

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

“Análise numérica e experimental do resfriamento de carregamento de  
barras de aços”

Autor: Paul Campos Santana Silva

Orientador: Prof. Rudolf Huebner

Setembro de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE  
CARREGAMENTO DE BARRAS DE AÇOS**

**Paul Campos Santana Silva**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Minas Gerais

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner

Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

S586a

Silva, Paul Campos Santana.

Análise numérica e experimental do resfriamento de carregamento de barras de aços [manuscrito] / Paul Campos Santana Silva. – 2014. 80 f., enc.: il.

Orientador: Rudolf Huebner.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 77-80.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Barras de aço - Resfriamento - Teses. 3. Análise numérica - Processamento de dados - Teses.  
I. Huebner, Rudolf. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [ppgme@ufmg.br](mailto:ppgme@ufmg.br)

**"ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE  
CARREGAMENTO DE BARRAS DE AÇOS"**

**PAUL CAMPOS SANTANA SILVA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Calor e Fluidos".

Dissertação aprovada no dia 15 de setembro de 2014.

Por:

**Prof. Rudolf Huebner**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Prof. Roberto Márcio de Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Prof. Matheus Pereira Porto**

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Dra. Lis Nunes Soares**

Engenheira da Empresa VALLOUREC

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a minha família.

Agradeço ao Professor Doutor Rudolf Huebner pela oportunidade e por proporcionar as ferramentas necessárias além de um bom ambiente de trabalho.

Aos meus colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

À Vallourec do Brasil pela oportunidade.

A CAPES pelo incentivo financeiro durante os dois anos de mestrado.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>12</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1.    Objetivos.....	16
1.1.1.    Objetivo geral .....	16
1.1.2.    Objetivos específicos.....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1.    Influência do hidrogênio na estrutura do aço .....	17
2.2.    Importância da obtenção do perfil térmico do material.....	18
2.3.    Fator de forma .....	19
2.4.    Cavidade .....	21
2.5.    Modelo matemático .....	21
2.6.    Método da capacitância global .....	23
2.7.    Termografia infravermelha .....	24
2.8.    Erro de medição.....	25
2.9.    Método GUM .....	27
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1.    Definição da emissividade das barras de aço .....	28

3.2.	Experimento .....	29
3.2.1.	<i>Arranjo quadrangular</i> .....	29
3.2.2.	<i>Termografia</i> .....	30
3.2.3.	<i>Termopares</i> .....	31
3.2.4.	<i>Arranjo Triangular</i> .....	32
3.3.	Incerteza de Medição Termográfica, IMT .....	33
3.4.	Modelo Integral – EES .....	36
3.4.1.	<i>Fator de forma para o arranjo quadrangular</i> .....	39
3.4.2.	<i>Fator de forma para o arranjo triangular</i> .....	41
3.5.	Modelo Diferencial – CFX .....	42
3.5.1.	<i>Geração do modelo geométrico em escala reduzida</i> .....	42
3.5.2.	<i>Geração da malha</i> .....	44
3.5.3.	<i>Definições dos domínios no CFX – Pré</i> .....	48
3.5.4.	<i>Solução das equações</i> .....	51
3.5.5.	<i>Análise dos resultados</i> .....	51
3.6.	Teste de malha espacial e temporal .....	52
3.7.	Modelos 2D e 3D .....	52
3.8.	Validação e critério do modelo .....	53
3.9.	Modelo integral no EES em escala real .....	53
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>55</b>
4.1.	Teste de malha: espacial e temporal .....	55
4.2.	Arranjo quadrangular .....	61

4.3.	Arranjo triangular .....	66
4.4.	Comparativo entre o experimento em escala real e o modelo integral...	72
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Cilindros a e b paralelos, com o mesmo raio r e distância s .....	20
FIGURA 2.2 – Configuração utilizada para determinar fator de forma do cilindro i e j Fonte: Bopche e Sridharan 2010 .....	20
FIGURA 3.1 – Arranjo quadrangular e triangular .....	28
FIGURA 3.2 – Determinação da emissividade das barras de aço utilizadas para o experimento em escala reduzida.....	29
FIGURA 3.3 – Conjunto de barras de aço durante a primeira, segunda e terceira configuração do experimento quadrangular .....	30
FIGURA 3.4 – Exemplo de termograma frontal, lateral e superior.....	31
FIGURA 3.5 – Primeira configuração para o arranjo triangular .....	32
FIGURA 3.6 – Termografia em vista de perspectiva utilizada para o arranjo triangular	32
FIGURA 3.7 – Interface do IMT .....	34
FIGURA 3.8 - Análise da termografias, com a termocâmera científica, utilizando o software ThermaCAM <sup>TM</sup> Reasercher Pro 2.9.....	35
FIGURA 3.9 – Gráficos gerados pelo IMT .....	36
FIGURA 3.10 – Configuração típica do arranjo quadrangular.....	39
FIGURA 3.11 – Cilindros iguais separados por uma distância s. ....	40
FIGURA 3.12 – Aproximação para o cálculo do fator de forma em barras na diagonal	40
FIGURA 3.13 – Configuração típica do arranjo triangular. ....	41
FIGURA 3.14 – Modelo geométrico quadrangular sem simplificação. ....	42
FIGURA 3.15 – Modelo geométrico do arranjo quadrangular com o uso das condições de simetria .....	43

FIGURA 3.16 – Modelo geométrico do arranjo triangular sem o uso de simetria .....	44
FIGURA 3.17 – Modelo geométrico do arranjo triangular com o uso de simetria. ....	44
FIGURA 3.18 – Malha para o arranjo quadrangular. ....	45
FIGURA 3.19 – Parâmetros utilizados na malha para o arranjo quadrangular. ....	46
FIGURA 3.20 – Critério de qualidade da malha para o arranjo quadrangular. ....	46
FIGURA 3.21 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 1. ....	47
FIGURA 3.22 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 2. ....	47
FIGURA 3.23 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 3. ....	48
FIGURA 3.24 – Modelos 2D e 3D dos arranjos, quadrangular e triangular. ....	53
FIGURA 3.25 – Distribuição dos lingotes e termopares no experimento em escala real. .....	54
FIGURA 4.1 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 1.....	56
FIGURA 4.2 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 4.....	57
FIGURA 4.3 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 7.....	58
FIGURA 4.4 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 1.....	59
FIGURA 4.5 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 4.....	60
FIGURA 4.6 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 7.....	61
FIGURA 4.7 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 1..	62
FIGURA 4.8 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 4..	63

FIGURA 4.9 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 7..	64
FIGURA 4.10 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 1.....	66
FIGURA 4.11 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 4.....	67
FIGURA 4.12 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 7.....	68
FIGURA 4.13 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo integral.....	70
FIGURA 4.14 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo diferencial – 2D.....	71
FIGURA 4.15 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo diferencial – 3D.....	72
FIGURA 4.16 – Posicionamento dos termopares no experimento realizado na Vallourec do Brasil.....	73
FIGURA 4.17 – Resultado do modelo integral para o experimento em escala real.....	73

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Resultado de medição com mensurando invariável (RM). .....	26
TABELA 2.2 – Resultado de medição com mensurando variável (RM). .....	26
TABELA 3.2 – Dados comuns as três configurações. ....	48
TABELA 3.3 – Dados iniciais do início da simulação, configuração 1. ....	49
TABELA 3.4 – Dados da configuração 2. ....	50
TABELA 3.5 – Dados da configuração 3. ....	51
TABELA 4.1 – Condições gerais das malhas submetidas ao teste de malha. ....	55
TABELA 4.2 – Condições de passo de tempo para o teste de malha. ....	59
TABELA 4.3 - Diferença percentual entre os modelos matemáticos e a medição no termopar. ....	65
TABELA 4.4 - Diferença percentual entre os resultados experimentais e os modelos. .	69
TABELA 4.5 – Tempo de processamento de cada modelo. ....	70
TABELA 4.6 – Quadro comparativo entre modelo integral e experimento em escala real .....	74

# NOMENCLATURA

## Letras Latinas

A	Área	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub>	Calor específico dos gases a pressão constante	[kJ/kg/K]
$\dot{E}$	Taxa de energia	[W]
F	Fator de forma	
g	Gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Coefficiente de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> /K]
L	Comprimento	[m]
k	Condutividade térmica	[W/m/K]
m	massa	[kg]
Nu	Nusselt	
p	pressão	[Pa]
Pr	Prandtl	
Q	Taxa de energia	[W]
q''	Fluxo de energia	[W/m <sup>2</sup> ]
Ra	Rayleigh	
T	Temperatura	[C ou K]
t	tempo	[s]

## Subscrito

acu	acumulada
ent	entrada
sai	saída
ger	gerada
i	barra i

j	barra j ou ambiente
rad	radiação
conv	convecção
s	distancia entre os centros dos cilindros
$\infty$	temperatura do ambiente, infinito
viz	temperatura da vizinhança
ab	entre a barra <u>a</u> e a barra <u>b</u>
2 int	duas interferência
0 int	sem interferência

#### Letras Gregas

$\beta$	Coeficiente de expansão térmica	[1/T]
$\varepsilon$	Emissividade	
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\sigma$	Constante de Stefan–Boltzman	[W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup> ]

## RESUMO

Neste trabalho foi estudado o resfriamento de barras de aço com o intuito de determinar o perfil térmico do conjunto de barras. As barras são posicionadas em diferentes instantes de tempo, e, com a mesma temperatura inicial. Esse processo de resfriamento lento tem por objetivo reduzir o teor de hidrogênio. O hidrogênio é capaz de se aprisionar na estrutura do aço tornando-o frágil. Observou-se que o resfriamento lento favorece a dessorção do hidrogênio da estrutura do material. O presente trabalho teve como objetivo elaborar um código computacional capaz de representar o perfil térmico durante o resfriamento do conjunto de barras. Foi realizado o balanço de energia para cada barra com o auxílio do EES – Engineering Equation Solver. Um código computacional foi desenvolvido com o intuito de prever a temperatura do conjunto de barras com relação à temperatura inicial das barras, temperatura ambiente, diâmetro e comprimento das barras. O modelo proposto no EES foi um modelo integral e foi validado com um experimento em escala reduzida no laboratório da UFMG. Paralelamente foi realizado um modelo diferencial utilizando o software Ansys – CFX. Foi realizado um experimento em escala real em uma das bolsas de resfriamento lento da Usina Barreiro da Vallourec do Brasil. Na bolsa de resfriamento lento foram medidas as temperaturas ao longo do tempo de algumas barras em pontos estratégicos do conjunto. O modelo integral foi redimensionado para o problema em escala real e comparado com os resultados experimentais. Foi encontrada uma diferença de 12,5 % entre os resultados do modelo integral e o do experimento em escala real.

## **ABSTRACT**

This study has been investigated the steel bars cooling in order to evaluate the thermal profile of a set of bars. The bars are positioned at different instants of time, and with the same initial temperature. This cooling process aims to reduce the hydrogen content. Hydrogen is able to trap the structure of the steel. Consequently, make the steel fragile. The proper thermal treatment can lead to reduce the level of hydrogen. Previous studies showed that slow cooling of the bars provides desorption of hydrogen from the structure of the steel. This study has aimed to develop a computer code that is able to represent the thermal profile. The energy equation was solved for each bar using Engineering Equation Solver (EES). EES is an integral model and it was validated with an experiment at Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Simultaneously a differential model has performed using the ANSYS - CFX. A real-world case study from industry has been done at Vallourec do Brasil's plant. Afterwards, the achieved results from case study and the mathematical model has been compared. The difference of the experiment's result and mathematical model's has been 12.5%.

# 1. INTRODUÇÃO

Segundo CALLISTER (2008) a alta aplicabilidade dos aços em diversas áreas da engenharia mecânica se deve à abundância de minério de ferro na natureza, as técnicas de extração (mineração), ao refino, a fabricação de ligas de baixo custo e a alta versatilidade adquirida com os aços a partir de tratamento térmico.

Os tratamentos térmicos são definidos como ciclos de aquecimento e resfriamento controlados que permitem que o mesmo altere a sua estrutura (SILVA e MEI, 2006). CHIAVERINI (2003) afirma que esse processo é o meio mais seguro, eficiente e utilizado para o controle da estrutura de materiais metálicos. Ele é capaz de determinar a estrutura final de um material uma vez fixada à composição química do mesmo.

O mecanismo de fragilização do aço ocorre devido à presença do hidrogênio na estrutura do material (REED-HILL e ABASCHIAN, 1992).

De acordo com KURZ e FISHER (1986), a microestrutura final do aço e as suas propriedades dependem do comportamento de transformação da austenita e das condições de resfriamento, podendo ser prevista caso esses fatores sejam conhecidos.

A temperatura, as taxas de aquecimento e de resfriamento e o tempo de manutenção a uma determinada temperatura são fatores determinantes do tratamento térmico. O resfriamento lento e controlado do aço propicia a redução da concentração de hidrogênio na estrutura do material.

No processo de redução do minério de ferro em ferro gusa e na transformação do mesmo em aço tem-se a necessidade de redução do teor de hidrogênio, realizada por meio do desgaseificador. Quando o mesmo não atinge o requisito necessário faz-se, então, o uso de resfriamento lento do aço.

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de modelos matemáticos, integral e diferencial para determinar o tempo total do processo de resfriamento e a distribuição de temperatura.

Para a solução do problema foi realizado um experimento em escala reduzida, tendo em vista a relação entre comprimento e diâmetro envolvido. Os modelos matemáticos, integral e diferencial, foram validados com dados experimentais.

O modelo matemático proposto no EES – Engineering Equation Solver – foi um modelo integral no qual valores médios de temperaturas foram assumidos para todo o volume de controle. O mesmo foi considerado para os lingotes vizinhos e para a temperatura do ar nas cavidades.

O modelo matemático diferencial proposto no Ansys – CFX subdivide o modelo geométrico em volumes menores, e em seguida, resolve a equação da energia e do movimento para cada volume gerado. A técnica utilizada para solucionar as equações é denominada volumes finitos. Este procedimento fornece mais detalhes sobre a física do problema quando comparada à análise integral.

Ambos os modelos foram utilizados para a obtenção do perfil de temperatura que é de fundamental importância para a determinação do tempo total do processo de resfriamento.

## **1.1. Objetivos**

### 1.1.1. Objetivo geral

Determinar o perfil térmico durante o processo de resfriamento de um conjunto de barras de aço posicionados em uma bolsa de resfriamento lento em diferentes instantes de tempo, e, com a mesma temperatura inicial.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Planejar e executar um experimento em escala reduzida capaz de representar o modelo real.
- Construir um modelo experimental em escala reduzida no laboratório da UFMG.
- Elaborar um modelo matemático integral no EES – Engineering Equation Solver – que represente o perfil térmico do conjunto de barras.
- Elaborar e simular o processo de resfriamento das barras por um modelo matemático diferencial - Ansys – CFX.
- Obter o perfil térmico das barras em relação com o tempo.
- Validar os modelos matemáticos, integral e diferencial, com os experimentos em escala reduzida.
- Comparar os resultados obtidos com o modelo matemático no EES com um teste em escala real realizado na Vallourec do Brasil.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Influência do hidrogênio na estrutura do aço

Absorção do hidrogênio no aço pode iniciar, ou acelerar, várias formas de degradação, tais como bolhas e trincas internas e externas (BOSCH *et al.*, 2010; JIN *et al.*, 2010 e DONG *et al.*, 2009). Segundo SHEWMON (1989) o aprisionamento do hidrogênio no aço pode ser de três tipos: 1 – Bolhas de H<sub>2</sub> formadas em microporos 2 – Caso de quando os sítios de menor energia são de uma única espécie, podem aprisionar somente um átomo de hidrogênio e para os quais a energia de ligação é tal que os átomos de hidrogênio podem se separar devido a agitação e 3 – são aqueles para os quais a energia de ativação para difusão do hidrogênio na rede perfeita é pequena em relação a energia de ligação.

REED-HILL e ABASCHIAN (1992) apresentam o mecanismo de fragilização do aço devido à presença do hidrogênio.

Presença do gás sulfúrico formando a dissolução anódica do ferro:



Seguida da reação catódica:



O hidrogênio formado é absorvido para o interior da matriz do aço por difusão.

O hidrogênio pode combinar novamente e formar o H<sub>2</sub> molecular preferencialmente nas interfaces de inclusões com a matriz do aço resultando na criação de uma pressão de gás interna. Tais pressões internas causam tensões de tração e originando flocos.

A trinca induzida por hidrogênio é formada por um mecanismo de aglutinação destes vários flocos nos constituintes frágeis dentro da microestrutura.

FILHO *et al.*, analisaram a redução do teor de hidrogênio na estrutura do arame de aço durante o tempo de estocagem. Retiraram amostras de arames de aço que receberam e que não receberam o processo de degaseificação. Observaram a redução de 1,85 a 0,55 ppm para um tempo de estocagem de 216 horas.

## **2.2. Importância da obtenção do perfil térmico do material**

É de suma importância conhecer o perfil térmico do material, visto que a maioria das operações metalúrgicas envolvem fenômenos térmicos que exercem uma forte influência na qualidade do produto final (DEVADAS e SAMARASEKERA, 1991).

Foram encontrados na literatura trabalhos que envolvem o modelo matemático para o resfriamento de arame de aço relacionado com a transformação de fase do aço.

ZHANG *et al.*, (2009) desenvolveu um modelo um modelo matemático capaz de prever a microestrutura final e as propriedades do material. O modelo é capaz de analisar a evolução do campo de temperatura e da microestrutura para arame de aço laminado em alta velocidade.

MANSOURI *et al.*, (2012) resolveu a equação da energia para um arame de aço na mesa de transporte. A condução de calor interna ao arame de aço não foi desprezado. A técnica utilizada foi elementos finitos para a solução da equação da energia para as três dimensões.

NOBARI e SERAJZADEH (2011) desenvolveram um modelo matemático capaz de prever a variação de temperatura e a transformação de fase da austenita nos aços durante o resfriamento controlado ocorrido após a laminação a quente. Análise de elementos finitos para duas direções foi aplicada para solucionar a equação da energia com condições de contorno não uniformes. A transformação da austenita foi determinada usando as curvas de resfriamento obtidas a partir de análise térmica.

KHADEM (1998) estudou transferência de calor em arame de aço trefilado sob a mesa de transporte de duas maneiras, com e sem proteção térmica. O método das diferenças

finitas foi utilizado para solucionar a equação da energia para duas dimensões no arame de aço. A transferência de calor a partir da região superior da proteção térmica foi assumida como convecção e radiação. A condução de calor interno ao arame de aço foi assumida como pequena e as demais transferências como do arame de aço para a mesa foram desprezadas devido as dificuldade de medir e as dimensões serem pequenas.

### 2.3. Fator de forma

Sejam duas superfícies, uma  $x$  e a outra  $y$ , separadas por certa distância. Se as dimensões delas não forem grandes o bastante ao ponto de uma envolver a outra, ao analisar a radiação total emitida pela superfície  $x$ , percebe-se que apenas uma parte dela será incidida em  $y$ . O mesmo ocorre com a radiação incidida em  $x$  pela radiação emitida de  $y$ .

O fator de forma,  $F_{xy}$ , é esta porcentagem de radiação emitida por  $x$  que é incidida em  $y$  em relação à radiação total emitida por  $x$ .

INCROPERA *et al.*, (2008) e HOWELL *et al.*, (1992) mostraram que para dois cilindros ( $a$  e  $b$ ) paralelos com raios iguais ( $r$ ), separados por uma distância  $s$ , conforme a FIGURA 2.1, o fator de forma  $F_{ab}$  pode ser calculado como apresentado na equação 2.13.

$$F_{ab} = \frac{1}{\pi} \left[ \sqrt{\alpha^2 - 1} + \arcsen\left(\frac{1}{\alpha}\right) - \alpha \right] \quad (2.3)$$

em que:  $\alpha = 1 + s/2r$

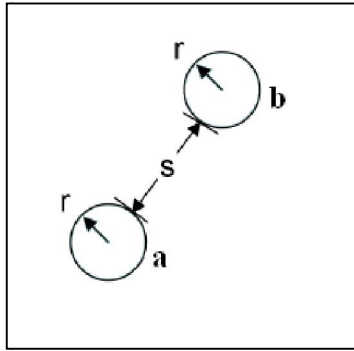


FIGURA 2.1 – Cilindros a e b paralelos, com o mesmo raio  $r$  e distância  $s$

O valor do fator de forma foi retirado da literatura (BOPCHE e SRIDHARAN, 2009; BOPCHE e SRIDHARAN, 2010). O cálculo do fator de forma foi realizado para dois cilindros horizontais, (i e j), com a presença de um terceiro cilindro, (k,- posicionado entre os cilindros i e j).

Para os cilindros i e j o fator de forma foi tabelado considerando: 1 - a razão do comprimento pelo diâmetro (de 10 até o infinito) e 2 - a razão entre a distância dos centros do cilindro (de 2,86 a 16,07). A FIGURA 2.2 mostra a configuração para qual o fator de forma foi definido.

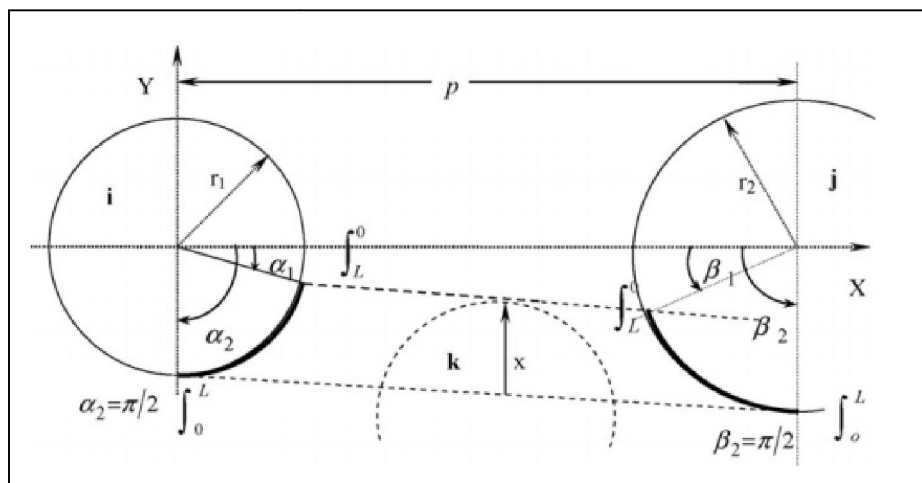


FIGURA 2.2 – Configuração utilizada para determinar fator de forma do cilindro i e j

Fonte: Bopche e Sridharan 2010

## 2.4. Cavidade

Estudos sobre campo de temperatura e velocidade em cavidades são largamente encontrados na literatura.

SAURY *et al.*, (2012) mostrou experimentalmente a distribuição de temperatura em cavidade inclinada variando de 0 a 180°, porém, concentrou esforços em determinar a primeira bifurcação feita pelo fluido (ar) no momento que o mesmo começa a se mover interno a cavidade.

A técnica de volumes finitos foi utilizada para os três próximos trabalhos citados sobre cavidade.

JANSSEN *et al.*, (1993) estudou a distribuição de temperatura e velocidade em uma cavidade cúbica com as paredes aquecidas. A técnica utilizada para solução numérica do campo de velocidade foi volumes finitos. Foi mostrado o sentido do escoamento, distribuições de tensões sob as paredes a as linhas de isotemperaturas para o interior da cavidade.

BAIRI *et al.*, (2007) pesquisou o campo de velocidade interno a uma cavidade retangular, no entanto, foi abordado em seu trabalho a variação do campo de velocidade de acordo com inclinação. Nos resultados de seu trabalho foi avaliada a temperatura máxima atingida pelo fluido com a variação da inclinação da cavidade de 0 a 90°. A técnica utilizada para solução numérica do campo de velocidade foi volumes finitos.

TRIAS *et al.*, (2010) estudou o campo de velocidade e temperatura interno a cavidade para números de Rayleigh até  $10^{11}$ . Foi apresentado o Nusselt local, linhas isotermas, distribuição de temperatura, campo de pressão nas paredes e perfil da energia cinética de turbulência para diferentes números de Rayleigh.

## 2.5. Modelo matemático

O trabalho de PATANKAR *et al.*, (1980) estabelece os fundamentos essenciais para a técnica dos volumes finitos com uma formulação simples e robusta. VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) contribuíram para a evolução e divulgação do método.

Atualmente volumes finitos é uma técnica largamente utilizada para solução de problemas complexos de engenharia.

ZEITOUN *et al.*, (2011) utilizaram a técnica de volumes finitos para solucionar as equações que governam o escoamento forçado de ar sobre uma geometria triangular estrudada. Durante a discretização foi utilizada a técnica de volumes finitos com diferenças centradas para obter aproximações conservativas da solução das equações que governam o problema. O triângulo estrudado apresentava-se 100 °C acima da temperatura do escoamento. Como resultado foram apresentados os campos de velocidade, temperatura, linhas isotérmicas, vórtices em relação ao número de Reynolds.

LEE *et al.*, (2012) utilizaram o pacote computacional ANSYS – FLUENT para o trabalho numérico que visa avaliar o desempenho do “Energy Textile”. O material foi aplicado como uma camada de isolante sobre os tubos da chicana do trocador de calor visando aumentar o desempenho. Foi realizado, também, um trabalho experimental.

Todavia é possível obter bons resultados com modelos matemáticos menos sofisticados. O modelo matemático utilizado no presente trabalho foi o modelo integral. O modelo integral trabalha com valores médios e volumes de controle ligeiramente maiores do que no modelo diferencial.

Assunção *et al.*, (2006) realizou uma análise termodinâmica para definir a eficiência energética e a efetividade do Glendon (trocador de calor). Glendon é o equipamento utilizado para aquecer o ar utilizado no alto-forno. O modelo matemático utilizado para a análise térmica subdividiu o volume do Glendon em 36 partes. Foram utilizados valores médios representativos para cada material. No modelo matemático foram simulados quatro diferentes materiais isolantes térmicos para avaliar o desempenho do Glendon.

## 2.6. Método da capacitância global

O método da capacitância global é uma hipótese de que a temperatura permanece uniforme em todo um sólido em qualquer instante durante o processo transiente (INCROPERA *et al.*, 2008). Esta realidade é impossível, pois implica em uma condutividade térmica infinita. Ela, porém, pode ser aproximada se a resistência à condução de calor no interior do sólido for pequena quando comparada à resistência à transferência de calor por convecção.

O número de Biot ( $Bi$ ) é um parâmetro adimensional que fornece a variação da temperatura no interior de um sólido em relação à diferença de temperatura entre a superfície e sua vizinhança. Esse número também pode ser interpretado como uma razão entre as resistências térmicas de condução e convecção. Se o número de Biot for muito menor que um,  $Bi \ll 1$ , a resistência à condução de calor no interior do sólido é muito pequena quando comparada à resistência à convecção pela camada limite do fluido. Neste caso, a hipótese do método de capacitância global é razoável.

O número de Biot é representado como na equação 2.4.

$$Bi = \frac{hL_C}{k} \quad (2.4)$$

em que:  $k$  = condutividade térmica do sólido (W/(m·K))

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m<sup>2</sup>·K))

$L_C$  = comprimento característico do sólido (m)

Para um cilindro longo, pode-se definir  $L_C$  como  $r/2$ , em que  $r$  é o raio do cilindro (INCROPERA *et al.*, 2008).

## 2.7. Termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva do campo de temperatura de uma superfície. A inspeção é realizada a partir da imagem gerada pela radiação térmica no infravermelho, emitida pela superfície de diferentes tipos de materiais (CASTANEDO, 2005; MALDAGUE, 2001, TAVARES; 2006). Por meio de câmeras específicas, denominadas termocâmeras, é possível, à distância, registrar a intensidade de radiação infravermelha emitida por um objeto. Essas câmeras são equipadas com sensores microbolômetros que convertem a radiação infravermelha recebida em sinais elétricos. Para que estes sinais possam ser lidos pelo operador, a câmera os converte em luz visível (cor) por meio de uma imagem térmica, conhecida como termograma.

A termografia pode ser utilizada como ferramenta para solução de problemas de engenharia. JANG *et al.* (2006) realizaram análises numéricas e experimentais do perfil de temperatura de um cilindro vazado aquecido. O objetivo era aquecer este cilindro por meio de uma bobina e conhecer a temperatura em função do tempo. Os experimentos contaram com o uso de termopares e termografias. A diferença dos resultados entre a análise numérica e a experimental foi inferior a 15%.

LUOZZO *et al.* (2011) realizaram simulações numéricas do aquecimento de um tubo de aço carbono por meio de elementos finitos, seguido de análises experimentais. O objetivo do estudo foi conhecer a diferença de temperatura das superfícies, interna e externa, do tubo ao longo do aquecimento e a extensão da zona afetada pelo calor. A simulação numérica foi comparada com valores de temperatura obtidos da superfície externa por um termômetro para radiação infravermelha. Os resultados da simulação e do experimento foram satisfatórios.

A influência do número de Biot foi estudada por HEMADRI *et al.* (2010) que realizaram uma análise experimental e numérica da variação do número de Biot em radiadores. A análise experimental contou com o uso da termografia. Foi observado que a homogeneidade da temperatura do radiador é fortemente dependente do número de Biot.

## 2.8. Erro de medição

Segundo CAVACO (2002) “*uma medição perfeita, isto é, sem erros, só pode existir se um sistema de medição perfeito existir e a grandeza sob medição tiver um valor único, perfeitamente definido e estável. Apenas neste caso ideal o resultado de uma medição pode ser expresso por um número e uma unidade de medição apenas.*” Porém sabe-se que não existem sistemas de medição perfeitos.

De acordo com ALBERTAZZI (2012) o erro de medição pode ser oriundo de fatores geométricos, propriedades elétricas e mecânicas, temperatura, umidade do ar, entre outros fatores externos. Além disso, há também o erro de leitura que pode ocorrer devido a uma posição incorreta da ferramenta ou devido a um ângulo inapropriado entre o operador e o instrumento de medição (paralaxe).

A análise de incerteza tem como objetivo garantir uma faixa segura de medição. Ainda segundo ALBERTAZZI (2012), a medição variável é caracterizada pela variação do mensurando ser superior a resolução do sistema de medição.

Para medições com mensurando invariável existem duas formas de registrar o resultado de medição (RM): 1- de forma simplificada, com apenas 1 amostragem, que ocorre quando não se há a devida curva de calibração do equipamento de medição ou 2- com  $n$  amostragens como ocorre quando se tem as devidas informações. A TABELA 2.1 mostra os resultados de medição com mensurando variável.

TABELA 2.1 – Resultado de medição com mensurando invariável (RM).

Fonte: ALBERTAZZI (2012)

Tipo de mensurando	Dados conhecidos do sistema de medição	Número de medições efetuadas	
		n = 1	n > 1
Invariável	$E_{\max}$	$RM = I \pm E_{\max}$	$RM = MI \pm E_{\max}$
	C e Re	$RM = I + C \pm Re$	$RM = MI + C \pm Re \sqrt{n}$

em que:

 $E_{\max}$  – Erro máximo do sistema de medição nas condições em que foram efetuadas.

C – Correção do sistema de medição,

Re – Repetitividade do sistema de medição,

I – Indicação do sistema de medição,

MI – Média das indicações.

Para sistemas variáveis, nos quais a resolução do sistema é menor do que a variação do mensurando, faz-se necessário efetuar um número de medições maior do que 1. A formulação do resultado de medição pode ser vista na TABELA 2.2.

TABELA 2.2 – Resultado de medição com mensurando variável (RM).

Fonte: ALBERTAZZI (2012)

Tipo de mensurando	Dados conhecidos do sistema de medição	Número de medições efetuadas maior do que 1
Variável	$E_{\max}$	$RM = MI + (\Delta I_{\max} + E_{\max})$
	C e Re	$RM = MI + C + (\Delta I_{\max} + E_{\max})$

em que:

 $\Delta I_{\max}$  – Valor absoluto da máxima diferença de uma indicação em relação a média das indicações.

## 2.9. Método GUM

O método GUM (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement) foi desenvolvido com o intuito de solucionar a falta de um consenso internacional que expressasse a medição de incerteza. As pesquisas para o desenvolvimento do método tiveram início no ano de 1977 e, atualmente, trata-se de um documento de referência que estabelece um procedimento uniforme para a especificação de incertezas de medição. Em relação ao método de avaliação, o GUM subdivide as componentes de incerteza em “Tipo A” e “Tipo B” (ABNT INMETRO, 2008). A primeira, que foi utilizada no presente trabalho, refere-se a um método que expressa a incerteza por meio da análise estatística de uma série de observações para uma mesma grandeza. A disseminação desse método e o desenvolvimento da Metrologia revelaram restrições que resultaram na elaboração de suplementos do Guia a fim de refinar sua metodologia. Contudo, o método GUM requer características definidas para a sua aplicação, tais como:

1. Modelos matemáticos lineares ou cuja linearidade seja pouco acentuada.
2. Modelos matemáticos diferenciáveis em todo domínio de interesse.
3. Modelos com relações explícitas.
4. Conhecimento dos graus de liberdade de todas as contribuições para a avaliação da incerteza, (RIBEIRO, 2006).

### 3. METODOLOGIA

Foram realizados experimentos em escala reduzida para dois arranjos diferentes, denominados, quadrangular e triangular. Foram elaborados dois tipos de modelos matemático, integral, diferencial, sendo que há dois modelos diferenciais, 2D e 3D. Todos os modelos foram comparados com os experimentos.

A FIGURA 3.1 mostra como é um arranjo quadrangular e um arranjo triangular.

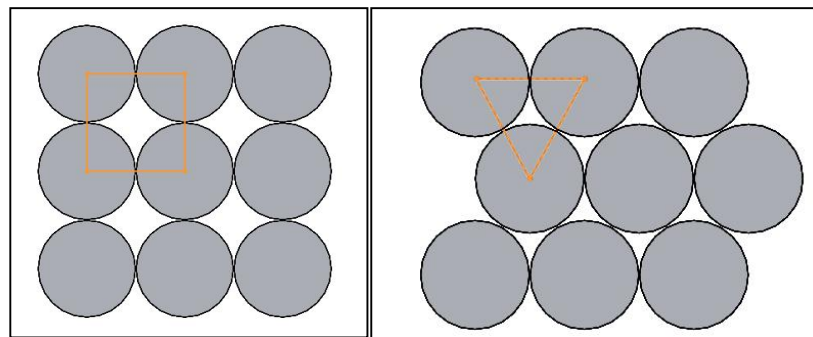


FIGURA 3.1 – Arranjo quadrangular e triangular

#### 3.1. Definição da emissividade das barras de aço

Previamente a realização do experimento, as barras de aço foram revestidas com tinta preta com o propósito de uniformizar a emissividade da superfície e aproximá-la a um corpo negro.

Uma barra foi envolvida com uma fita isolante de emissividade conhecida e igual a 0,95 (MARIO, 2011), três barras foram colocadas no forno (Mufla AN1222-W61) e aquecidas a uma temperatura de 100°C. Posteriormente, as barras foram retiradas do forno, emparelhadas em um suporte de madeira e realizou uma termografia. Assumindo que a fita isolante e a barra estavam em uma mesma temperatura no momento da captura da imagem térmica, a emissividade em um ponto sobre a barra pode ser medida, variando o valor da emissividade da barra até atingir o valor da temperatura medida na fita. A determinação da emissividade pode ser visualizada na FIGURA 3.2.

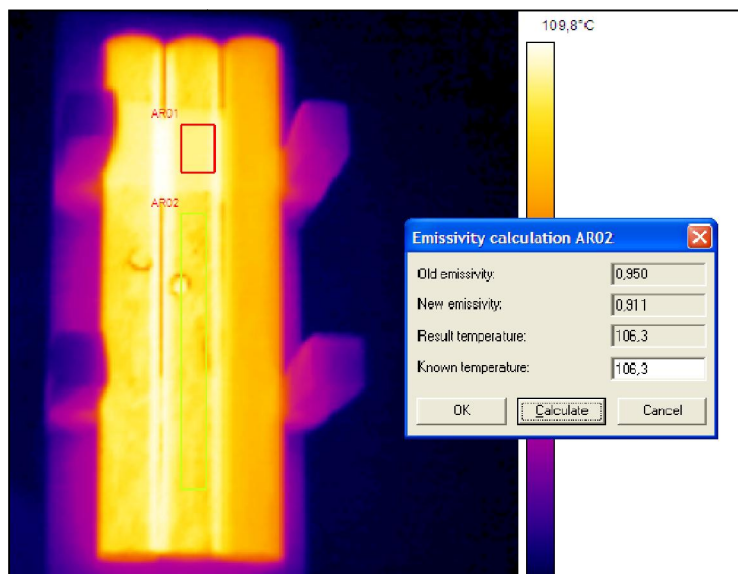


FIGURA 3.2 – Determinação da emissividade das barras de aço utilizadas para o experimento em escala reduzida

## 3.2. Experimento

Foram realizados dez experimentos, sendo que, cinco foram para o arranjo quadrangular e cinco para o arranjo triangular. As barras de aço são AISI 1020 de dimensões de 13 x 115 mm.

### 3.2.1. Arranjo quadrangular

O experimento consiste no resfriamento de um conjunto de nove barras de aço AISI 1020 posicionadas com um intervalo de tempo de cinco minutos entre cada carregamento com a mesma temperatura inicial (150 °C). A temperatura de 150 °C foi assumida por questões de segurança no manuseio.

Para a primeira configuração de carregamento quadrangular foram realizados cinco experimentos em que as 9 barras de aço 1020 foram colocadas dentro do Forno Mufla AN1222-W61, ainda desligado. O forno foi programado para uma taxa de aquecimento

de 180°C/hora e para estabilizar em 150°C, temperatura em que as barras foram mantidas durante 30 minutos. Em seguida, três barras foram retiradas do forno, emparelhadas em um suporte de madeira, denominando assim a primeira configuração do arranjo quadrangular, e resfriado em temperatura ambiente. As barras são enumeradas na sequência da esquerda para direita e da fileira inferior para superior. A segunda configuração do arranjo quadrangular consistiu em seis barras, sendo três barras sobrepostas às três barras da primeira configuração. Para a terceira configuração as três últimas barras foram retiradas do mesmo forno e foram empilhadas sobre as seis barras anteriores, conforme a FIGURA 3.3 e resfriaram no ambiente.



FIGURA 3.3 – Conjunto de barras de aço durante a primeira, segunda e terceira configuração do experimento quadrangular

### 3.2.2. Termografia

As barras resfriaram a temperatura ambiente por 45 minutos (2700 segundos) a partir do momento em que as três primeiras barras saíram do forno. O tempo de 45 minutos foi determinado devido a segurança no manuseio. As temperaturas superficiais das barras foram medidas com a termocâmera FLIR i60. Nos primeiros 2100 segundos do experimento foram capturados termogramas frontais, laterais e superiores dessas barras a cada 60 segundos e após este período foram capturados termogramas a cada 150 segundos visto que o gradiente de temperatura diminuiu. – Alguns termogramas frontais, laterais e superiores após o tempo de 900 segundos de experimento podem ser vistos na FIGURA 3.4.

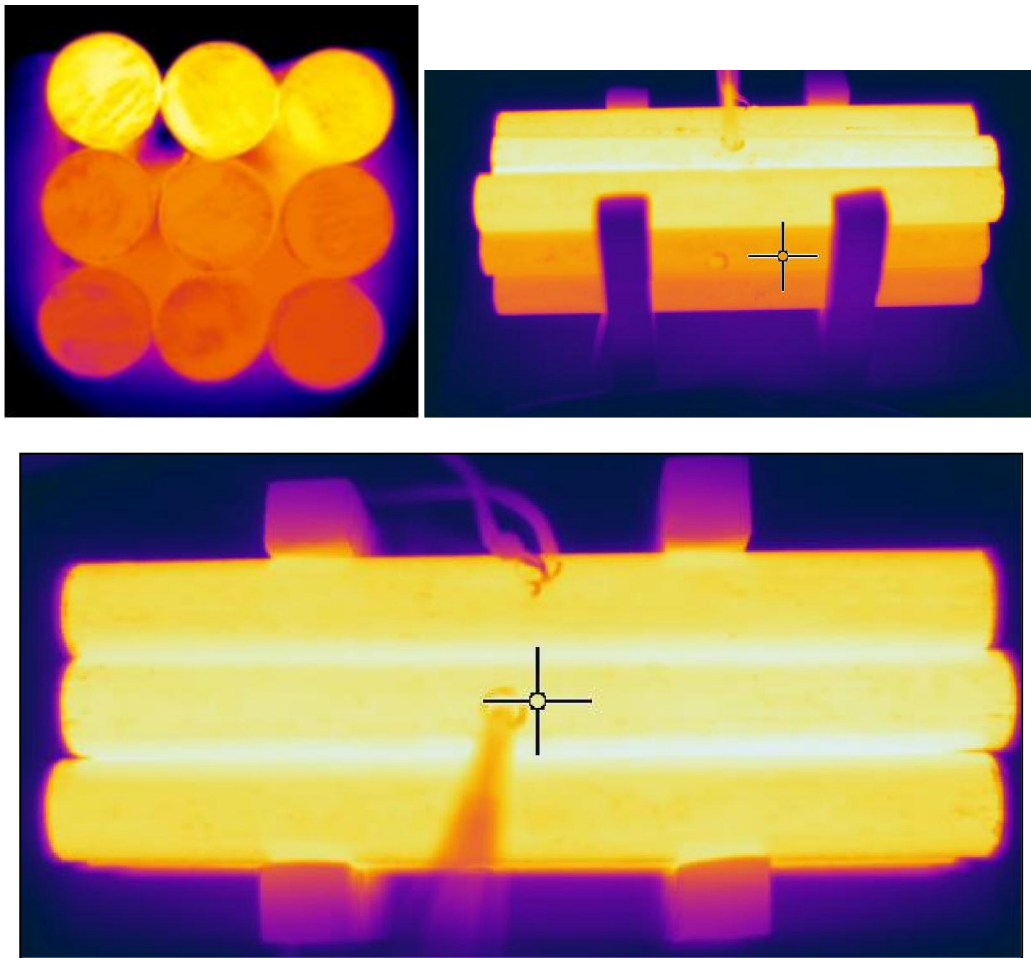


FIGURA 3.4 – Exemplo de termograma frontal, lateral e superior.

Os termogramas foram analisados por meio do programa ThermaCAMResearcher 2.9 Professional. Ao informar ao programa a temperatura ambiente, emissividade do material e a umidade ambiente, a temperatura média e o desvio padrão de cada área selecionada são fornecidos.

### 3.2.3. Termopares

Para capturar a temperatura ao longo do tempo foi utilizado um registrador de temperatura acoplado a 3 termopares. As barras são inseridas no forno para que atinjam

a temperatura de 150 °C. Os termopares são fixados às barras assim que as mesmas são retiradas do forno e posicionadas no suporte de madeira e submetidas ao resfriamento.

#### 3.2.4. Arranjo Triangular

São apresentadas as três configurações do arranjo triangular nas FIGURAS 3.5, 3.6 e 3.7. Foram realizados cinco experimentos com a alteração da termocâmara. Foi utilizada a termocâmara científica além do uso da câmera na posição estática (auxílio do tripé) realizando termogramas em vista de perspectiva da montagem, permitindo o registro num mesmo termograma das temperaturas nas faces frontal, lateral e superior da montagem. Os termogramas foram realizados a cada 30 segundos durante todo o processo de resfriamento.



FIGURA 3.5 – Primeira configuração para o arranjo triangular

Um modelo dos termogramas capturados para o arranjo triangular está apresentado na FIGURA 3.6.

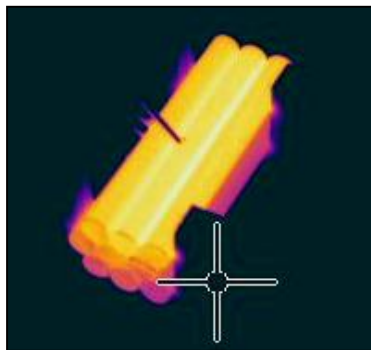


FIGURA 3.6 – Termografia em vista de perspectiva utilizada para o arranjo triangular

### 3.3. Incerteza de Medição Termográfica, IMT

A incerteza do resultado de uma medição realizada por uma termocâmara sofre influência das variáveis envolvidas no procedimento de medição, tais como: distância, emissividade, temperatura ambiente e seus respectivos valores de incerteza. A fim de indicar de forma quantitativa a qualidade dos experimentos, foi utilizado o programa Incerteza de Medição Termográfica, IMT. Este programa foi desenvolvido em ambiente MatLab® e é capaz de importar e interpretar os termogramas (Teixeira, 2012).

O IMT fornece os valores de incerteza de medição pelos métodos GUM de primeira e de segunda ordem e pelo método Monte Carlo. Para o presente trabalho foi utilizado o Método GUM, devido às respostas do experimento (temperatura em função do tempo) não apresentarem gradientes de temperatura acentuados. A FIGURA 3.7 mostra a interface do IMT.

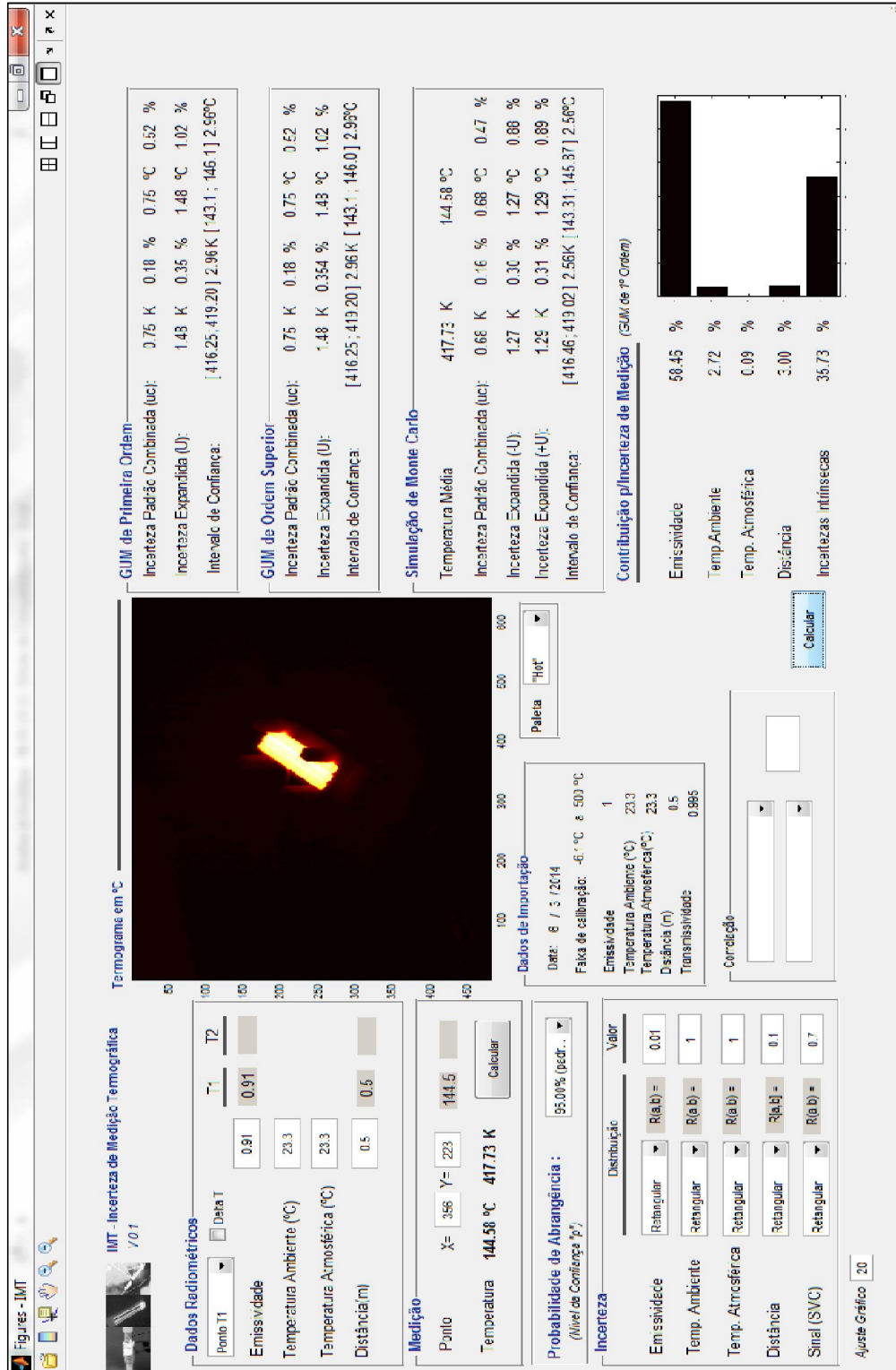


FIGURA 3.7 – Interface do IMT

A temperatura média do conjunto de barras foi definida a partir da análise de imagens no *software* da termocâmara. O IMT fornece a incerteza da temperatura de uma coordenada, portanto de posse da temperatura média, uma coordenada de temperatura próxima a temperatura média foi adotada para a análise de incerteza do conjunto. O *software* ThermaCAM™Reasercher Pro 2.9 foi a ferramenta utilizada para a análise das coordenadas como mostra a FIGURA 3.8.

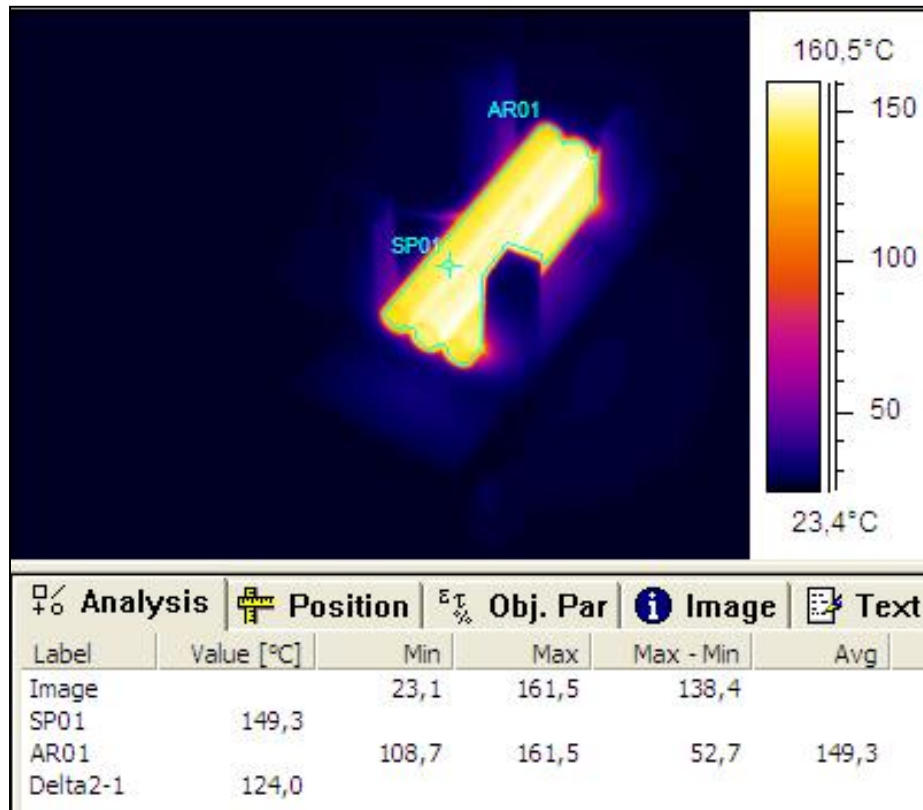


FIGURA 3.8 - Análise da termografias, com a termocâmara científica, utilizando o *software* ThermaCAM™Reasercher Pro 2.9

Ao conhecer a temperatura representativa, foi encontrada a coordenada cujo ponto possuía uma temperatura igual ou próxima ao valor da média das barras. O arquivo então sofreu alterações nas variáveis como sinal do objeto, temperatura, valor de emissividade e formato do arquivo, com o objetivo de ser exportado para a interface do IMT.

As variáveis envolvidas e seus respectivos valores de incerteza não sofreram modificações ao longo de cada experimento, mas a natureza transiente do fenômeno e a grande variação ocorrida nos valores de temperatura motivaram a avaliação de incerteza em cada instante, para todos os termogramas. Nota-se através da FIGURA 3.9 que o comportamento da incerteza não é constante no decorrer do tempo, devido à considerável variação de temperatura. Contudo as medições para 95% de confiabilidade foram atribuídas

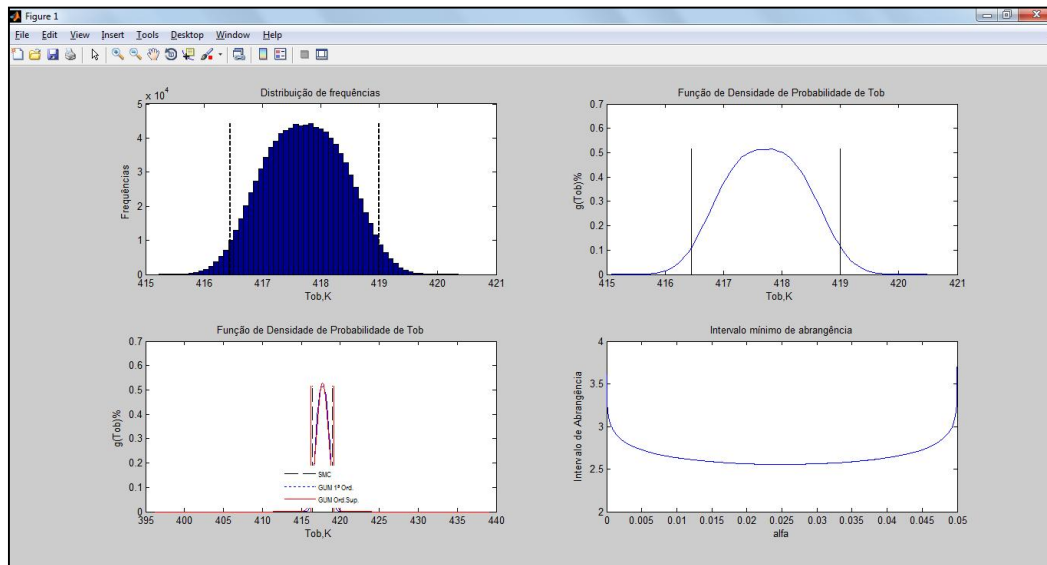


FIGURA 3.9 – Gráficos gerados pelo IMT

### 3.4. Modelo Integral – EES

No modelo matemático integral do resfriamento das barras foi considerado que estas trocam energia apenas por radiação e convecção natural. As superfícies das nove barras foram consideradas como superfícies cinza e difusas nas quais a emissividade e absorvidade possuem valores iguais e constantes para toda a faixa de temperatura, comprimento de onda e todas as direções.

Os dados de entrada do modelo matemático são as temperaturas iniciais de cada barra, a temperatura ambiente, a emissividade da superfície das barras, seu comprimento, diâmetro e sua massa específica. A TABELA 3.1 apresenta os respectivos valores.

TABELA 3.1 – Dados de entrada do modelo integral

Dados de entrada	
Temperatura inicial de cada barra	150 °C
Temperatura ambiente	25 °C
Emissividade das barras	0,95 -
Diâmetro	13 mm
Comprimento	115 mm

### 3.2.1. Balanço de energia

O balanço de energia foi resolvido de maneira discreta, aproximando-se  $dT/dt$  por  $\Delta T/\Delta t$ . Foi adotado um passo de tempo,  $\Delta t$ , de 30 segundos e as propriedades dependentes da temperatura foram atualizados a cada iteração. O equacionamento do problema é dado pela EQUAÇÃO (3.1).

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = h_{conv_i} \cdot A_{ij} \cdot (T_i - T_j) + F_{ij} \cdot h_{rad_{ij}} \cdot A_i \cdot (T_i - T_j) \quad (3.1)$$

Para tempos inferiores à 300 segundos  $i = 1, 2$  e  $3$  e  $j = 1, 2, 3$  e ambiente.

Para tempos iguais e superiores à 300 segundos e inferiores a 600 segundos  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  e  $6$  e  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  e ambiente.

Para tempos iguais e superiores à 600 segundos  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  e  $9$  e  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$  e ambiente.

Em que:  $m$  é a massa de uma barra,  $C_p$  é o calor específico do aço AISI 1020,  $T_i$  é a temperatura da barra  $i$ ,  $t$  é o tempo,  $h_{conv_i}$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo médio da barra  $i$ ,  $A_{ij}$  é a área da barra  $i$  voltada para a barra  $j$ ,  $T_j$  é a temperatura da barra  $j$ ,  $F_{ij}$  é o fator de forma da barra  $i$  para barra  $j$ ,  $h_{rad_{ij}}$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação da barra  $i$  para barra  $j$  e  $A_i$  é a área

superficial da barra  $i$ . O coeficiente de transferência de calor por radiação foi definido como na EQUAÇÃO 3.2.

$$h_{rad_{ij}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_i + T_j) \cdot (T_i^2 + T_j^2) \quad (3.2)$$

Em que:  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície das barras de aço (0,91),  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann cujo valor é  $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ . O coeficiente de transferência de calor convectivo foi determinado pela EQUAÇÃO 3.3.

$$h_{conv_i} = \frac{\overline{Nu}_i \cdot k}{D} \quad (3.3)$$

Em que:  $\overline{Nu}_i$  é o valor médio do número de Nusselt da barra  $i$ ,  $k$  é a condutividade térmica,  $D$  é o diâmetro da barra.

Para um cilindro horizontal infinito, comprimento  $\gg$  diâmetro, o número médio de Nusselt ao longo da superfície, pode ser estimado para números de Rayleigh,  $Ra$ , inferiores a  $10^{12}$  (CHURCHIL e CHU, 1975) conforme a equação 3.4.

$$\overline{Nu}_i = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_i^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.4)$$

Em que:  $Ra_i$  é o número de Rayleigh da barra  $i$  e  $Pr$  é o número de Prandt. Rayleigh é estimado a partir da EQUAÇÃO 3.5.

$$Ra_i = \frac{g\beta(T_i - T_{amb})D^3}{\nu\alpha} \quad (3.5)$$

Em que:  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar,  $\alpha$  é a difusividade térmica do ar. O coeficiente de

expansão térmica e o número de Prandtl foram definidos como nas EQUAÇÕES 3.6 e 3.7.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3.6)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.7)$$

#### 3.4.1. Fator de forma para o arranjo quadrangular

O arranjo quadrangular se configura quando as barras estão com os seus centros alinhados com relação com relação à barra vizinha na horizontal e na vertical como mostrado na FIGURA 3.10.

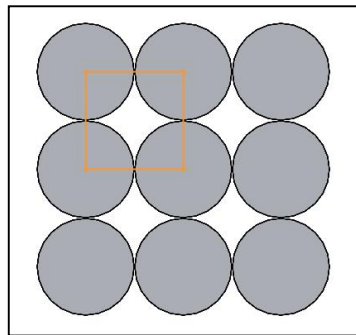


FIGURA 3.10 – Configuração típica do arranjo quadrangular.

Para dois cilindros paralelos com raios iguais  $r$ , separados por uma distância  $s$ , como mostrado na FIGURA 3.11, o fator de forma  $F_{ab}$  pode ser calculado conforme a EQUAÇÃO (3.8). Esse equacionamento foi usado para cilindros que se encontravam lado a lado.

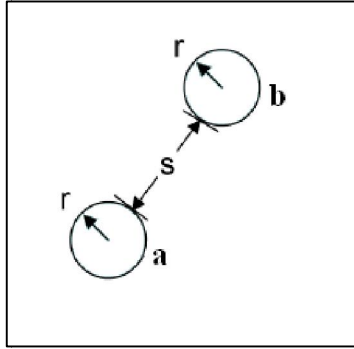


FIGURA 3.11 – Cilindros iguais separados por uma distância  $s$ .

$$F_{ab} = \frac{1}{\pi} \left[ \sqrt{(1 + s/2r)^2 - 1} + \arcsen\left(\frac{1}{(1+s/2r)}\right) - (1 + s/2r) \right] \quad (3.8)$$

Para os cilindros que se encontravam na diagonal o fator de forma utilizado  $F_d$  foi dado pela equação (3.9). Para tal aplicação assumiu que nenhuma radiação escapou na direção axial do cilindro e que toda radiação térmica foi trocada entre os cilindros, como observado na FIGURA 3.12.

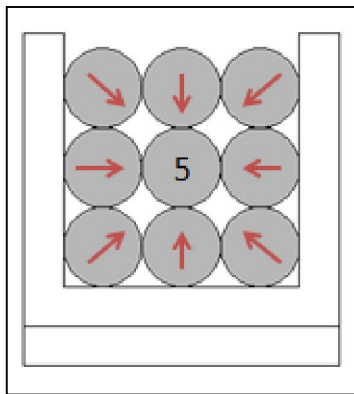


FIGURA 3.12 – Aproximação para o cálculo do fator de forma em barras na diagonal

$$4 F_{ij} + 4 F_d = 1 \quad (3.9)$$

### 3.4.2. Fator de forma para o arranjo triangular

Nessa configuração as barras encontram-se posicionadas de tal forma que para cada três barras observa-se um triângulo equilátero. Esse triângulo equilátero é formado pela união dos centros dos cilindros e pode ser visto na FIGURA 3.13.

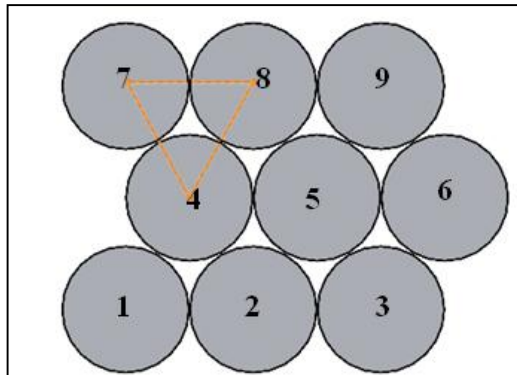


FIGURA 3.13 – Configuração típica do arranjo triangular.

A mesma técnica utilizada para definir o fator de forma da barra 5 no arranjo quadrangular, também foi utilizada para definir os fatores de forma da barra 5 no arranjo triangular. Observa-se que a barra 5 está envolvida por seis barras (barras 2, 3, 4, 6, 8 e 9). Logo o fator de forma entre a barra 5 e cada barra vizinha é de  $1/6$ . No entanto há também o fator de forma encontrado entre as barras 1 e 4 ( $F_{1-4}$ ) no qual existe apenas a interferência de uma barra (barra 2).

Observa-se que as barras com duas interferências possuem fator de forma igual a  $1/6$ , o equivalente a  $0,1667$ . A metade da diferença entre o fator de forma das duas configurações, com duas interferências e sem interferência, é o valor que cada interferência contribui no fator de forma como na equação (3.10).

$$\text{Interferência} = \frac{F_{2\text{ int}} - F_{0\text{ int}}}{2} = \frac{0,1717 - 0,1667}{2} \quad (3.10)$$

Em que:  $F_{2\text{ int}}$  – representa o fator de forma entre duas barras que possuem interferência com outras duas barras, por exemplo,  $F_{5-1}$ .

$F_{0\text{ int}}$  – representa o fator de forma entre duas barras que não possuem a interferência de nenhuma barra.

*Interferência* – parcela da barra que faz interferência entre as barras  $i$  e  $j$ .

### 3.5. Modelo Diferencial – CFX

A simulação consistiu em cinco etapas: geração da modelo geométrico, geração da malha, configuração das condições de contorno, solução das equações e análise dos resultados.

#### 3.5.1. Geração do modelo geométrico em escala reduzida

O modelo geométrico foi desenvolvido no *software* SolidWorks e consistiu na disposição de cilindros horizontais enclausurados por uma caixa que representa o fluido e limita o volume de controle. A FIGURA 3.14 apresenta o modelo quadrangular sem simplificação.

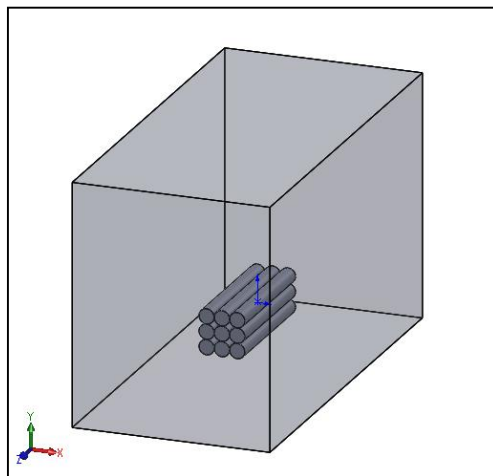


FIGURA 3.14 – Modelo geométrico quadrangular sem simplificação.

Há dois planos de simetria para o arranjo quadrangular, no plano XY e no plano YZ. O uso de simetria como condição de contorno implica em redução do custo computacional. A FIGURA 3.15 mostra o modelo quadrangular com as duas condições de simetria.

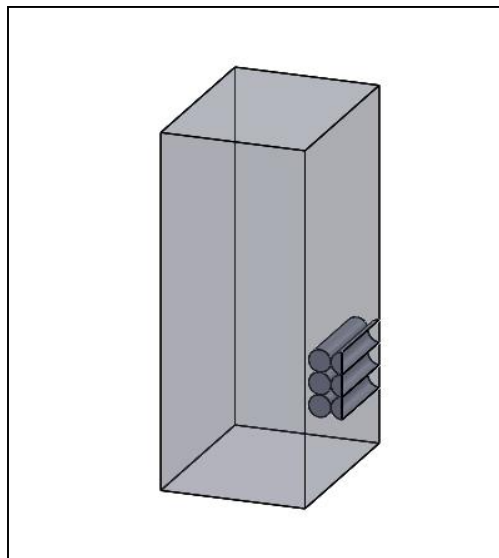


FIGURA 3.15 – Modelo geométrico do arranjo quadrangular com o uso das condições de simetria

A FIGURA 3.16 apresenta o modelo geométrico para o arranjo triangular sem a aplicação da condição de simetria.

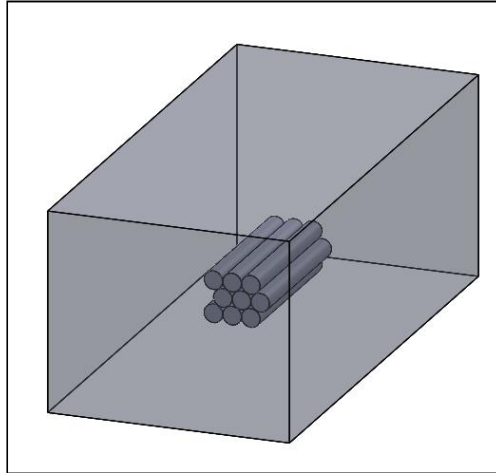


FIGURA 3.16 – Modelo geométrico do arranjo triangular sem o uso de simetria

A simetria no arranjo triangular ocorre apenas no plano XY que é um corte longitudinal no centro das barras como pode ser observado na FIGURA 3.17.

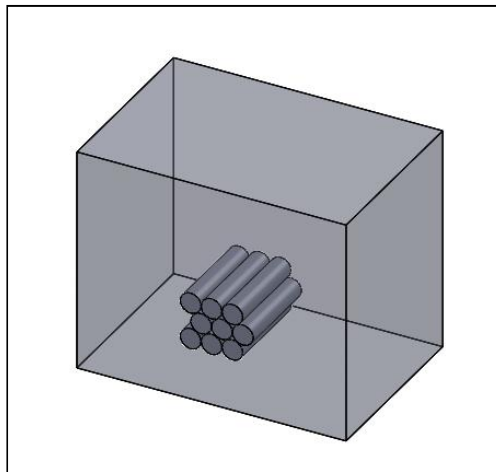


FIGURA 3.17 – Modelo geométrico do arranjo triangular com o uso de simetria.

### 3.5.2. Geração da malha

A geração da malha foi realizada no Ansys-Meshing. Durante a geração da malha cada volume de controle foi definido. Foram criados dez volumes, sendo nove cilindros e um

hexaedro. Para a configuração 1, três barras apenas, os volumes dos três cilindros são sólidos (aço AISI 1020) e os volumes dos demais seis cilindros são fluidos (ar). Para a configuração 2, seis cilindros são volumes sólidos e três cilindros são volumes fluidos, finalmente, para a configuração 3, os nove cilindros são sólidos. O volume composto pelo hexaedro é sempre um volume fluido. A malha utilizada para o arranjo quadrangular pode ser visualizada na Fig 3.18.

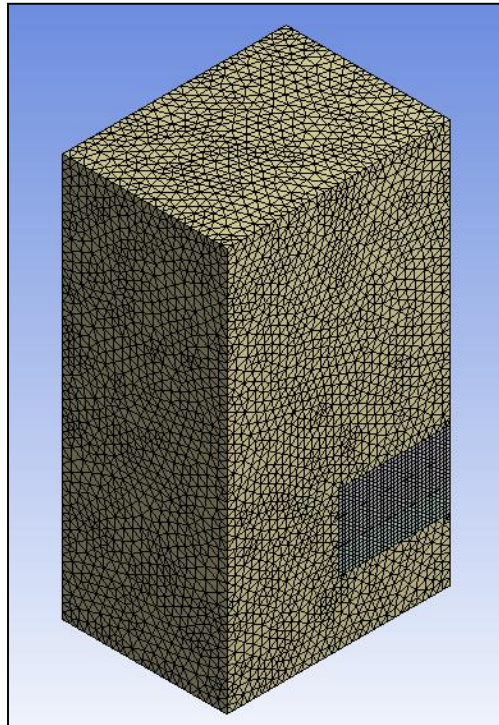


FIGURA 3.18 – Malha para o arranjo quadrangular.

A FIGURA 3.19 mostra as características da malha como, por exemplo, quantidade de nós, elementos e o critério de qualidade da malha. O gráfico da avaliação de critério de qualidade da malha é mostrado na FIGURA 3.20. Ambos os critérios foram satisfatórios, apresentando erros menores que 1% em todos os três critérios (fator de expansão, razão de aspecto e ortogonalidade) como verificado no arquivo de saída do Ansys - Solver nas FIGURAS 3.21, 3.22 e 3.23.

Details of "Mesh"	
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Si...	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Minimum Edge Le...	1,e-001 mm
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Pinch</b>	
<b>Statistics</b>	
Nodes	41779
Elements	144498
Mesh Metric	Element Quality
Min	1,40396854156496E-02
Max	0,999831038457877
Average	0,814586132757987
Standard Deviation	0,131215034517448

FIGURA 3.19 – Parâmetros utilizados na malha para o arranjo quadrangular.

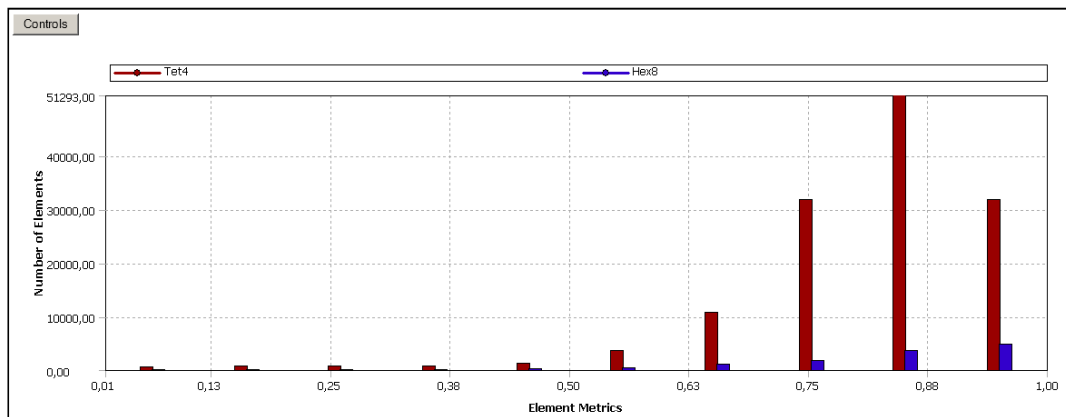


FIGURA 3.20 – Critério de qualidade da malha para o arranjo quadrangular.

Observa-se que os sinais (!), (ok) e (OK) representam a condição dos elementos, em percentual. O caso mais crítico é o sinal de exclamação (!) e o (OK) em maiúsculo representa os elementos em perfeito estado.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
FLUIDO	11.2	!		191	!		46	OK	
L4	69.3	OK		2	OK		3	OK	
L5	67.4	OK		2	OK		3	OK	
L7	73.4	OK		2	OK		2	OK	
L8	72.4	OK		2	OK		3	OK	
L1	70.1	OK		2	OK		2	OK	
L2	68.9	OK		3	OK		4	OK	
Global	11.2	!		191	!		46	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
FLUIDO	<1	4	96	1	6	93	0	0	100
L4	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L5	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L1	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L2	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Global	<1	2	98	1	4	95	0	0	100

FIGURA 3.21 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 1.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
FLUIDO	11.2	!		191	!		46	OK	
L7	73.4	OK		2	OK		2	OK	
L8	72.4	OK		2	OK		3	OK	
L1	70.1	OK		2	OK		2	OK	
L2	68.9	OK		3	OK		4	OK	
L4	69.3	OK		2	OK		3	OK	
L5	67.4	OK		2	OK		3	OK	
Global	11.2	!		191	!		46	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
FLUIDO	<1	4	96	1	6	93	0	0	100
L7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L1	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L2	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L4	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L5	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Global	<1	2	98	1	4	95	0	0	100

FIGURA 3.22 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 2.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
FLUIDO	11.2	!		191	!		46	OK	
L1	70.1	OK		2	OK		2	OK	
L2	68.9	OK		3	OK		4	OK	
L4	69.3	OK		2	OK		3	OK	
L5	67.4	OK		2	OK		3	OK	
L7	73.4	OK		2	OK		2	OK	
L8	72.4	OK		2	OK		3	OK	
Global	11.2	!		191	!		46	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
FLUIDO	<1	4	96	1	6	93	0	0	100
L1	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L2	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L4	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L5	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
L8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Global	<1	2	98	1	4	95	0	0	100

FIGURA 3.23 – Estatística da malha utilizada para o arranjo quadrangular na configuração 3.

### 3.5.3. Definições dos domínios no CFX – Pré

Características comuns às três configurações foram apresentadas na TABELA 3.2.

TABELA 3.2 – Dados comuns às três configurações.

-	Ar	Barras
Domínio	Fluido	Sólido
Tipo de domínio	Fluido contínuo	Sólido contínuo
Modelo de radiação	Monte Carlo	N.A.
Modo de transferência	Meio participante	N.A.
Modelo de transferência de calor	Energia térmica	Energia térmica
Modelo espectral	Cinza	N.A.

As definições dos volumes utilizados no *software* estão apresentadas nas TABELAS 3.3, 3.4 e 3.5 e correspondem a sequência de configuração resolvida pelo *software*. Observa-se que a simulação iniciou-se com os volumes de controle das barras da configuração 2 e 3 como sendo fluido e transformando-os em sólido a partir do momento que os mesmos são inseridos no experimento.

TABELA 3.3 – Dados iniciais do início da simulação, configuração 1.

Domínio	Tipo de domínio	Temperatura	Emissividade
Ar	Fluido	Ambiente	-
Barra 1	Sólido	150 °C	0,91
Barra 2	Sólido	150 °C	0,91
Barra 4	Fluido	Ambiente	-
Barra 5	Fluido	Ambiente	-
Barra 7	Fluido	Ambiente	-
Barra 8	Fluido	Ambiente	-

A TABELA 3.4 apresenta as informações da configuração 2. Consiste na inserção das três barras que completam a segunda linha do conjunto de barras. O *software* inicialmente considerou o volume das três barras como fluido e a partir deste momento os considerou como um volume sólido.

TABELA 3.4 – Dados da configuração 2.

Domínio	Tipo de domínio	Temperatura	Emissividade
Ar	Fluido	Resultante da configuração 1	-
Barra 1	Sólido	Resultante da configuração 1	0,91
Barra 2	Sólido	Resultante da configuração 1	0,91
Barra 4	Sólido	150 °C	0,91
Barra 5	Sólido	150 °C	0,91
Barra 7	Fluido	Resultante da configuração 1	-
Barra 8	Fluido	Resultante da configuração 1	-

A TABELA 3.5 mostra as informações da configuração 3. Consiste na inserção das três últimas barras que compõem a terceira linha do conjunto de barras. O software inicialmente considerou o volume dessas três barras como fluido e a partir deste momento os considerou como um volume sólido.

TABELA 3.5 – Dados da configuração 3.

Domínio	Tipo de domínio	Temperatura	Emissividade
Ar	Fluido	Resultante da configuração 2	-
Barra 1	Sólido	Resultante da configuração 2	0,91
Barra 2	Sólido	Resultante da configuração 2	0,91
Barra 4	Sólido	Resultante da configuração 2	0,91
Barra 5	Sólido	Resultante da configuração 2	0,91
Barra 7	Sólido	150 °C	0,91
Barra 8	Sólido	150 °C	0,91

#### 3.5.4. Solução das equações

De posse da malha, do número de nós e elementos definidos é possível transformar o conjunto de equações diferenciais parciais que regem o problema em um conjunto de equações lineares, aplicando a técnica de volumes finitos. O *software* responsável pela solução do sistema de equações é o Ansys – Solver Análise dos resultados

#### 3.5.5. Análise dos resultados

O resultado do sistema de equações é lido pelo programa Ansys – CFD-Post. Neste ambiente computacional o modelo será validado observando a distribuição de temperatura ao longo das barras e analisando gráfico como o da temperatura ao longo do tempo.

### **3.6. Teste de malha espacial e temporal**

O teste de malha espacial consiste em simular o processo para diferentes tamanhos máximo de elementos. O intuito é definir o tamanho máximo do elemento que seja capaz de representar o fenômeno físico. O mesmo procedimento foi realizado para o teste de malha temporal, contudo, a variável a ser monitorada foi o passo de tempo. Foram realizados cinco simulações com diferentes malhas e passo de tempo para definir as duas variáveis.

### **3.7. Modelos 2D e 3D**

Para o modelo diferencial 2D foi utilizado um plano com 1mm de espessura para representar geometricamente o conjunto de barras. A condição de simetria foi imposta para representar a continuidade do conjunto de barras

O modelo diferencial 3D representa fielmente toda a geometria e nenhuma condição de contorno adicional foi necessária para sua utilização.

A FIGURA 3.24 apresenta os modelos 2D e 3D que foram utilizados para o modelo matemático diferencial.

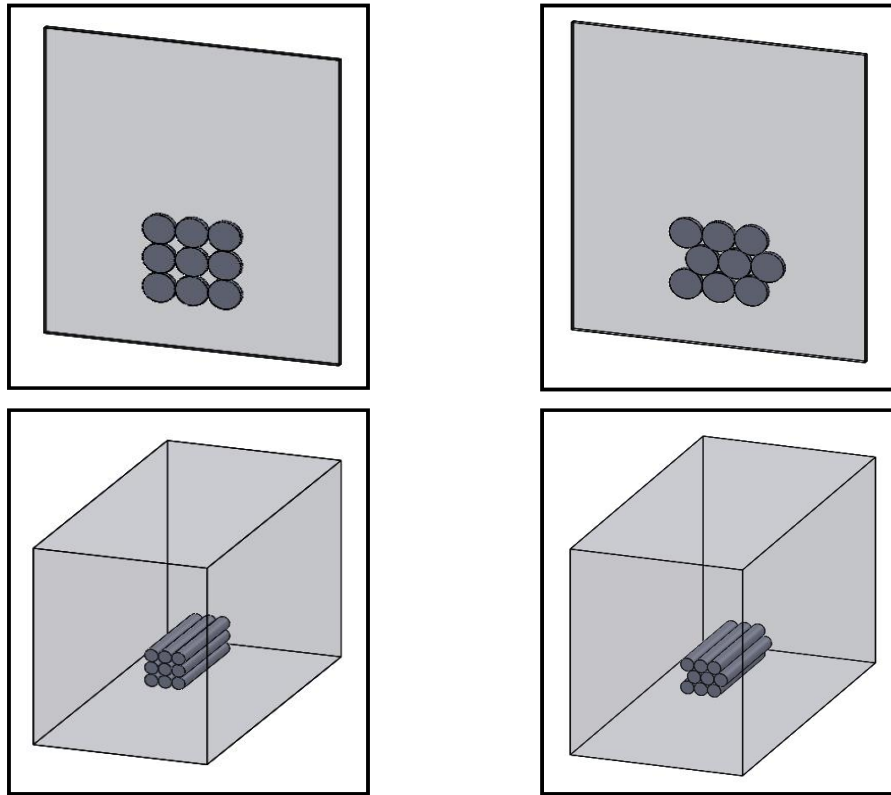


FIGURA 3.24 – Modelos 2D e 3D dos arranjos, quadrangular e triangular.

### 3.8. Validação e critério do modelo

Foi realizado um experimento em escala reduzida que foi utilizado para a validação do modelo integral do EES e dos modelos diferenciais, 2D e 3D, no Ansys-CFX. O parâmetro utilizado para comparar o experimento e os modelos é a distribuição de temperatura ao longo dos 2700 segundos de experimento.

O critério adotado para qualificar o modelo como satisfatório foi de diferença percentual, entre a temperatura do experimento e do modelo numérico, média e máxima de 10% e 15% respectivamente.

### 3.9. Modelo integral no EES em escala real

A princípio dois modelos integrais em escala reduzida, arranjo quadrangular e triangular, foram criados para auxiliar na elaboração do modelo integral em escala real, visto que o custo do teste em escala real é alto.

O teste foi executado na Vallourec do Brasil com 63 barras dispostas umas sobre as outras como no arranjo triangular. Foram posicionados dez termopares entre os lingotes, visando captar a temperatura do lingote mais próximo como mostrado na FIGURA 3.25. Os termopares foram conectados ao registrador de temperatura, um registrador de temperatura, onde posteriormente os dados coletados foram lidos e transferidos para um computador.

As barras foram posicionadas e enumeradas da esquerda para a direita e começando da fileira inferior para a superior. A cada carregamento foram posicionados 4 lingotes, sendo que o último carregamento para completar a fileira foram necessários apenas 3 lingotes.

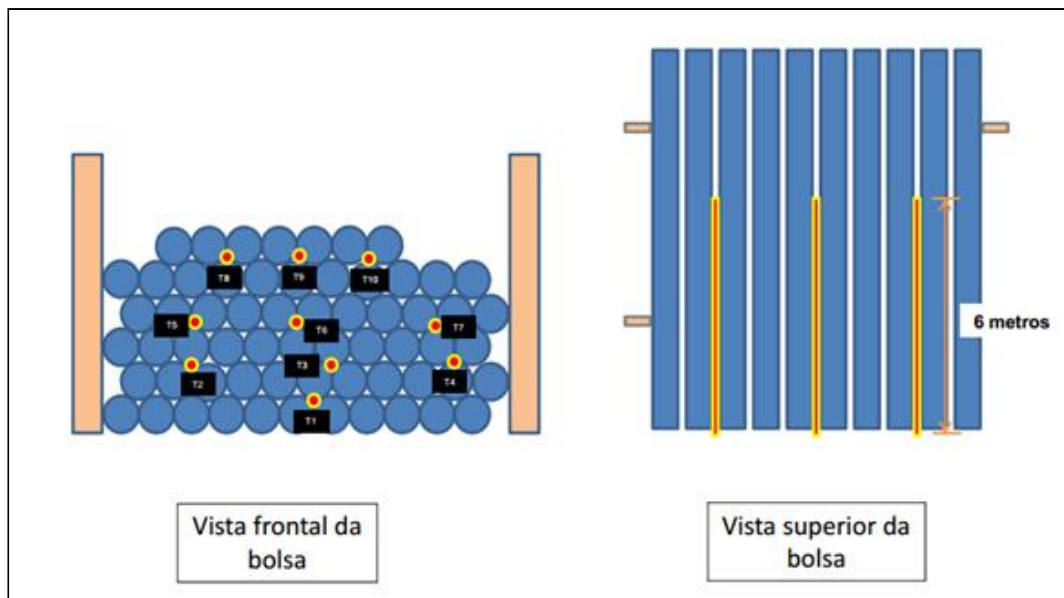


FIGURA 3.25 – Distribuição dos lingotes e termopares no experimento em escala real.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Teste de malha: espacial e temporal

Para a utilização do modelo diferencial Ansys – CFX foi realizado o teste de malha para garantir que o resultado da simulação seja independente da malha. Para o presente estudo faz-se necessário também o teste de malha temporal visto que a simulação foi executada em regime transiente.

Foram realizadas as simulações para o teste de malha espacial como apresentados na TABELA 4.1.

TABELA 4.1 – Condições gerais das malhas submetidas ao teste de malha.

Malha	Relevância	Tipo de malha	Número de elementos	Número de nós
1	0	Grosseira	90638	34992
2	0	Intermediária	102309	37191
3	0	Refinada	144498	41779
4	20	Refinada	188197	53586

Os resultados do teste de malha espacial para as malhas 1, 2, 3 e 4 para as barras 1, 4 e 7 são apresentados nas Fig 4.1, 4.2 e 4.3.

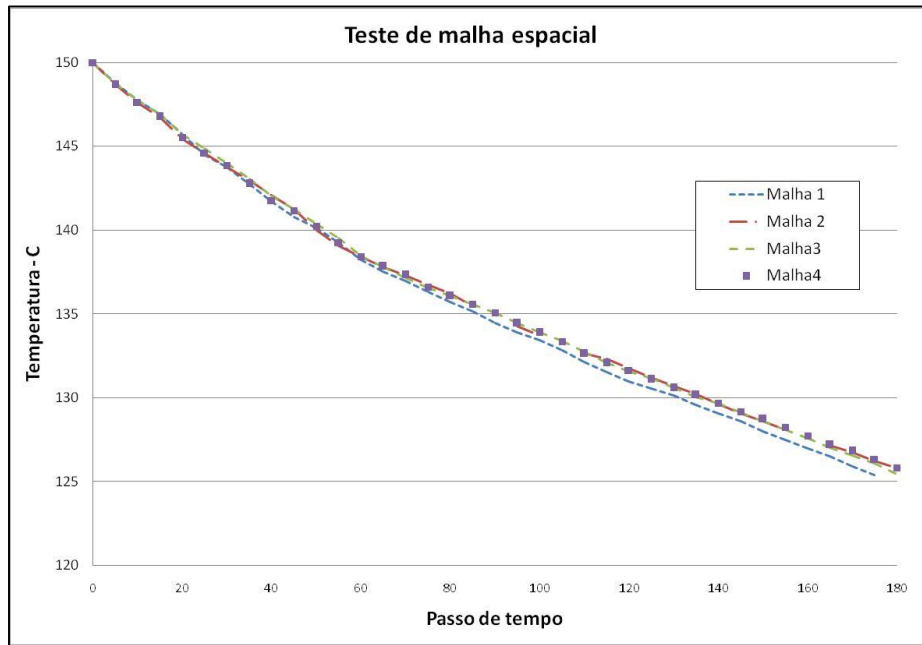


FIGURA 4.1 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 1.

Observa-se que para a barra 1 a tendência foi que as curvas se aproximem de acordo com o refinamento de cada malha. Na FIGURA 4.1 as Malhas 1 e 2 apresentam-se mais afastadas das Malhas 3 e 4.

A FIGURA 4.2 apresenta o resultado do teste de malha espacial para a barra 4.

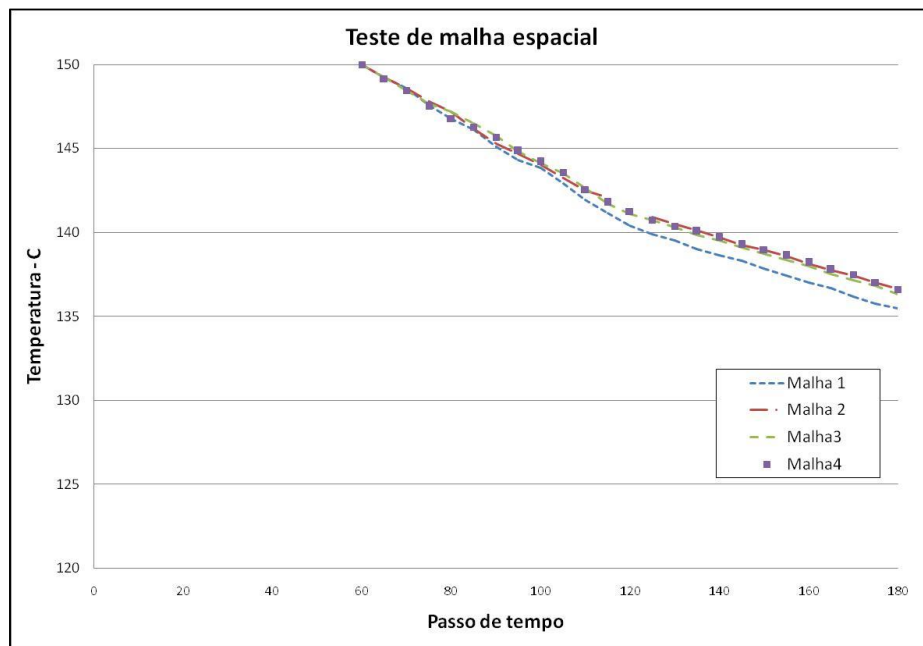


FIGURA 4.2 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 4.

Nota-se que para a barra 4 novamente as Malhas 1 e 2 apresentam-se mais afastadas das Malhas 3 e 4.

A FIGURA 4.3 mostra o resultado do teste de malha espacial para a barra 4.

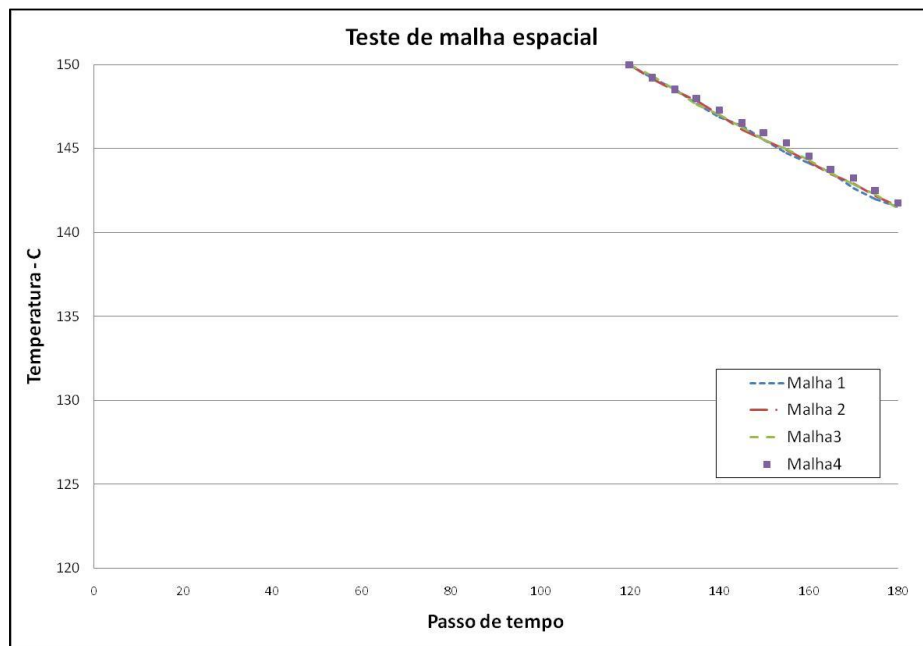


FIGURA 4.3 – Resultado do teste de malha espacial para a barra 7.

Para a barra 7 todas as malhas obtiveram valores bem próximos.

Os resultados mostram que houve pouca variação da temperatura em função do número de elementos ou do número de nós. A malha 3 foi a escolhida por ser uma malha gerada com o critério de malha refinada, resultados intermediários as demais malhas e baixo custo computacional.

O teste de malha temporal foi realizado seguindo os parâmetros apresentados na TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – Condições de passo de tempo para o teste de malha

Passo de tempo	Número de iterações Configuração 1	Número de iterações Configuração 2	Número de iterações Configuração 3
90	3	7	30
60	5	10	45
30	10	20	90
15	20	40	180
5	60	120	540

O resultado do teste de malha temporal para as barras 1, 4 e 7 para cada passo de tempo pode ser visualizado nas Fig 4.4, 4.5 e 4.6.

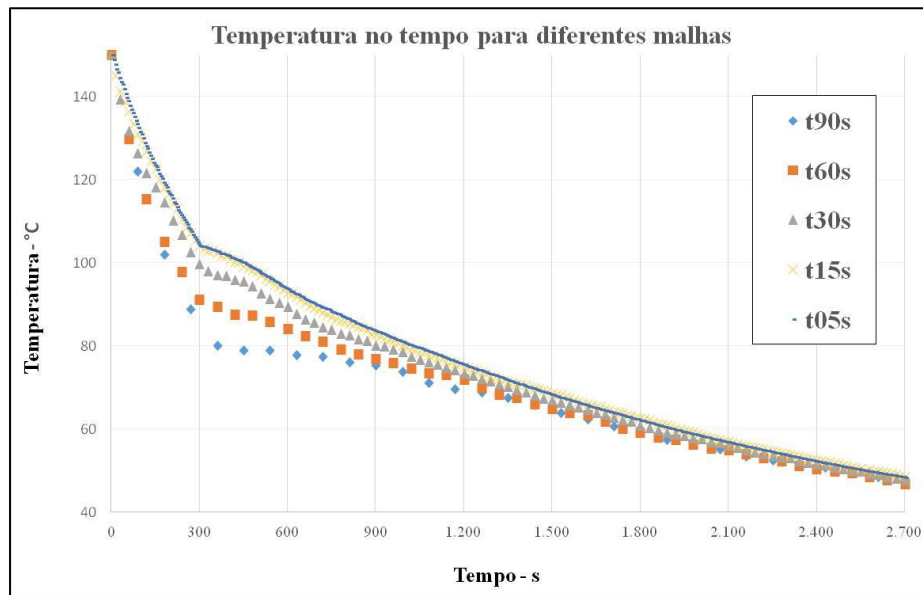


FIGURA 4.4 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 1

Nota-se para a barra 1 que a redução do passo de tempo tende para o resultado dado pelo passo de tempo de 5 segundos.

A FIGURA 4.5 apresenta o resultado do teste de malha temporal para a barra 4.

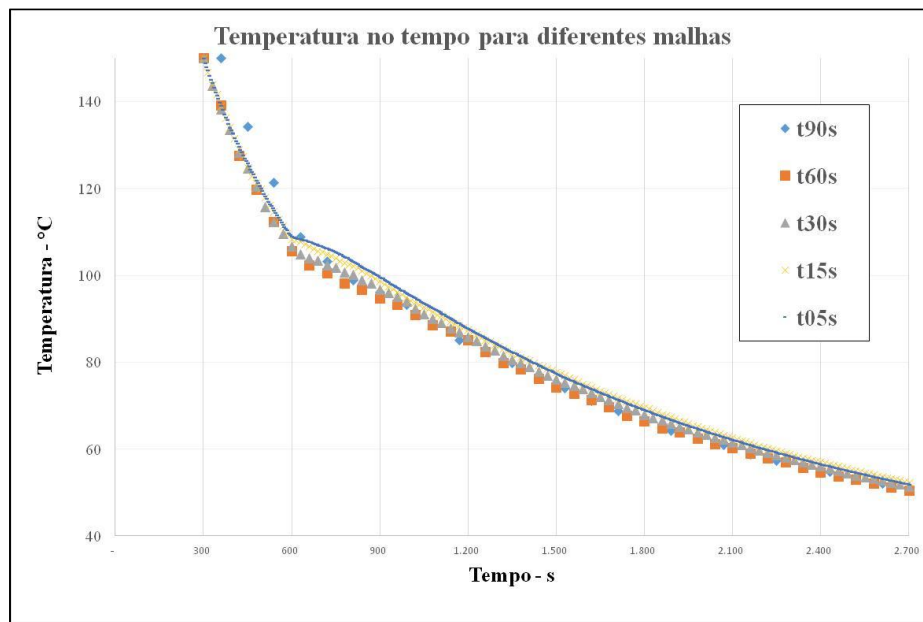


FIGURA 4.5 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 4

Novamente foi possível observar que, para a barra 4, a redução do passo de tempo tende para o resultado dado pelo passo de tempo de 5 segundos.

A FIGURA 4.6 mostra o resultado do teste de malha temporal para a barra 4.

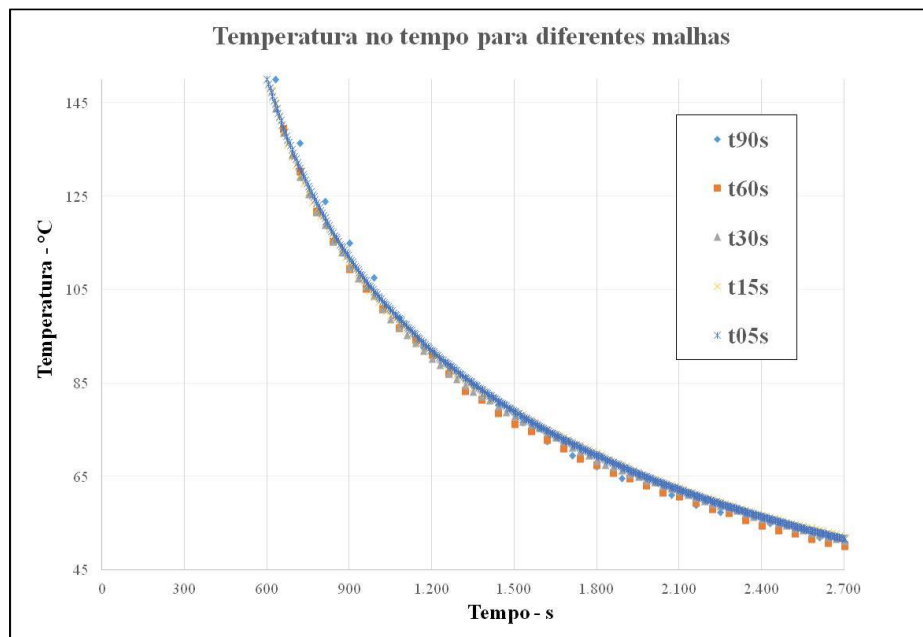


FIGURA 4.6 – Resultado do teste de malha temporal para a barra 7

O resultado apresentado para a barra 7 foi muito próximo para qualquer passo de tempo.

O passo de tempo definido com base no resultado do teste de malha temporal e a estrutura utilizada para simulação foi com o passo de tempo de 5 segundos.

Logo as simulações foram realizadas com o tamanho da Malha 3 (144498 elementos e 41779 nós) e com o passo de tempo de 5 segundos.

## 4.2. Arranjo quadrangular

Foram realizados cinco experimentos para o arranjo quadrangular. Os resultados das barras 1, 4 e 7 a partir da medição de temperatura com o termopar e da análise termográfica foram comparados com os resultados dos modelos matemáticos (modelo integral, modelo diferencial 2D e modelo diferencial 3D). A FIGURA 4.7 apresenta um comparativo entre os modelos.

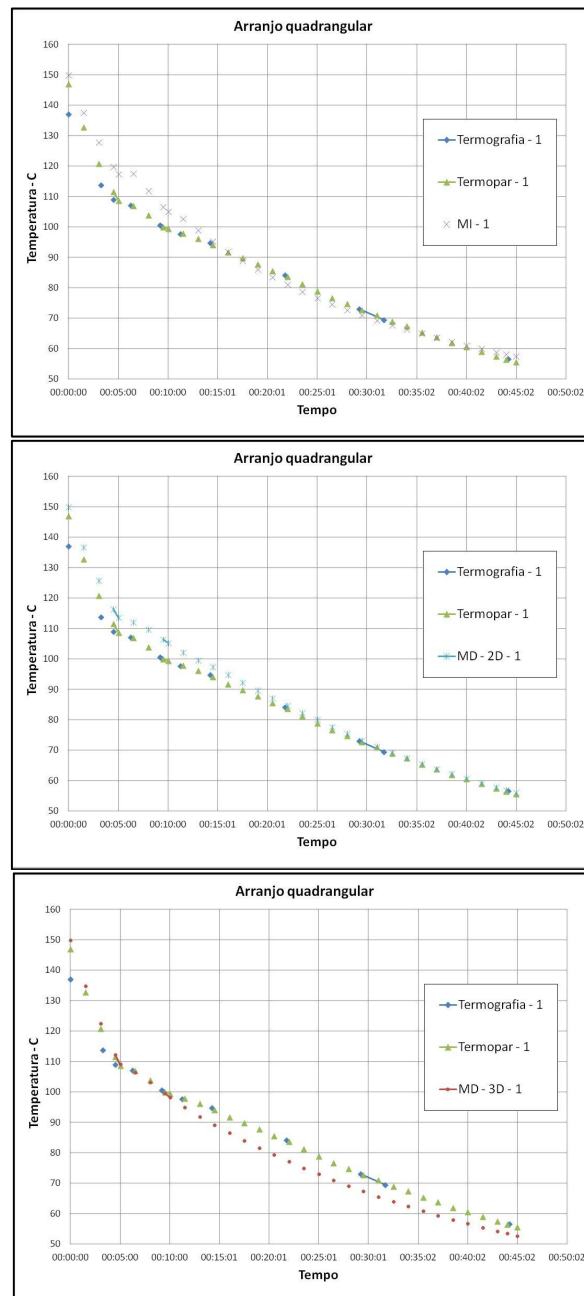


FIGURA 4.7 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 1

Para a barra 1, a máxima diferença entre o resultado experimental e o modelo numérico foi de 12,8 %, para o modelo integral, enquanto que a menor média das diferenças de temperaturas foi observada no modelo diferencial 2D, 2,1 %.

A FIGURA 4.8 exibe os resultados encontrados para a barra 4.

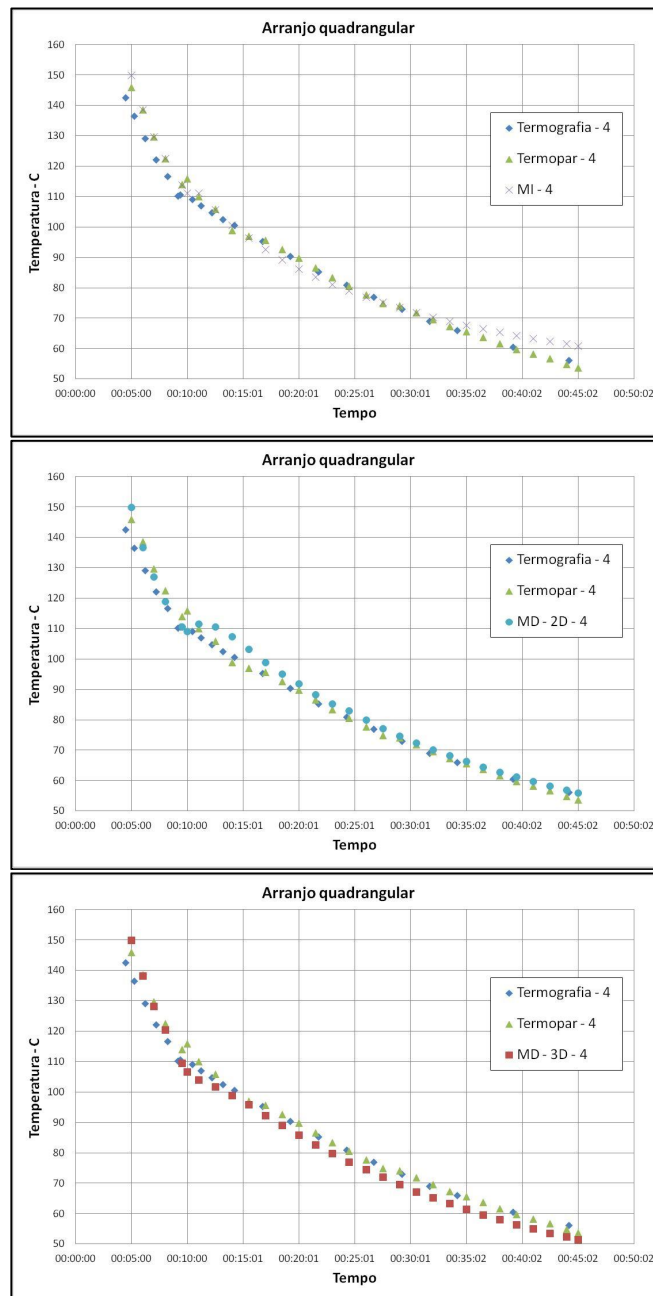


FIGURA 4.8 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 4

A maior diferença ficou novamente com o modelo integral, 13,4 % enquanto que a menor média das diferenças de temperaturas foi encontrada no modelo diferencial 2D, 2,6 %.

A FIGURA 4.9 apresenta os resultados para a barra 7.

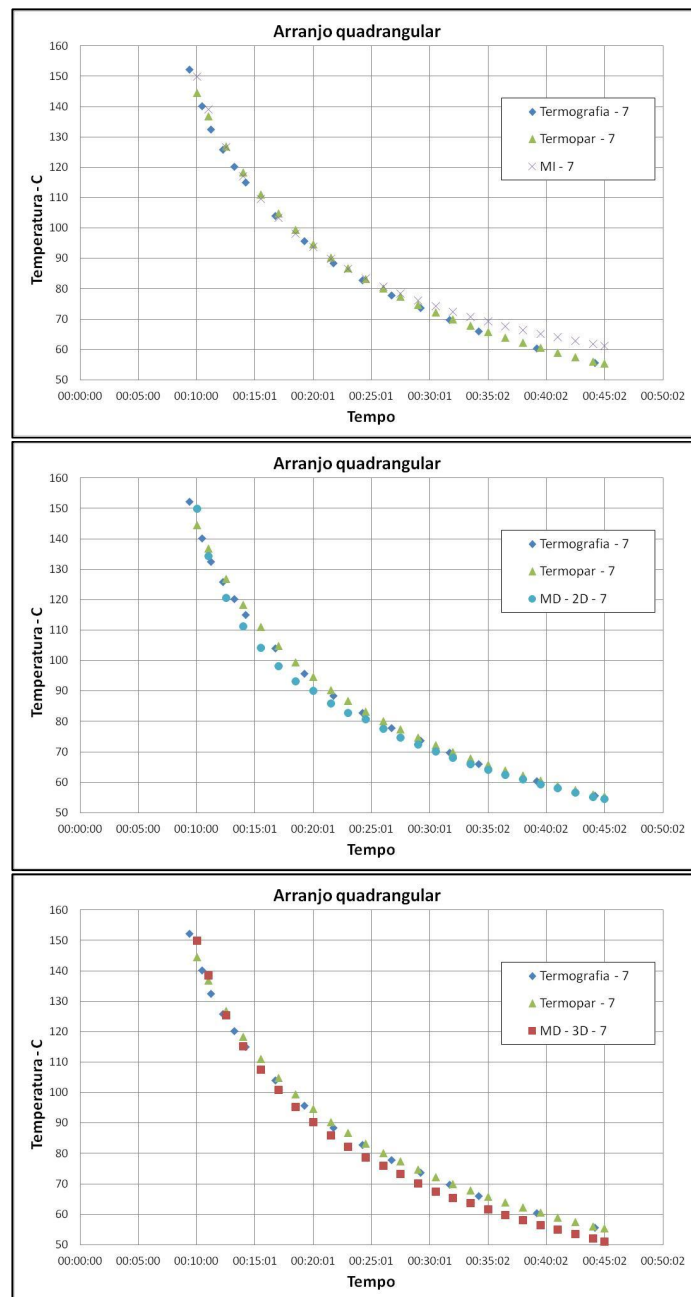


FIGURA 4.9 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, com os modelos integral, diferencial 2D e 3D para a barra 7

A máxima diferença foi observada novamente no modelo integral, 10,7%, e a menor média das diferenças de temperaturas foi encontrada nos modelos integral e diferencial 2D, 3,5 %.

O modelo integral apresentou bons resultados, no entanto os melhores resultados foram encontrados para os modelos diferenciais, sendo que, o modelo 2D foi o que apresentou melhor resultado como mostrado na TABELA 4.3. Os critérios adotados para classificar os modelos como satisfatório foram o de diferença de temperatura média e máxima entre o experimento e cada modelo de 5% e 15% respectivamente.

TABELA 4.3 - Diferença percentual entre os modelos matemáticos e as medições no termopar e na termocâmara.

Modelo	Máximo ( % )	Médio ( % )	Validado
Integral - barra 1	12,8	3,2	Sim
Integral - barra 4	13,4	3,3	Sim
Integral - barra 7	10,7	3,5	Sim
Diferencial 2D - barra 1	6,8	2,1	Sim
Diferencial 2D - barra 4	8,4	2,6	Sim
Diferencial 2D - barra 7	6,5	3,5	Sim
Diferencial 3D - barra 1	7,9	5,2	Não
Diferencial 3D - barra 4	8,0	4,5	Sim
Diferencial 3D - barra 7	7,6	5,2	Não

### 4.3. Arranjo triangular

O mesmo procedimento foi realizado para o arranjo triangular. A FIGURA 4.10 apresenta um comparativo para a barra 1.

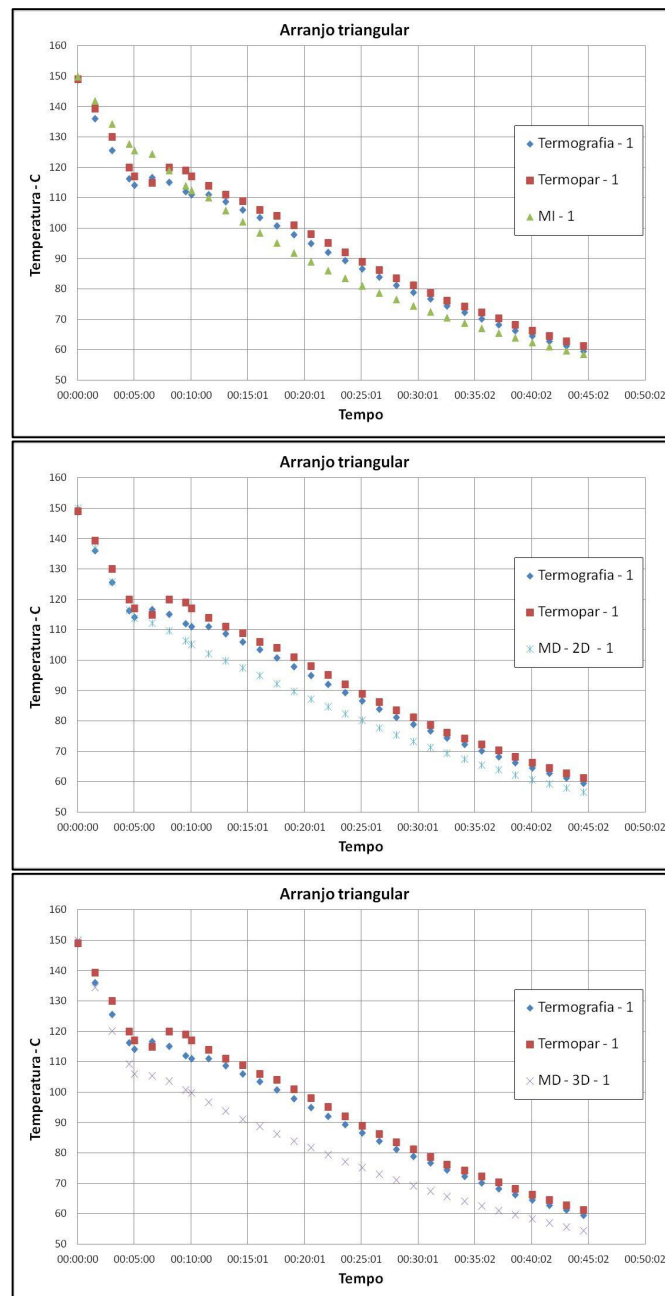


FIGURA 4.10 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 1.

Observou-se uma menor diferença média para o modelo integral, 6,4%. A FIGURA 4.11 mostra um comparativo para a barra 4.

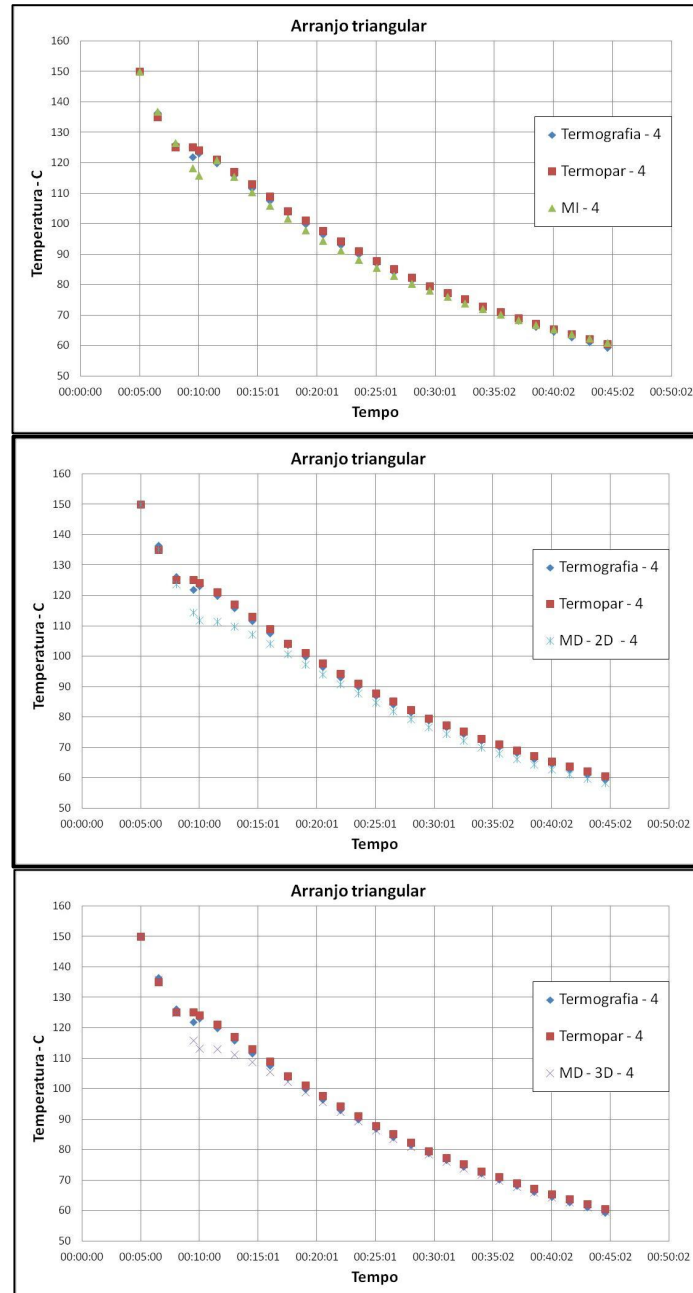


FIGURA 4.11 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 4.

Os três modelos apresentaram diferenças inferiores a 5%. Sendo que o modelo diferencial 3D apresentou a maior diferença 4,1%. O comparativo para a barra 7 e o modelo integral foi apresentado na FIGURA 4.12.

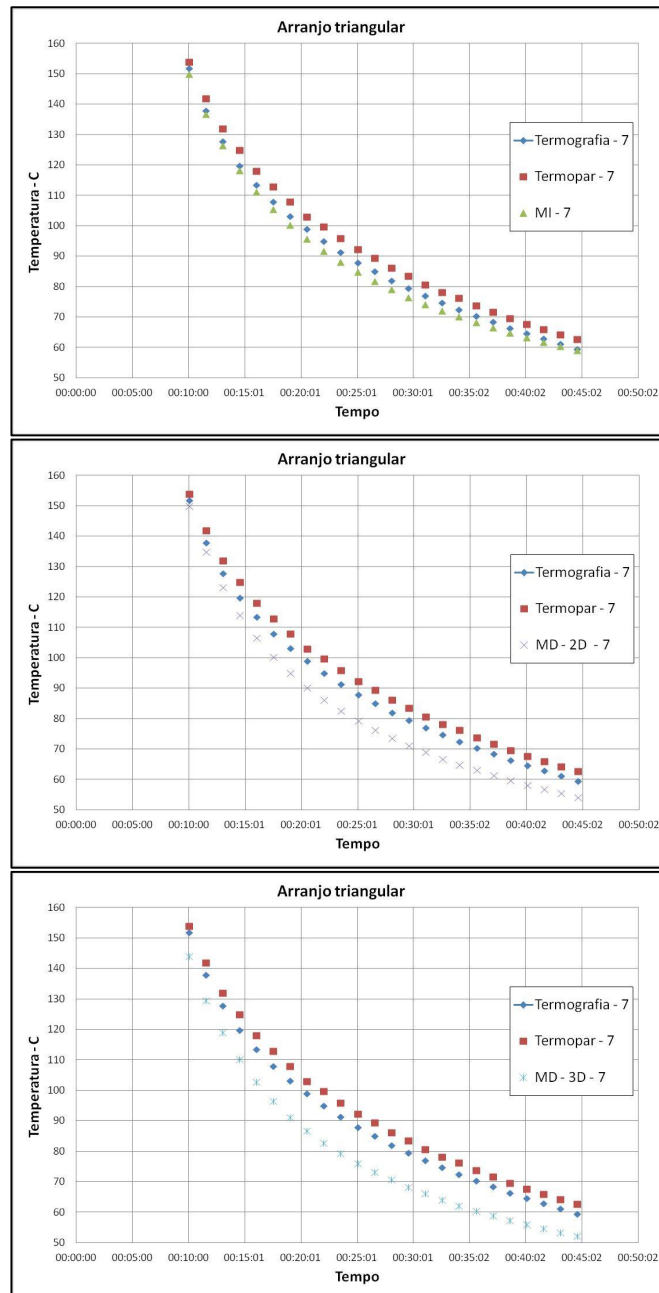


FIGURA 4.12 – Comparativo entre os resultados das medições experimentais, termografia e termopar, e modelo integral para a barra 7.

O quadro comparativo entre os modelos matemáticos e as medições no termopar e na termocâmara foram apresentados na TABELA 4.4.

TABELA 4.4 - Diferença percentual entre os resultados experimentais e os modelos numéricos.

Modelo	Máximo ( % )	Médio ( % )	Validado
Integral - barra 1	13,1	6,4	Sim
Integral - barra 4	6,6	1,8	Sim
Integral - barra 7	8,6	6,9	Sim
Diferencial 2D - barra 1	17,0	13,2	Não
Diferencial 2D - barra 4	8,7	2,3	Sim
Diferencial 2D - barra 7	15,0	12,5	Sim
Diferencial 3D - barra 1	11,3	8,5	Sim
Diferencial 3D - barra 4	10,0	4,1	Sim
Diferencial 3D - barra 7	18,3	15,9	Não

O tempo de processamento para cada modelo foi como apresentado na TABELA 4.5

TABELA 4.5 – Tempo de processamento de cada modelo.

Modelo	Tempo de processamento - hh:mm
Integral	00:02
Diferencial 2D - Quadrangular	03:10
Diferencial 2D - Triangular	03:13
Diferencial 3D - Quadrangular	11:48
Diferencial 3D - Triangular	23:55

A média da temperatura encontrada nas termografias assim como suas incertezas de medição foi comparada com as medias das temperaturas das barras em cada instante para os modelos matemáticos. As FIGURAS 4.13, 4.14 e 4.15 mostram as diferenças encontradas entre o resultado experimental, análise termográfica e os modelos, integral e diferencial.

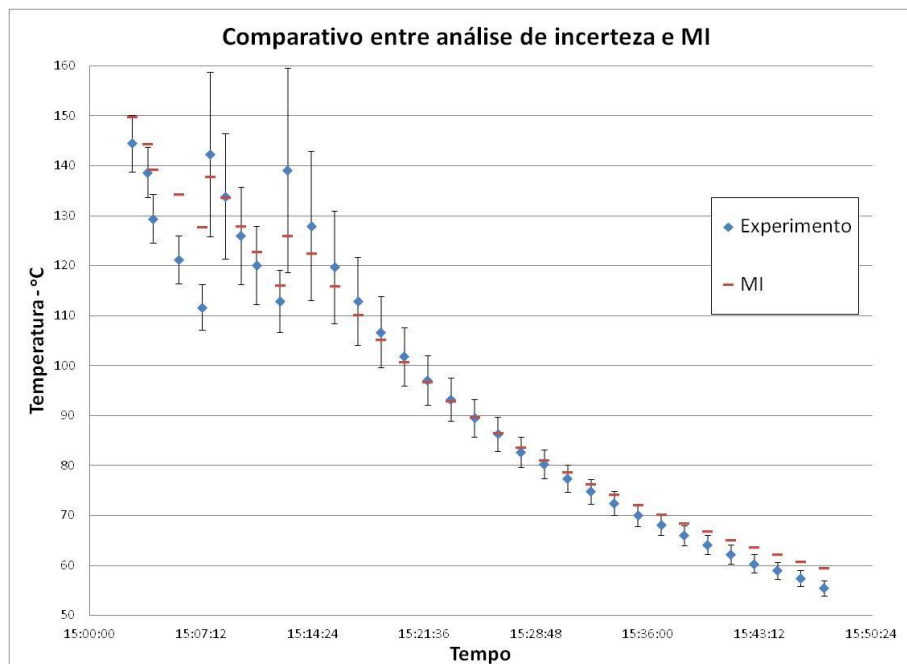


FIGURA 4.13 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo integral

Nota-se que o resultado apresentado pelo modelo ficou entre a incerteza de medição, mínima e máxima, para grande parte do experimento. FOI possível observar que o resultado divergiu para o instante que antecede o segundo carregamento (10 minutos) e após os 35 minutos de experimento.

A FIGURA 4.27 apresenta o resultado da análise de incerteza e do modelo 2D.

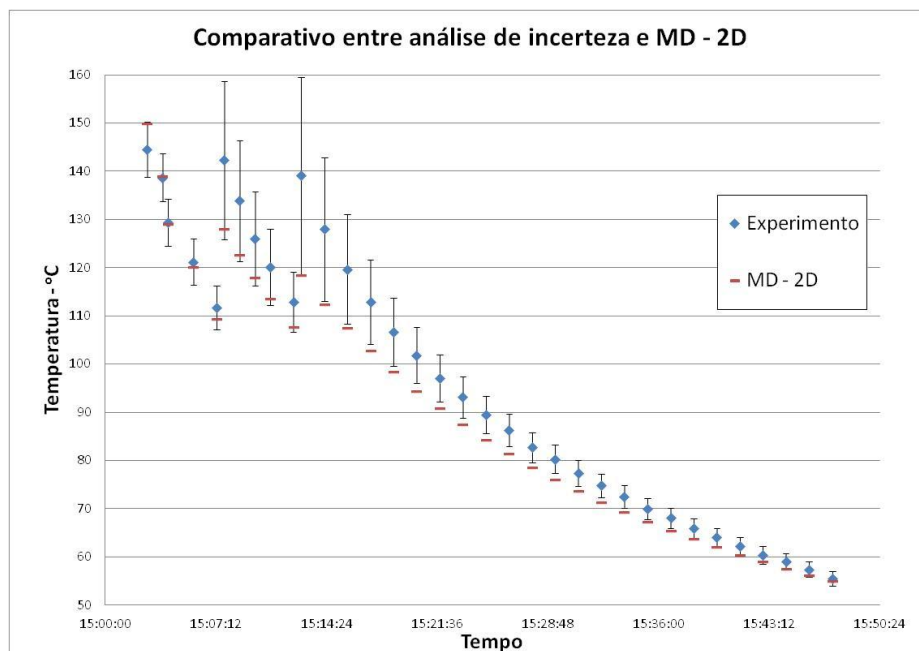


FIGURA 4.14 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo diferencial – 2D

Foram apresentados resultados fora da faixa de incerteza de medição do experimento no período entre 11 e 35 minutos. No entanto foram valores próximos da faixa de incerteza e que pouco compromete os resultados.

A FIGURA 4.28 mostra o resultado da análise de incerteza e do modelo 3D.

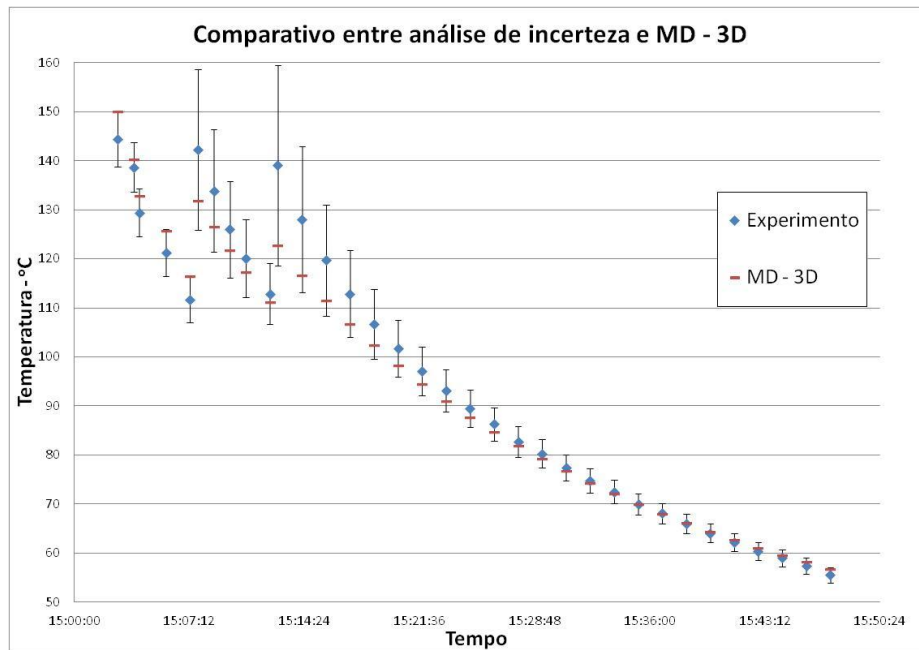


FIGURA 4.15 – Comparativo entre análise de incerteza para termografia e o modelo diferencial – 3D

O modelo 3D apresentou resultados dentro da faixa de incerteza para todo o experimento.

#### 4.4. Comparativo entre o experimento em escala real e o modelo integral

No experimento realizado na Vallourec do Brasil em 24/01/2013 foram utilizados dez termopares, sendo posicionados como mostrado na FIGURA 4.21. Foram coletadas as temperaturas de cada termopar durante dois dias. Por medida de segurança, as barras devem permanecer com temperatura igual ou inferior a 70 °C para que possam ser manuseadas.

A FIGURA 4.16 apresenta o posicionamento dos termopares no experimento realizado na Vallourec do Brasil.

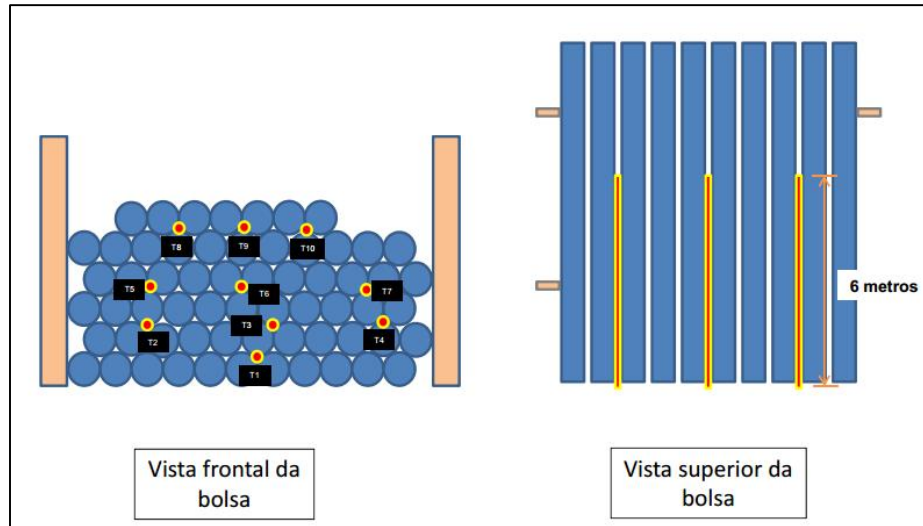


FIGURA 4.16 – Posicionamento dos termopares no experimento realizado na Vallourec do Brasil.

A FIGURA 4.17 apresenta o resultado encontrado pelo modelo integral para o experimento em escala real.

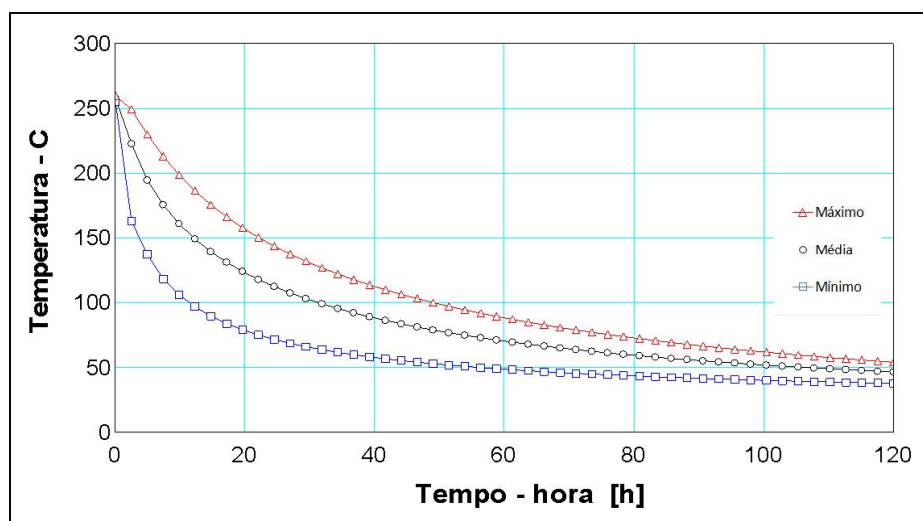


FIGURA 4.17 – Resultado do modelo integral para o experimento em escala real

A TABELA 4.6 mostra o quadro comparativo entre o tempo registrado para o resfriamento do modelo integral, temperatura inicial do conjunto de barras de aço foi de 260 °C e o tempo de resfriamento lento no ambiente para que as barras atingissem 70 °C foi de 61,3 horas. O resultado experimental encontrado na Vallourec do Brasil foi de 70,1 horas. A temperatura de 70 °C foi determinada devido a fatores de segurança durante o manuseio. O experimento foi realizado com lingotes de aço (barras de aço com comprimento de 12,3m e diâmetro de 230mm).

TABELA 4.6 – Quadro comparativo entre modelo integral e experimento em escala real

	Temperatura	Tempo de resfriamento - horas
Experimento em escala real	70 °C	70,1
MI - Temperatura mínima	70 °C	27
MI - Temperatura média	70 °C	61,3
MI - Temperatura máxima	70 °C	85,7

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a simulação de resfriamento de barras empilhadas em instantes de tempo diferente com a mesma temperatura inicial.

A equação da energia foi resolvida utilizando um modelo integral e um modelo diferencial. O modelo integral possui uma formulação mais simples, utilizando valores médios para definir a temperatura da barra e do ambiente, e com um custo computacional de apenas três segundos.

Os resultados dos modelos foram validados com os experimentos realizados no laboratório da Universidade Federal de Minas Gerais, GAMSET – Grupo de Análise Matemática de Sistemas e Equipamentos Térmicos.

O modelo diferencial possui uma formulação completa para a solução da equação da energia, da quantidade de movimento e da continuidade. O modelo diferencial se propõe a uma solução mais robusta e por isso há um custo computacional elevado. Sendo o tempo médio da simulação de aproximadamente 7 horas para o modelo diferencial 2D e de 25 horas para o modelo diferencial 3D.

Observa-se no modelo integral que o coeficiente de transferência de calor,  $h$ , foi subestimado para a configuração quadrangular, sendo assim, na simulação a temperatura da barra foi sempre superior a medida. Nos instantes onde há uma perturbação do sistema com a inserção das barras, nota-se que o comportamento do modelo integral foi com um degrau maior em relação ao experimento e o modelo diferencial.

Para a configuração triangular os resultados apresentaram diferenças maiores devido a maior dificuldade de estimar o coeficiente de transferência de calor,  $h$ , e, portanto apresentou no pior caso, uma diferença de 18 %.

O modelo integral foi utilizado na Vallourec do Brasil e mostrou que o valor medido pela siderúrgica, 70,1 horas para as temperaturas média das barras alcançarem 70 °C, ficou no intervalo encontrado pelo modelo integral que foi entre 61,3 e 85,7 horas.

Como sugestões de trabalhos futuros podem ser indicados.

- Cálculo do fator de forma e do coeficiente de transferência de calor para as cavidades.
- Ao invés de considerar o resfriamento do conjunto de barras como a soma do resfriamento de cada barra isolada, utilizar as equações de placa plana.
- Implementar o modelo integral para atuar na linha de produção da Vallourec durante a atividade de resfriamento, “implementação online”.
- Realizar novas medições durante o resfriamento do conjunto de barras para que o modelo seja ajustado e consiga resultados mais próximos.

## REFERÊNCIAS

ABNT, I., & SBM, P.R.-M., 2008. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. 3ª Edição brasileira, Edição revisada, Rio de Janeiro.

ALBERTAZZI G. Jr., Armando, SOUSA, André R. de. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 1.ed. Editora Manole, 2012. 408p

ASSUNÇÃO, C. S., FRANÇA, G. A. C., ANDRADE, R. M., *Glendon siderúrgico: Análise termodinâmica e modelagem matemática simplificada*. Dissertação apresentada a UFMG. 2006.

BAIRI, A., LARAQI, N., GARCÍA, M. J., *Numerical and experimental study of natural convection in tilted parallelepipedic cavities for large Rayleigh numbers*. *Experimental thermal and fluid science*, 31(4), 309-324. 2007.

BOPCHE, S.B., & SRIDHARAN, A., 2010. *Analytical expressions for configuration factor between cylindrical surfaces in rod bundle geometry*. *Nuclear Engineering and Design*, 240(10), 3020-3036.

BOPCHE, S.B., & SRIDHARAN, A., 2009. *Determination of view factors by contour integral technique*. *Annals of Nuclear Energy*, 36(11), 1681-1688.

BORGNAKKE, C., & SONNTAG, R.E., *Fundamentals of thermodynamics*, Wiley New York, 2009.

BOSCH, C., DELAFOSSE D., LONGAYGUE X., *Effects of strain and trapping on hydrogen-induced cracking in high strength low alloy steels*. European corrosion congress, vol. 3; 2010.

CALLISTER, Jr.: W.D.. *Ciência e engenharia de materiais: introdução* 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008, 705p.

CASTANEDO, C.I. *Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography: Depth retrieval with the phase*. Thèse (obtention grade de Philosophie Doctor Ph.D.) Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec. Oct 2005.

CAVACO, M. A. M., *Metrologia*. LAB METRO, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, 162p.

DEVADAS, C., BARAGAR, D., RUDDLE, G., SAMARASEKERA, I., & Hawbolt, E., *The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling: Part II. Factors influencing rolling loads*. Metallurgical Transactions A, 22(2), 321-333. 1991.

DONG C.F., LIU Z.Y., LI X.G., CHENG Y.F., *Effects of hydrogen charging on the susceptibility of x100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking*. International Journal Hydrogen Energy 2009.

FILHO, C. J. C., GONZALES, B., *Efeito do tempo de estocagem, após resfriamento, na redução de área na estrição e no teor de hidrogênio em fio-máquina de aço alto carbono*. Dissertação apresentada a UFMG, 2008.

HEJAZI, D., HAQ, A., YAZDIPOUR, N., DUNNE, D., CALKA, A., BARBARO, F., PERELOMA, E., *Effect of manganese content and microstructure on the susceptibility of X70 pipeline steel to hydrogen cracking*. Materials Science and Engineering: A, 551, 40-49. 2012.

HEMADRI, Vadiraj A. et al. (2010). *Thermal radiators with embedded pulsating heat pipes: Infra-red thermography and simulations*. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, UP 208016, India. Applied Thermal Engineering, 2011, vol.31(6-7), p.1332 – 1346.

INCROPERA, F. P., DeWitt, D. P., *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003, 698p.

JANG, Jiin-Yuh e CHIU, Yu-Wei (2006). *Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating*. Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan, 27 (2007) 1883–1894.

JANSSEN, R., HENKES, R., & HOOGENDOORN, C., *Transition to time-periodicity of a natural-convection flow in a 3D differentially heated cavity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 36(11), 2927-2940. 1993.

JIN T.Y., LIU Z.Y., CHENG Y.F., *Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of api5l x100 steel*. International Journal Hydrogen Energy 2010.

KHADEM, H.B. *Prediction of heat transfer in steel slab in rolling stand*, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Isfahan Universidade de Tecnologia, Iran, 1998.

KURZ, W., & FISHER, D.J., *Fundamentals of solidification*. Trans Tech Publications Ltd, Trans Tech House, 4711, Aedermansdorf, Switzerland, 1986. 244.

LEE, C., PARK, S., WON, J., JEOUNG, J., SOHN, B., & CHOI, H., *Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel*. Renewable Energy, 42, 11-22. 2012.

LEE, H., *Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments*. Materials Science and Engineering: A, 445, 328-335. 2007.

LUOZZO, N. Di. et al. (2011). *Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation*. Laboratorio de Sólidos Amorfos.

MALDAGUE, X.P. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: Wiley & Sons, 2001.

MANSOURI, N., MIRHOSSEINI, M., & SABOONCHI, A., *Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process*. Applied Thermal Engineering, 38, 91\_104. 2012.

MARIO, Mauro. *Uso da Termografia Como Ferramenta não Destrutiva para Avaliação de Manifestações Patológicas Ocultas*. Disponível em <http://www.lume.ufrgs.br>. Acesso em 01/12/2013.

NOBARI, A., & SERAJZADEH, S., *Modeling of heat transfer during controlled cooling in hot rod rolling of carbon steels*. Applied Thermal Engineering, 31(4), 487-492. 2011.

PATANKAR, S., Numerical heat transfer and fluid flow, 1980.

RIBEIRO, A. S. – *Método de Monte Carlo: Abordagem alternativa ao GUM*. Tese de Doutorado em Física. Universidade de Lisboa (Portugal). 2006.

SAURY, D., BENKHELIFA, A., & PENOT, F., *Experimental determination of first bifurcations to unsteady natural convection in a differentially-heated cavity tilted from 0° to 180°*. Experimental thermal and fluid science, 38, 74-84. 2012.

SIEGEL, R., & HOWELL, J.R., *Thermal radiation heat transfer*, 4th edition, 1992, p.847.

SILVA, A. L. V. C., MEI, P. R., *Aços e ligas especiais*. 2<sup>a</sup> ed., São Paulo: Blucher, 2006, 694p.

TANENBAUM, A., CHIAVERINI, V. *Tratamentos Térmicos de Ligas Ferrosas*. Editora da ABM, 2<sup>a</sup> edição, 1987.

TAVARES, S. G. *Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TEIXEIRA, G. G. D., *Confiabilidade Metrológica Em Termografia Aplicada Em Sistemas Elétricos*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TRIAS, F., GOROBETS, A., SORIA, M., & OLIVA, A., *Direct numerical simulation of a differentially heated cavity of aspect ratio 4 with Rayleigh numbers up to 1011–Part II: Heat transfer and flow dynamics*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(4), 674-683. 2010.

VERSTEEG, H., & MALALASEKERA, W. *An Introduction to CFD. The Finite Volume Method*: Longman, London. 1995.

ZEITOUN, O., ALI, M., & NUHAIT, A., *Convective heat transfer around a triangular cylinder in an air cross flow*. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(9), 1685-1697. 2011.

ZHANG, Y., ZHANG, H., WANG, G., & HU, S., *Application of mathematical model for microstructure and mechanical property of hot rolled wire rods*. *Applied Mathematical Modelling*, 33(3), 1259-1269. 2009.