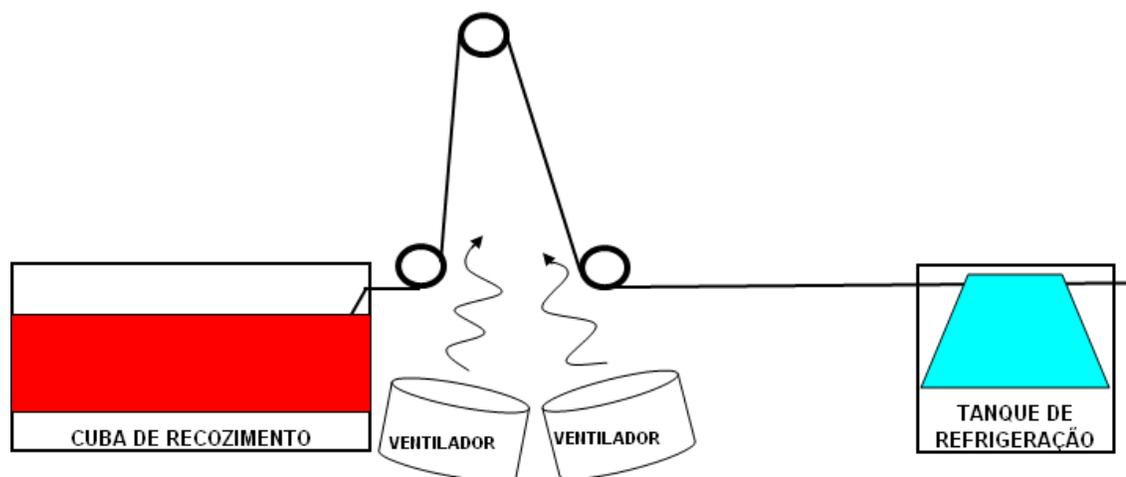


Figura A.1 – Configurações dos testes na linha de galvanização

## ANEXO B – TERMOGRAFIA

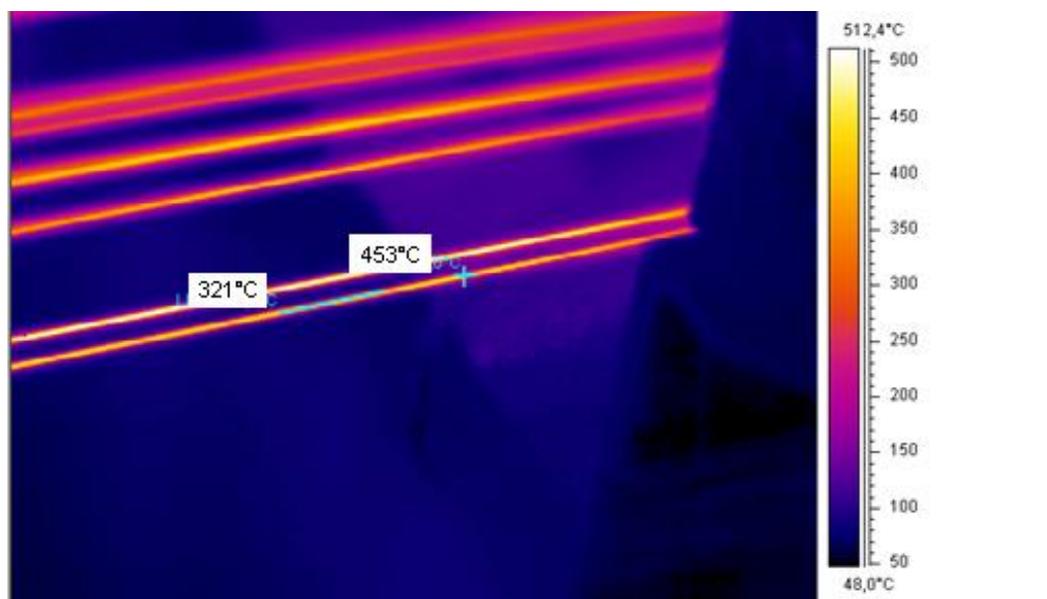


Figura B.1 – Inconsistência na medição de temperatura por termografia

## ANEXO C – SENTIDO DA CONDUÇÃO TÉRMICA E VOLUMES DE CONTROLE

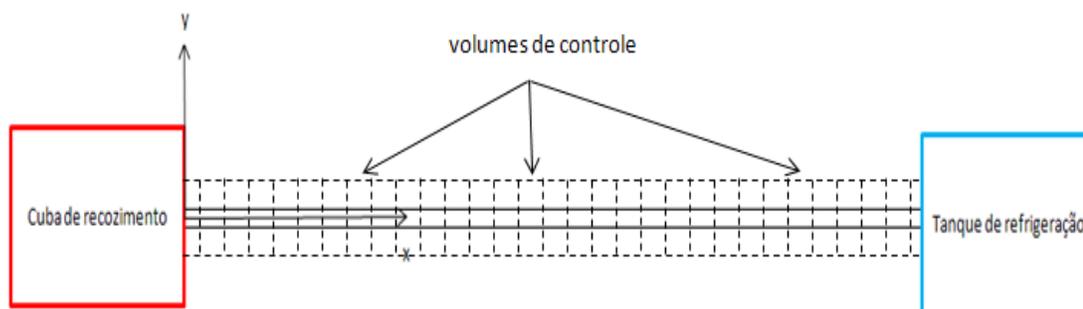


Figura C.1 – Sentido da condução do calor no resfriamento do arame

## ANEXO D – TEMPERATURA FINAL DO ARAME COM A VARIAÇÃO DA TEMPRATURA AMBIENTE

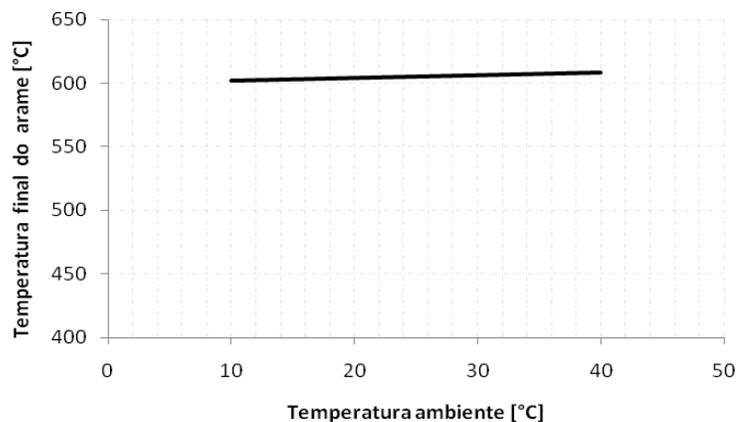


Figura D.1 – Temperatura final do arame com a variação da temperatura ambiente

## ANEXO E – VALIDAÇÃO DO MODELO (COMPARAÇÃO DE RADIAÇÃO)

Tabela E.1 – Correção e comparação dos resultados da termografia e do modelo.

Velocidade do arame [m/min]	Termografia			Correção (comparação)			Modelo	
	[°C]	[K]	$\epsilon$	[°C]	[K]	$\epsilon$	[°C]	[K]
80	251,5	524,5	0,9	600,49	873,49	0,117	598,57	871,57
60	221,7	494,7	0,9	557,69	830,69	0,1132	568,66	841,66

Velocidade linha [m/min]	Termografia [°C]	Modelo [°C]
70	251,5	597,4
60	221,7	567,3
<b>Variação [°C]:</b>	29,8	30,1
<b>Variação [%]:</b>	-0,14	

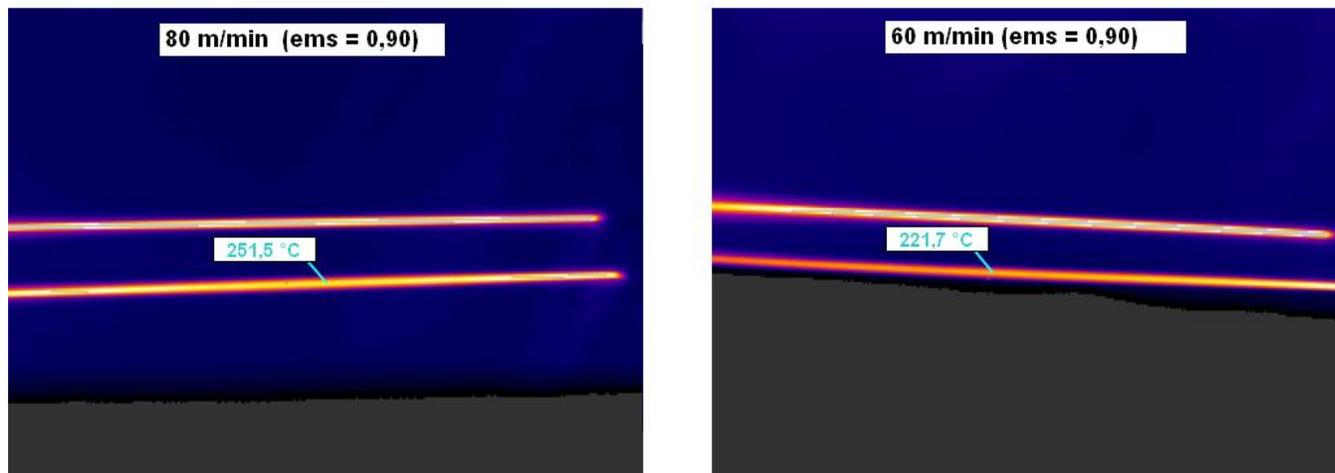


Figura E.1 – Comparação da variação da temperatura no modelo e por termografia