

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PATERNAK DE SOUZA BARROS

Influência Da Convecção Forçada Em Juntas Soldadas

Recife
2015

PATERNAK DE SOUZA BARROS

Influência Da Convecção Forçada Em Juntas Soldadas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:
Materiais e Fabricação

Orientador:
Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Recife
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B277i Barros , Paternak de Souza.
Influência da convecção forçada em juntas soldadas / Paternak de Souza
Barros. - Recife: O Autor, 2015.
82 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Convecção. 3. Campo de Temperatura. 4.
Soldagem. 5. Redução da ZTA. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti.
(Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-190

19 de junho de 2015

“INFLUÊNCIA DA CONVECÇÃO FORÇADA EM JUNTAS SOLDADAS”

PATERNAK DE SOUZA BARROS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
ORIENTADOR PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. THEOPHILO MOURA MACIEL (UFPE)

Dedico esta dissertação à Ogum.
Guia no desconhecido, Luz na Escuridão.

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece as seguintes pessoas, grupos e instituições:

Professor Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, pela paciência e compreensão.

Dr. (s) Euclides, Antonino e Roberto pelo suporte nos experimentos.

Mestre Felipe, pelo material cedido.

Alunos, Daniel e Guilherme, os quais auxiliaram nos experimentos.

Equipe MANGUE BAJA pelo suporte e materiais cedidos.

Técnicos Janaina e Ivaldo, pelo suporte nas micrografias.

CNPq, pelo financiamento dos equipamentos e pela bolsa de estudos.

PPGEM e a UFPE pelo apoio e incentivo.

RESUMO

A convecção, embora amplamente estudada e discutida, na confecção de dissipadores de calor, possui um papel secundário na soldagem, pois a condução é responsável pela maior parte do calor dissipado. Na mesma linha, a convecção forçada é negligenciada, pois a presença de ventos em juntas soldadas apresenta-se como a principal fonte de discontinuidades. Partindo desta realidade o presente trabalho atua em três frentes para avaliar a possibilidade de utilizar a convecção forçada como favorecedora à soldagem. Na primeira frente, analisou-se o comportamento da convecção. Para tal pequenas chapas SAE 1011, cujo comprimento característico aproxima-se ao de uma poça de fusão, são aquecidas a diversas temperaturas e resfriadas, na posição horizontal, sob a ação de diversas velocidades de fluxo de ar. A segunda frente avaliou como a convecção afeta o modelo matemático do campo de temperatura. Esta análise embora realizada através de linhas de calor em chapas SAE 1020, simula a distribuição de temperatura em juntas soldadas. E por fim, foram realizadas soldas MAG em chapas SAE 1020. Avaliando-se o efeito de um fluxo de ar na formação da zona termicamente afetada obtendo-se uma redução de oitenta e cinco por cento.

PALAVRAS CHAVE: Convecção. Campo de Temperatura. Soldagem. Redução da ZTA.

ABSTRACT

Although the convection studied and discussed widely in the manufacture of heat sinks, in welding has a secondary role, because the conduction is responsible for most of the dissipated heat. Similarly, is neglected the forced convection, because the presence of winds in welded joints is the main source of discontinuities. Starting from this reality, this work operates on three fronts to assess the possibility of using forced convection as favoring the welding. On the first front, has analyzed the behavior of convection. For such, small SAE 1011 sheets, whose characteristic lengths approach the dimensions most commons of a weld pool, are heated to various temperatures and cooled in the horizontal position, under the action of different speeds of airflow. The second front evaluated the convection effects on the mathematical model of the temperature field. This analysis, performed through heat lines on SAE 1020 sheets, simulate the temperature distribution in welded joints. Finally, conducted MAG welding in SAE 1020 sheets. Where evaluated the effect of airflow in the formation of heat affected zone resulting in a reduction of eighty-five percent.

KEYWORDS: Convection. Temperature Field. Welding. HAZ reduction.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Variação da densidade do ar em função da Temperatura. | 18 |
| Figura 3.2: Escoamento natural em uma superfície vertical aquecida | 20 |
| Figura 3.3: Linhas de calor para um chapa vertical aquecida. | 25 |
| Figura 3.4: Esquema do processo GMAW. | 27 |
| Figura 3.5: Esquema de uma soldagem MIG/MAG..... | 28 |
| Figura 3.6: Tipos de transferência de metal. (a) Curto-Circuito. (b) Globular. (c) Aerosol. | 28 |
| Figura 3.7: Função Bessel de segundo tipo e ordem zero. | 33 |
| Figura 3.8: Isotermas de chapas grossas (Esquerda) e finas (Direita)..... | 33 |
| Figura 3.9: Comparativo entre o modelo de Rosenthal e o Experimental. | 34 |
| Figura 3.10: Comparativo entre o modelo de Green e o Experimental. | 35 |
| Figura 3.11: Distribuição de temperatura em chapa fina..... | 37 |
| Figura 4.1: Barra chata utilizada para confecção das amostras..... | 38 |
| Figura 4.2: Amostras utilizadas para a análise da convecção..... | 39 |
| Figura 4.3: Forno Mufla Micro Processado. | 39 |
| Figura 4.4: Esquema da montagem experimental..... | 40 |
| Figura 4.5: Variação de temperatura da amostra com comprimento característico de 5mm aquecida a 1000°C resfriada naturalmente em sua primeira tentativa. | 40 |
| Figura 4.6: Anemômetro digital utilizado para aferir a velocidade do vento | 41 |
| Figura 4.7: Coletor de dados DATATEKER DT80..... | 41 |
| Figura 4.8: Propriedades do ar variando em função da temperatura. | 43 |
| Figura 4.9: Bico de Bunsen utilizado nos experimentos..... | 44 |
| Figura 4.10: Montagem Experimental para a realização das linhas de calor. .. | 45 |
| Figura 4.11: Dados do Gasômetro | 46 |
| Figura 4.12: Posicionamento dos termopares sobre a chapa. | 46 |
| Figura 4.13: Esquema para o direcionamento do fluxo de ar..... | 48 |
| Figura 4.14: Equipamento utilizado nas soldas..... | 49 |
| Figura 4.15: Máquina Semiautomática de Corte a Gás..... | 49 |
| Figura 4.16: Esquema para as soldas com escoamento paralelo..... | 50 |
| Figura 4.17: Montagem para solda com fluxo de ar perpendicular ao cordão.. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.1: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_c = 1\text{mm}$. | 53 |
| Figura 5.2: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_c = 2\text{mm}$. | 55 |
| Figura 5.3: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_c = 3\text{mm}$. | 57 |
| Figura 5.4: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_c = 4\text{mm}$. | 59 |
| Figura 5.5: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_c = 5\text{mm}$. | 61 |
| Figura 5.6: Coeficiente de convecção em função do comprimento característico. | 62 |
| Figura 5.7: Sistema de coordenadas utilizado na chapa | 64 |
| Figura 5.8: Leituras de uma câmera termográfica e o modelo de Green em uma solda em API 5L X80. | 67 |
| Figura 5.9: Cordão realizado com fluxo perpendicular. | 68 |
| Figura 5.11: Cordão realizado sem o fluxo de ar. | 69 |
| Figura 5.12: Cordão Realizado com Fluxo de ar. | 69 |
| Figura 5.13: Micrografia da amostra sem fluxo de ar. | 70 |
| Figura 5.14: Amostras, realizadas com o fluxo de ar, e suas respectivas micrografias. ZTA na ordem de $50\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ e $80\mu\text{m}$, respectivamente. | 70 |
| Figura A.1: Perfil de velocidade do ventilador no padrão 01. | 82 |
| Figura A.2: Perfil de velocidade do ventilador no padrão 02. | 82 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1: Temperaturas e tempos de aquecimento da massa de água..... | 47 |
| Tabela 5.1: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e do comprimento característico amostra. | 62 |
| Tabela 5.2: Temperaturas experimentais e o modelo de Rosenthal considerando e desconsiderando as perdas por convecção e radiação. Linha central a 0,5 mm/s. | 66 |
| Tabela 5.3: Temperaturas experimentais e o modelo de Green considerando e desconsiderando o fator de correção. Linha central a 0,5 mm/s..... | 66 |
| Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem para o Aço API 5L X80 | 67 |
| Tabela A.1: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 1mm$ | 77 |
| Tabela A.2: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 2mm$ | 78 |
| Tabela A.3: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 3mm$ | 79 |
| Tabela A.4: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 4mm$ | 80 |
| Tabela A.5: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 5mm$ | 81 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|---------------------------------|
| AWS | American Welding Society |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| FCAW | Flux-Cored Arc Welding |
| GMAW | Gas Metal Arc Welding |
| GTAW | Gas Tungsten Arc Welding |
| MB | Metal Base |
| MIG | Metal Inert Gas |
| MAG | Metal Active Gas |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SAW | Submerged Arc Welding |
| SMAW | Shielded Metal Arc Welding |
| ZTA | Zona Termicamente Afetada |
| ZF | Zona Fundida |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado | Unidade |
|----------------|--|---------------------|
| C_p | Calor específico | $J/kg\ ^\circ C$ |
| F_C | Fator de correção da função de Green | W/m |
| g | Gravidade | m/s^2 |
| Ga | Número de Grashof | <i>Adimensional</i> |
| H_L | Energia Líquida de Soldagem | J/m |
| h | Coefficiente de convecção | $W/m^2\ ^\circ C$ |
| h_e | Coefficiente de convecção efetivo | $W/m^2\ ^\circ C$ |
| h_N | Coefficiente de convecção natural | $W/m^2\ ^\circ C$ |
| h_F | Coefficiente de convecção forçada | $W/m^2\ ^\circ C$ |
| h_{rad} | Coefficiente de radiação | $W/m^2\ ^\circ C$ |
| I | Corrente | A |
| k | Condutividade térmica | $W/m\ ^\circ C$ |
| K_0 | Função Bessel de segundo tipo e ordem zero | <i>Adimensional</i> |
| L_C | Comprimento característico | m |
| Nu | Número de Nusselt | <i>Adimensional</i> |
| Q | Calor por unidade de volume | J/m^3 |
| \dot{q} | Fluxo de calor | W |
| Q_{cond} | Fluxo de calor por convecção | W/m^2 |
| Q_{conv} | Fluxo de calor por condução | W/m^2 |
| Q_{rad} | Fluxo de calor por radiação | W/m^2 |
| R | Distância radial | m |
| Re | Número de Reynolds | <i>Adimensional</i> |
| T | Temperatura | $^\circ C$ |
| T_0 | Temperatura inicial | $^\circ C$ |
| T_C | Temperatura crítica | $^\circ C$ |
| T_S | Temperatura na superfície | $^\circ C$ |
| T_∞ | Temperatura ambiente | $^\circ C$ |
| T_P | Temperatura de película | $^\circ C$ |
| t | Tempo | s |
| U | Tensão | V |
| V | Velocidade | m/s |
| V_S | Velocidade de Soldagem | m/s |
| V_x | Velocidade na direção x | m/s |
| V_y | Velocidade na direção y | m/s |
| w | Parâmetro do regime quase estacionário | m |
| x | Direção no sistema de coordenadas | <i>Adimensional</i> |
| y | Direção no sistema de coordenadas | <i>Adimensional</i> |
| z | Direção no sistema de coordenadas | <i>Adimensional</i> |
| α | Difusividade térmica | m^2/s |
| β | Coefficiente de Expansão Volumétrica | K^{-1} |
| δ | Derivada parcial | <i>Adimensional</i> |
| δ_T | Espessura da camada limite térmica | m |
| $\delta_{V,x}$ | Espessura da camada limite hidrodinâmica | m |
| Δ | Operador matemático para variação | <i>Adimensional</i> |

| | | |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| ∇ | Operador matemático para Gradiente | <i>Adimensional</i> |
| ϵ | Espessura de chapa | <i>m</i> |
| ϵ | Emissividade do Material | <i>Adimensional</i> |
| η | Eficiência de Soldagem | <i>Adimensional</i> |
| μ | Viscosidade dinâmica | <i>Kg/m s</i> |
| π | Número irracional | <i>Adimensional</i> |
| ρ | Densidade | <i>Kg/m³</i> |
| ρ_{∞} | Densidade na temperatura ambiente. | <i>Kg/m³</i> |
| σ | Constante de Stefan Boltzman | <i>W/m²K⁴</i> |
| ν | Viscosidade Cinemática | <i>m²/s</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 17 |
| 2.1 | Objetivo Geral..... | 17 |
| 2.2 | Objetivos Específicos..... | 17 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 3.1 | Convecção Externa em Placas Planas..... | 18 |
| 3.2 | O Número de Nusselt na Convecção Natural | 24 |
| 3.3 | Soldagem GMAW | 26 |
| 3.4 | Fluxo de Calor na Soldagem | 30 |
| 3.4.1 | A função de Green Para Condução de Calor | 34 |
| 3.4.2 | Condições de Contorno | 36 |
| 3.4.3 | Zonas de Soldagem..... | 37 |
| 4 | METODOLOGIA | 38 |
| 4.1 | Análise da Convecção | 38 |
| 4.1.1 | Procedimento Experimental..... | 38 |
| 4.1.2 | Processamento dos Dados..... | 41 |
| 4.2 | Análise Das Linhas De Calor | 44 |
| 4.2.1 | Potência Líquida do Equipamento | 47 |
| 4.3 | Análise da Convecção na Soldagem | 48 |
| 5 | RESULTADOS | 51 |
| 5.1 | Comportamento Da Convecção..... | 51 |
| 5.1.1 | Amostra com Comprimento Característico de Um Milímetro. | 51 |
| 5.1.2 | Amostra com Comprimento Característico de Dois Milímetros..... | 54 |
| 5.1.3 | Amostra com Comprimento Característico de Três Milímetros..... | 56 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.4 | Amostra com Comprimento Característico de Quatro Milímetros..... | 58 |
| 5.1.5 | Amostra com Comprimento Característico de Cinco Milímetros..... | 60 |
| 5.1.6 | Visão Geral da Variação Do Coeficiente de Convecção..... | 62 |
| 5.2 | Estudo do Campo de Temperatura..... | 64 |
| 5.2.1 | Efeito das Condições de Contorno | 64 |
| 5.2.2 | Comparação dos Resultados..... | 66 |
| 5.3 | Influência da Convecção na Soldagem..... | 68 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 71 |
| | REFERÊNCIAS..... | 73 |
| | APÊNDICE 1: Coeficientes de Convecção. | 77 |
| | APÊNDICE 2: Características do Ventilador. | 82 |

1 INTRODUÇÃO

O estudo da convecção remonta ao século dezenove, contudo a convecção térmica, conforme mencionado por Corcione (2008), tem seu afloramento apenas na década de 1950, quando surge a primeira publicação referente ao assunto no livro de Fishenden e Saunder (1950).

As publicações de Ostrach (1953) e Stewartson (1958), acerca da transferência de calor sobre uma placa plana, mostram o avanço do tema. Porém, estudos mais aprofundados, nos quais estão fundamentadas as atuais teorias, surgiram apenas vinte e cinco anos mais tarde, quando Churchill e Chu (1975) publicaram no *International Journal of Thermal Sciences* dois trabalhos, (Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate, p. 1049) avaliando os efeitos em uma placa disposta verticalmente e (Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Plate, p. 1323) avaliando a convecção natural para placas planas horizontais.

As teorias desenvolvidas possuem uma ampla aplicação na área térmica, como a fabricação de dissipadores de calor. Mas na área de fabricação por soldagem, o mesmo não ocorre, pois, a convecção e a radiação, conforme mencionado por Modenesi, Marques e Santos (2012), são responsáveis por apenas 2% das perdas de calor no processo de soldagem.

Assim a convecção é considerada apenas em modelos computacionais, e o valor do coeficiente de película utilizado de forma aproximada, sem comprovação experimental.

Partindo desta realidade o Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas, iniciou com Azevedo (2010), a avaliação dos efeitos dos ventos sobre juntas soldadas. No entanto não foi avaliado o caráter térmico da junta.

O presente trabalho justifica-se por determinar de forma experimental o coeficiente de convecção em juntas soldadas sobre diversas condições de resfriamento, resultados estes já utilizados em estudos de campo de temperatura realizados por Antonino (2014). Além de mostrar a possibilidade da utilização da convecção forçada como alternativa a redução da zona termicamente afetada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A principal proposta deste estudo é quantificar de forma experimental o coeficiente de convecção em juntas soldadas, para tal foi analisado o comportamento da convecção em chapas SAE 1011, as quais foram confeccionadas de forma a possuírem o comprimento característico de uma poça de fusão.

2.2 Objetivos Específicos

De forma mais restrigente o presente trabalho busca:

- Compreender e descrever o comportamento da convecção em chapas planas dispostas horizontalmente;
- Determinar o valor para o coeficiente de convecção e aplicá-lo nos processos de soldagem.
- Avaliar os efeitos da convecção sobre o modelamento do campo de temperatura.
- Obter um modelo matemático capaz de descrever o ciclo térmico de uma junta soldada. Considerando o coeficiente de convecção obtido experimentalmente.
- Avaliar como o coeficiente de convecção afeta o modelo.
- Avaliar como aplicar um fluxo de ar para prover uma redução da zona termicamente afetada sem danificar o cordão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

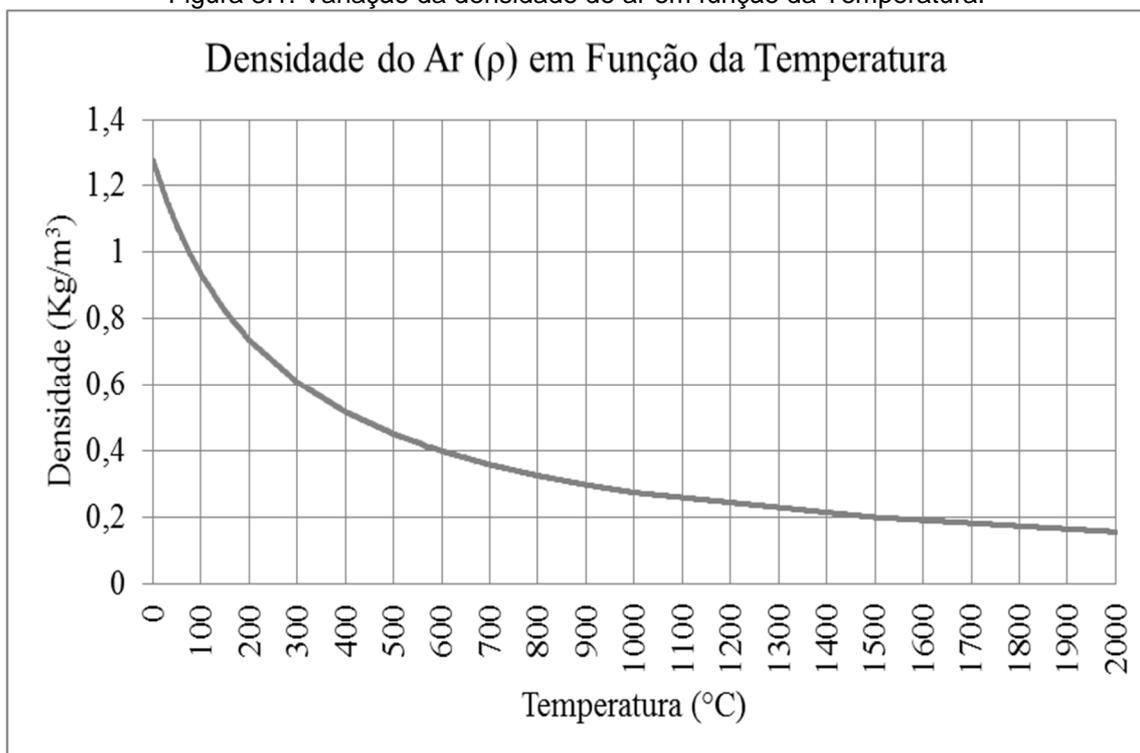
3.1 Convecção Externa em Placas Planas

Çengel (2009) descreve a condução como um mecanismo de transferência de calor entre sólidos ou fluidos em repouso, e a convecção quando há movimento do fluido, de forma natural (o empuxo é o único responsável pelo movimento) ou provocado por uma força externa.

A convecção também pode ser classificada como interna ou externa, nos experimentos foram analisados os efeitos da convecção natural e forçada sobre a superfície de placas planas dispostas horizontalmente.

A figura 3.1 demonstra o fato da densidade do ar ser inversamente proporcional a temperatura, assim é possível inferir o fato deste fluido ser mais leve quando próximo de uma superfície aquecida.

Figura 3.1: Variação da densidade do ar em função da Temperatura.



Compilação gráfica dos dados apresentados por Çengel (2009).

Devido a variação da densidade, ocorre a formação de uma corrente convectiva, caracterizada pela ascensão do ar aquecido enquanto o ar frio descende.

Çengel (2009) denomina o movimento resultante da substituição contínua de ar aquecido de “Corrente de Convecção Natural” e a transferência de calor ocasionada pelo processo de “Transferência de Calor por Convecção Natural”.

Caso não existissem as correntes convectivas o calor seria removido apenas por condução e a taxa de transferência de calor a partir da superfície seria muito inferior.

Embora o empuxo seja responsável pelas correntes convectivas, a principal variável na transferência de calor é a temperatura. Esta conversão é feita através do coeficiente de expansão volumétrica presente na Eq. (3.1).

$$\beta \approx \frac{1}{\rho} \frac{(\rho_{\infty} - \rho)}{(T_{\infty} - T_p)} \quad (3.1)$$

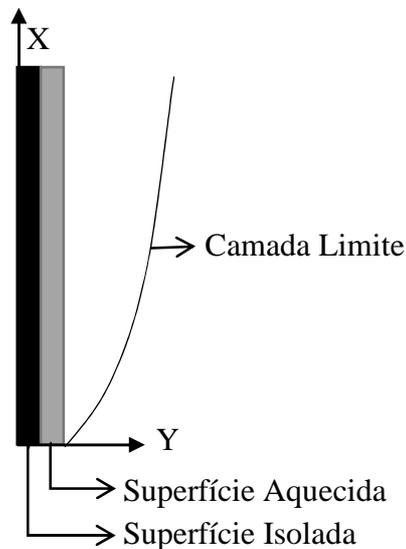
- Coeficiente de expansão volumétrica: β
- Densidade do ar à temperatura de película: ρ
- Densidade do ar a temperatura ambiente: ρ_{∞}
- Temperatura do ar na película: T_p
- Temperatura do ar ambiente: T_{∞}

Considerando a ar como um gás ideal a pressão constante, o coeficiente de expansão volumétrica pode ser simplificado e utilizado na forma da Eq. (3.2) com temperatura de película em Kelvin.

$$\beta \approx \frac{1}{T_p} \quad (3.2)$$

Conforme Lindstedt e Karvinen (2013) o equacionamento da convecção natural, pode ser feito a partir de uma placa vertical, aquecida em apenas uma face, imersa em um fluido estático. A figura 3.2 mostra um esquema para esta análise.

Figura 3.2: Escoamento natural em uma superfície vertical aquecida



Fonte: Adaptado de Çengel (2009).

Para o escoamento mostrado na figura 3.2 faz-se as seguintes considerações:

- Escoamento Permanente, laminar e bidimensional;
- Fluido newtoniano;
- Propriedades do fluido, a exceção da densidade, não variam com a temperatura;
- A diferença de densidade é o único responsável pelo deslocamento do fluido.

A direção do escoamento será no sentido positivo do eixo x , assim os componentes x e y das velocidades serão denotas por V_x e V_y , respectivamente.

Para as condições acima mencionadas a equação da quantidade de movimento na direção x pode ser expressa através da Eq. (3.3).

$$V_x \frac{\delta V_x}{\delta x} + V_y \frac{\delta V_y}{\delta y} = V_y \frac{\delta^2 V_x}{\delta y^2} + g\beta(T - T_\infty) \quad (3.3)$$

A Eq. (3.3) comanda o movimento do fluido na camada limite devido ao empuxo de flutuação. As equações regentes da convecção natural, bem como as condições de contorno, podem ser adimensionalizadas dividindo todas as variáveis por quantidades adequadas, definidas nas Eq. (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8).

$$x' = \frac{x}{L_C} \quad (3.4)$$

$$y' = \frac{y}{L_C} \quad (3.5)$$

$$V_x' = \frac{V_x}{V} \quad (3.6)$$

$$V_y' = \frac{V_y}{V} \quad (3.7)$$

$$T' = \frac{T - T_\infty}{T_S - T_\infty} \quad (3.8)$$

Para a adimensionalização, utiliza-se nas Eq. (3.6) e (3.7) uma velocidade arbitrária obtida a partir do número de Reynolds (Re).

Fox, Pritchard e McDonald (2010) descrevem o número de Reynolds como um parâmetro adimensional utilizado para medir a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas de um fluido. Eq. (3.9).

$$Re = \frac{VL_C}{\nu} \quad (3.9)$$

- Velocidade do fluido: V
- Comprimento característico da superfície: L_C
- Viscosidade dinâmica do ar a temperatura de película: μ
- Viscosidade cinemática do ar a temperatura de película: $\nu = \mu / \rho$

Conforme Çengel (2009), quanto maior o número de Reynolds maior será a influência das forças de inércia e quanto menor seu valor maior será a predominância das forças viscosas. O número crítico para este parâmetro, considerando o escoamento sobre uma placa plana, é 500000. Ou seja, para valores inferiores ao crítico admite-se o fato do escoamento ser laminar e o fluxo por influência das forças viscosas segue em linha, caso contrário o escoamento é classificado como turbulento.

A Eq. (3.3) pode ser reescrita de forma adimensional na forma da Eq. (3.10).

$$V_x' \frac{\delta V_x'}{\delta x'} + V_y' \frac{\delta V_x'}{\delta y'} = \left(\frac{\delta^2 V_x'}{\delta y'^2} \right) \left(\frac{1}{Re} \right) + \left[\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} \right] \left(\frac{T'}{Re^2} \right) \quad (3.10)$$

O parâmetro entre colchetes mostrado na Eq. (3.10) representa o efeito da convecção natural, sendo denominado de Número de Grashof, Eq. (3.11).

$$Ga = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} \quad (3.11)$$

- Número de Grashof: Ga
- Aceleração da gravidade: g
- Temperatura da superfície: T_s

Conforme Çengel (2009), número de Grashof na convecção natural equivale ao número de Reynolds na convecção forçada. Sendo o efeito do tipo de convecção avaliado através do quociente entre o número de Grashof e o quadrado do número de Reynolds, da seguinte forma:

- $\frac{Ga}{Re^2} \gg 1$; A convecção natural é dominante
- $\frac{Ga}{Re^2} \ll 1$; A convecção forçada é dominante
- $\frac{Ga}{Re^2} = 1$; considera-se ambas as formas de convecção.

Considerando um escoamento sobre uma placa plana, é possível definir a camada limite hidrodinâmica como a região acima da qual os efeitos da força de cisalhamento viscoso são percebidos. A espessura desta camada ($\delta_{V,x}$) sobre a placa é definida usando a Eq. (3.12) para um escoamento laminar e a Eq. (3.13) para o turbulento.

$$\delta_{V,x} = 4,91x/Re^{0,5} \quad (3.12)$$

$$\delta_{V,x} = 0,38x/Re^{0,2} \quad (3.13)$$

De maneira análoga a camada limite térmica é considerada como a distância, a partir da superfície, cuja temperatura equivale a 99% da diferença entre as temperaturas superficial e ambiente. A espessura desta camada é definida, em função do número de Prandtl (Pr), usando a Eq. (3.14) para um escoamento laminar e a Eq. (3.15) para o turbulento.

$$\delta_T = 4,91x/Pr^{1/3}Re^{0,5} \quad (3.14)$$

$$\delta_T = 0,38x/Pr^{1/3}Re^{0,2} \quad (3.15)$$

O número de Prandtl descreve a espessura relativa das camadas limite térmica e hidrodinâmica através da Eq. (3.16).

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (3.16)$$

- Capacidade térmica do ar a temperatura de película: c_p
- Condutividade térmica do ar a temperatura de película: k

O número de Nusselt (Nu), por sua vez representa o aumento da transferência de calor através da convecção dentro da camada limite, em detrimento da condução. O valor unitário do número de Nusselt indica o fato de todo calor dentro da camada limite ser transferido por condução, conforme a Eq. (3.17).

$$Nu = \frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} \quad (3.17)$$

O fluxo de calor convectivo (\dot{q}_{conv}) é definido pela Eq. (3.18) na qual (h) representa o coeficiente de convecção. O fluxo condutivo (\dot{q}_{cond}) é definido pela Eq. (3.19).

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (3.18)$$

$$\dot{q}_{cond} = \frac{k\Delta T}{L_C} \quad (3.19)$$

O quociente entre os fluxos define o número de Nusselt (Nu), Eq. (3.20).

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (3.20)$$

Seguindo este raciocínio, pode-se definir o coeficiente de convecção, natural ou forçado, através do número de Nusselt usando a Eq. (3.21).

$$h = \frac{Nu k}{L_c} \quad (3.21)$$

Conhecendo estes conceitos básicos, pode-se definir o número de Nusselt para a convecção forçada através da Eq. (3.22) para o escoamento laminar e da Eq. (3.23) para o turbulento.

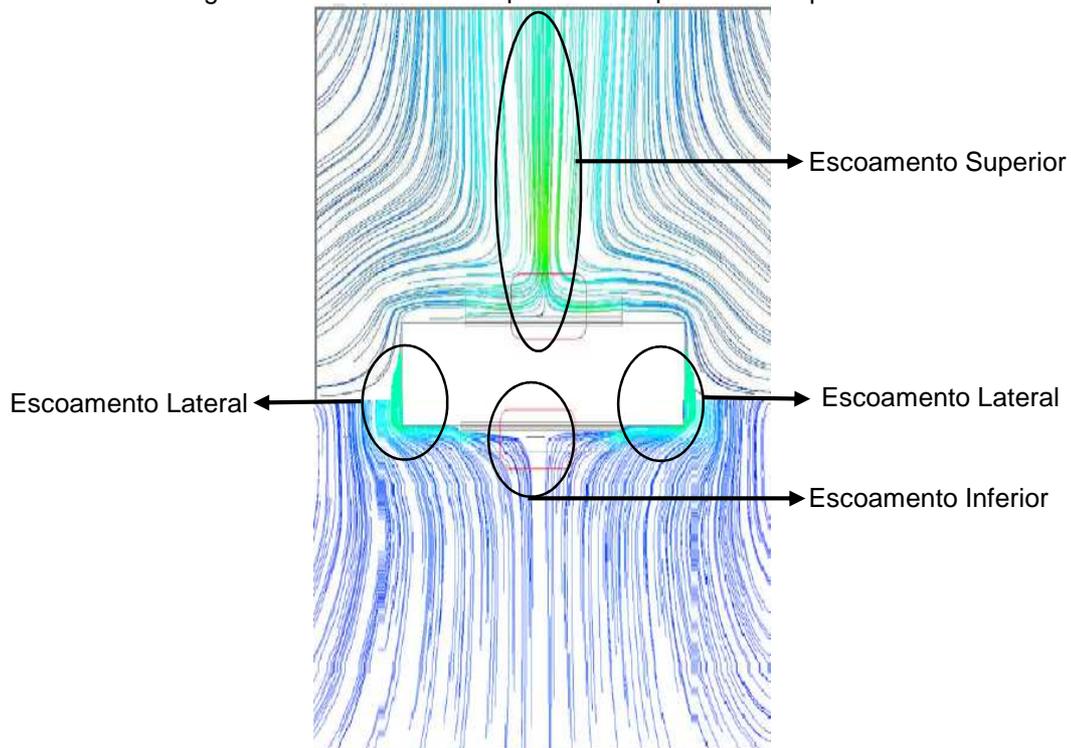
$$Nu = 0,664Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (3.22)$$

$$Nu = 0,037Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (3.23)$$

3.2 O Número de Nusselt na Convecção Natural

Çengel (2009), cita as complexidades envolvidas no mecanismo da convecção natural para obter soluções analíticas das equações de movimento e energia. A exceção de casos simples, as relações de transferência de calor são baseadas em resultados experimentais, conforme a figura 3.3.

Figura 3.3: Linhas de calor para um chapa vertical aquecida.



Adaptado de Mehrtash e Tari (2012).

Tomando como base os resultados de Mehrtash e Tari (2012), é possível inferir o comportamento das linhas de fluxo ar quente sobre uma placa horizontal totalmente aquecida. Na figura 3.3 percebe-se o fato do escoamento nas faces laterais e inferior serem mínimos, quando comparado ao escoamento na face superior.

Desta forma, a análise da convecção natural, considerou o resultado para placas planas horizontais com a superfície superior aquecida e a inferior isolada, conforme a Eq. (3.24).

$$Nu = 0,54(Ga \times Pr)^{0,25} \quad (3.24)$$

O uso da Eq. (3.24), considerando apenas a face superior aquecida, também pode ser fundamentado através dos trabalhos desenvolvidos por Corcione, Habib e Campo (2011), no qual foram analisadas placas inclinadas (15° menor inclinação) e o número de Nusselt médio da chapa foi considerado como a média aritmética entre os números de Nusselt da face superior e inferior.

Placas planas com a face inferior aquecida e a superior isolada, possuem o número de Nusselt calculado com a Eq. (3.25).

$$Nu = 0,27(Ga \times Pr)^{0,25} \quad (3.25)$$

Considerando a média entre as Eq. (3.24) e (3.25) tem-se o número de Nusselt conforme a Eq. (3.26).

$$Nu = 0,405(Ga \times Pr)^{0,25} \quad (3.26)$$

Este resultado aproxima-se bastante do resultado desenvolvido para placas aquecidas apenas na face superior com uma diferença de vinte e cinco por cento.

Tomando como base as análises de fluxo realizadas por Mehrtash e Tari (2012) e o fato de Corcione, Habib e Campo (2011) terem considerado placas inclinadas, torna-se plausível desconsiderar o fluxo apenas na face inferior.

Outro resultado, comprovador da validade desta afirmação foi obtido por Pantokratoras (2012), o qual analisou uma chapa horizontal aquecida em ambas as faces incidindo um fluxo de ar ascendente para prover o resfriamento da mesma.

Obviamente, para altas velocidades, a convecção na face inferior superaria a face superior, contudo os resultados mostram o fato das faces inferior e superior possuírem o mesmo número de Nusselt para baixas velocidades. Assim caso fosse tomada a média dos valores, a escolha da face aquecida não afetaria a análise.

Mas nos experimentos realizados não há fluxos ascendentes e o número de Nusselt na face superior é o dobro do valor na face inferior, e de acordo com Çengel (2009), caso a superfície quente esteja virada para baixo a placa aquecida bloqueia o fluxo ascendente.

3.3 Soldagem GMAW

A AWS classifica a soldagem como um processo de união de metais através do aquecimento, com ou sem a aplicação de pressão ou metais de adição.

Dentre os diversos processos existentes, destaca-se os processos de fusão por intermédio da aplicação de um arco elétrico são estes:

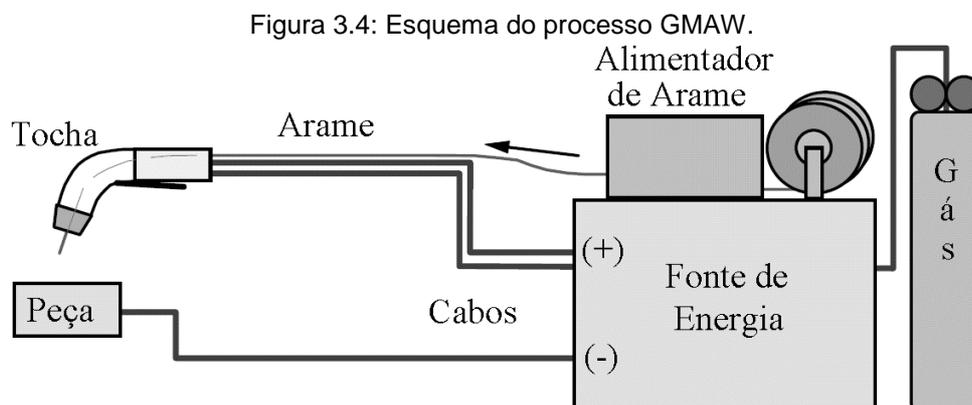
- SMAW (Soldagem a Arco com Arame Revestido)
- FCAW (Soldagem a Arco com Arame de Fluxo Interno)
- SAW (Soldagem com o Arco Submerso)
- GTAW (Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio Protegido por Gás)
- GMAW (Soldagem a Arco com Eletrodo de Metal Protegido por Gás)

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011), o arco elétrico forma-se com a ionização de um gás, a elevada temperatura, denominada plasma. A energia térmica produzida é suficiente para fundir o metal de maneira localizada. Assim a soldagem a arco elétrico é caracterizada pela diferença de potencial entre a peça e o eletrodo, bem como pela corrente circulante entre estes dois polos.

Fogagnolo (2011) cita quanto ao posicionamento dos pólos, três formas de classificar um processo de soldagem:

- Corrente contínua e polaridade direta (CC-), o eletrodo está ligado ao polo negativo, gerando uma menor penetração e uma maior taxa de deposição;
- Corrente contínua e polaridade reversa (CC+) quando o eletrodo está ligado ao polo positivo, propicia uma maior penetração e uma menor taxa de deposição;
- Corrente alternada (CA) usada para solda de materiais com camadas de óxido, alumínio e magnésio.

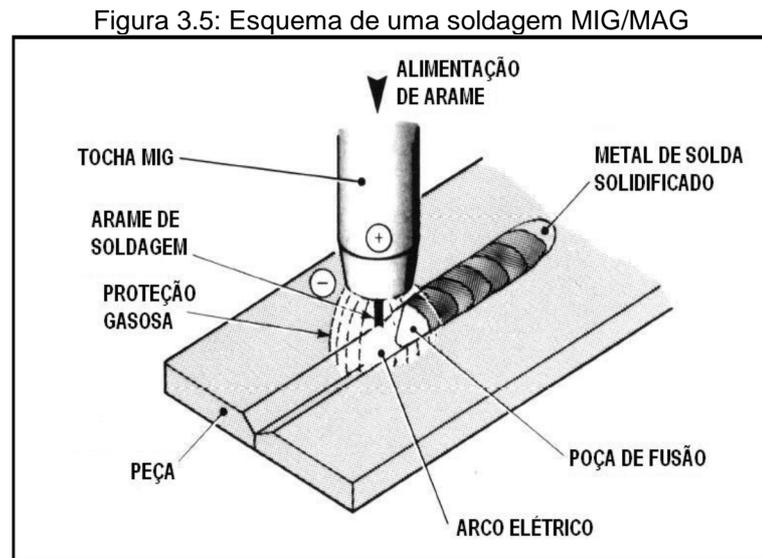
O equipamento básico do processo GMAW consiste em uma fonte de energia, a tocha de soldagem a fonte de gás e o alimentador de arame conforme esquematizado na figura 3.4.



Fonte: Modenesi e Marques (2006)

De acordo com Modenesi e Marques (2006), os parâmetros deste processo variam com uma tensão de 15 a 50 volts, uma velocidade de arame de 1 a 20 m/min, com um ajuste automático do comprimento do arco através de variações na corrente.

ESAB (2005), cita o fato do processo GMAW estabelecer um arco elétrico entre a peça e um consumível na forma de arame de maneira contínua. Assim tanto o metal como a poça de fusão são protegidos por um fluxo de gás, figura 3.5.

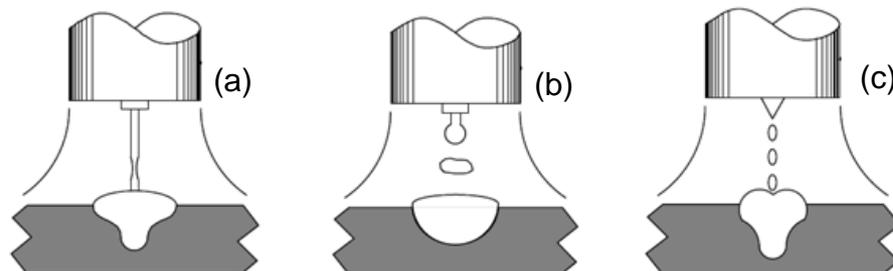


Fonte: ESAB (2005)

Conforme Modenesi e Marques (2006), misturas de gases inertes como Argônio e Hélio, classificam o processo como MIG, utilizado na soldagem de metais e ligas não ferrosas. Quando são usados gases ativos como o dióxido de carbono ou misturas deste com Argônio e Oxigênio o processo é denominado MAG. Pequenas quantidades de gases ativos são utilizadas para aços ligados. Misturas mais ricas ou puramente compostas de dióxido de carbono são utilizadas na soldagem de aços carbono.

A Figura 3.6, mostra os três principais modos de transferência de metal no processo GMAW, conforme mencionado por Wainer, Brandí e Melo (2004).

Figura 3.6: Tipos de transferência de metal. (a) Curto-Circuito (b) Globular (c) Aerossol.



Fonte: Miler (2014).

- Curto-circuito: A transferência ocorre através do contato entre a gota na ponta do eletrodo e a poça de fusão por gotejamento.
- Globular: Similar a transferência por curto circuito, este tipo de transferência é caracterizado por gotas aproximadamente esféricas com o diâmetro do eletrodo. Mas diferentemente da transferência por curto circuito, as gotas desprendem do eletrodo antes de alcançarem a poça de fusão.
- Aerossol: Este caso assemelha-se a transferência globular, no entanto os glóbulos possuem um diâmetro inferior ao diâmetro do eletrodo.

Marques, Modenesi e Bracarense (2011) citam as principais descontinuidades presentes nos processos de soldagem:

- Porosidade: A entrada de gases durante a solidificação da poça de fusão pode levar a bolhas de gás aprisionadas dentro do metal solidificado. Esta descontinuidade pode ocorrer de maneira uniformemente distribuída, em grupos, alinhada, ou de forma vermicular (linhas de vazios).
- Falta de Fusão: Ausência de continuidade metálica entre o metal depositado e o metal existente (seja ele o metal de base ou de algum passe anterior). Suas principais causas são o aquecimento inadequado do metal de base ou a presença de óxidos, os quais impedem a passagem da corrente e formação do arco elétrico.
- Falta de Penetração: Preenchimento ou fusão ineficaz da raiz da solda.
- Trincas: Incapacidade do material em suportar as tensões decorrentes do processo. Atuam como concentradoras de tensão e podem levar a uma fratura frágil da junta.
- Mordedura: Ocorre quando o material na margem do cordão ou na base funde sem a ocorrência de preenchimento, provocando uma redução na área útil e concentrações de tensões, além de reduzir a resistência a fadiga.
- Inclusões de Escória: Quando presentes entre passes, este defeito atua como concentrador de tensão e facilita a formação de trincas.

3.4 Fluxo de Calor na Soldagem

Conforme Modenesi, Marques e Santos (2012) a maioria dos processos de soldagem por fusão a arco elétrico aquece a junta a temperaturas de mil a dois mil graus célsius, concentrados na superfície de contato em uma área de poucos milímetros quadrados. O deslocamento desta pequena área forma o cordão de solda através da fusão e solidificação do metal nesta área. Assim é possível substituir a intensidade de uma fonte de calor em soldagem pela energia de soldagem líquida, através da Eq. (3.27).

$$H_L = \frac{\eta UI}{V_S} \quad 3.27$$

- Energia líquida de soldagem: H_L
- Eficiência do arco elétrico¹: η
- Tensão aplicada pela fonte: U
- Corrente durante o processo: I
- Velocidade de soldagem²: V_S

De forma simplificadora o balanço térmico de um processo de soldagem pode ser definido através do Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Balanço térmico de um processo de Soldagem

| | |
|---------|---|
| Entrada | Calor gerado pelo arco elétrico Reações metalúrgicas exotérmicas |
| Saída | Condução na peça e no eletrodo Radiação Convecção Reações endotérmicas |

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

¹ Quites (2002), define para o processo GMAW, uma eficiência média de 78%.

² Velocidade de deslocamento do eletrodo sobre a superfície da peça.

Na maioria dos processos de soldagem a fonte de calor é aplicada em um ponto da chapa, sendo deslocada ao longo da mesma, assim o calor gerado escoar por condução através do metal.

A exceção de peças pequenas, as perdas por convecção e radiação podem ser desprezadas, pois a maior parte calor é dissipado por condução.

Conforme citado por Goldak, Bibby, *et al.*, (1986), a equação de condução de calor tridimensional para determinar a temperatura de uma chapa para cada ponto (x, y, z) de um determinado domínio pode ser escrita através da Eq. (3.28) com (Q) representando a taxa de calor por unidade de volume no material.

$$\frac{\delta K_x}{\delta x} \frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta K_y}{\delta y} \frac{\delta T}{\delta y} + \frac{\delta K_z}{\delta z} \frac{\delta T}{\delta z} + Q = \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3.28)$$

As condições de contorno para a Eq. (3.28), dadas em W/m^2 , representam as perdas superficiais na chapa, sendo possível representá-las através das seguintes equações:

- Eq. (3.29), para a condução na direção z paralela a espessura ϵ da chapa.
- Eq. (3.30) para a convecção.
- Eq. (3.31) para a radiação. (σ) é a constante de Stefan Boltzman³ e (ϵ) a Emissividade do material⁴.

$$Q_{cond} = \frac{K\Delta T}{\epsilon} \quad (3.29)$$

$$Q_{conv} = h(T_S - T_0) \quad (3.30)$$

$$Q_{rad} = \sigma\epsilon(T_S^4 - T_0^4) \quad (3.31)$$

³ $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

⁴ $\epsilon = 0,21$ para o SAE 1020 nas condições de trabalho.

Para resolução da Eq. (3.28) algumas simplificações devem ser feitas:

- A distribuição de temperatura ocorre em um estado quase estacionário, independente da variação temporal.
- Fonte de calor pontual ou linear perpendicular ao cordão.
- Peça de dimensões infinitas, em alguns casos apenas a espessura é considerada finita. Não sendo necessário especificar as condições de contorno nas bordas.
- Propriedades do metal, como calor específico, densidade e condutividade térmica, independem da temperatura.

Assim, dependendo das condições impostas, a solução para a distribuição de temperatura assume um formato específico, e as soluções de Rosenthal podem ser divididas em três grupos: Chapas finas, grossas e intermediárias.

O conceito de espessura de chapas citado por Guimarães (2010), pode ser definido a partir da Eq. (3.32). (ϵ) representa a espessura da chapa.

$$\tau = \epsilon \sqrt{\frac{\rho C_P (T_C - T_\infty)}{H_L}} \quad (3.32)$$

- Chapa fina: espessura relativa τ inferior a 0,6.
- Chapa grossa: espessura relativa τ superior a 0,9.
- Chapa intermediária: valores contidos no intervalo.

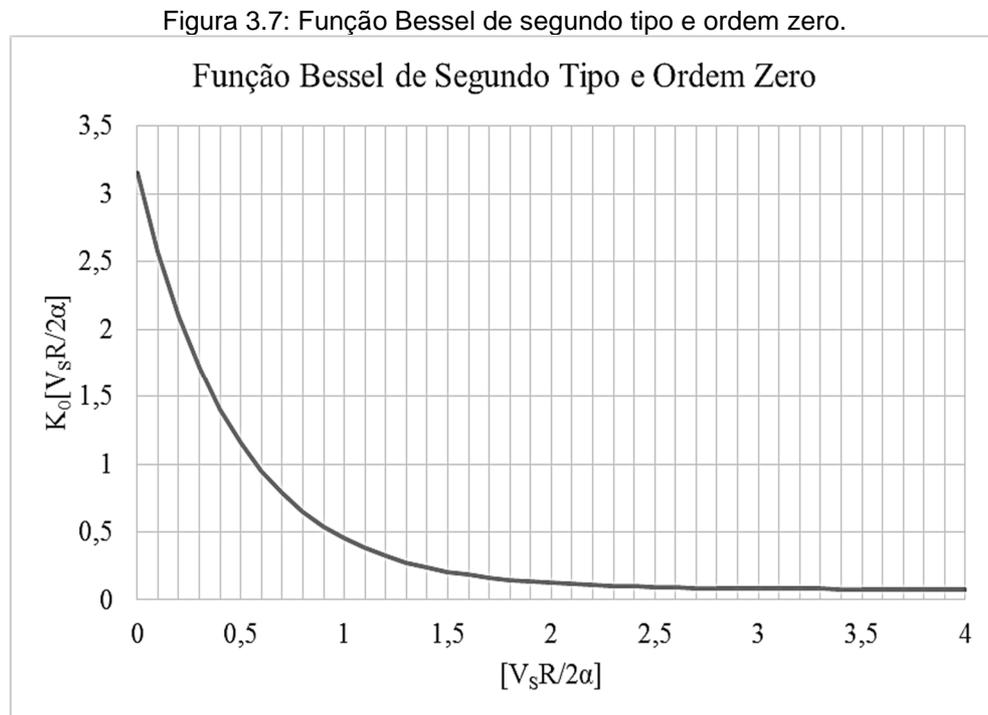
Desta maneira a distribuição de temperatura em chapas finas obedece a Eq. (3.33), e a Eq. (3.34) para chapas grossas.

$$T(r) = T_0 + \frac{\dot{q}}{2\pi k \epsilon} \exp\left[\frac{-V_s w}{2\alpha}\right] K_0\left[\frac{V_s R}{2\alpha}\right] \quad (3.33)$$

$$T(r) = T_0 + \frac{\dot{q}}{2\pi k R} \exp\left[\frac{-V_s (w + R)}{2\alpha}\right] \quad (3.34)$$

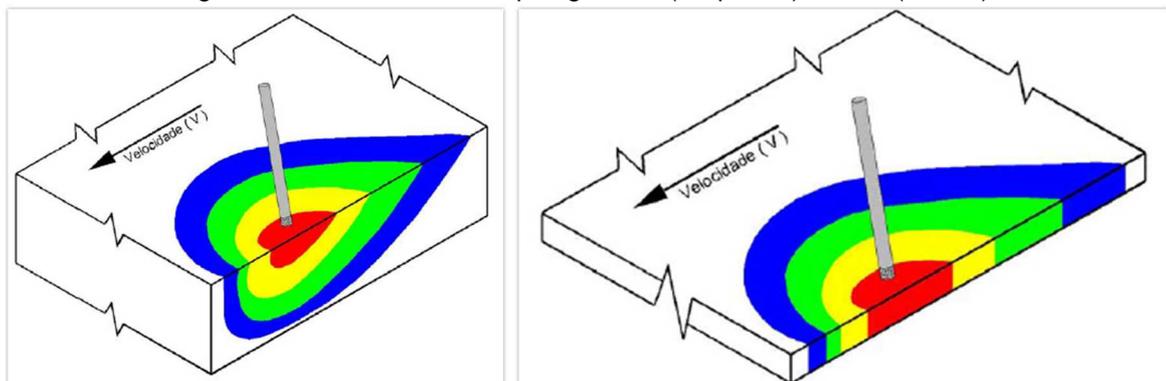
- Taxa de energia líquida da fonte de calor: \dot{q}
- Coordenada móvel: $w = x - V_s t$

- Distância radial da fonte de calor: $R = \sqrt{w^2 + y^2}$
- Difusividade térmica do material: $\alpha = k/\rho C_p$
- K_0 , Função Bessel de segundo tipo e ordem zero, conforme a figura 3.7



A distribuição de temperaturas em chapas grossas e finas é esquematizada na figura 3.8. Destaca-se na distribuição de calor em chapas finas, um escoamento bidimensional do calor oriundo da fonte. E em conformidade com Guimarães (2010), as isotermas são influenciadas pela velocidade de soldagem e pelas propriedades termo físicas do material.

Figura 3.8: Isotermas de chapas grossas (Esquerda) e finas (Direita).



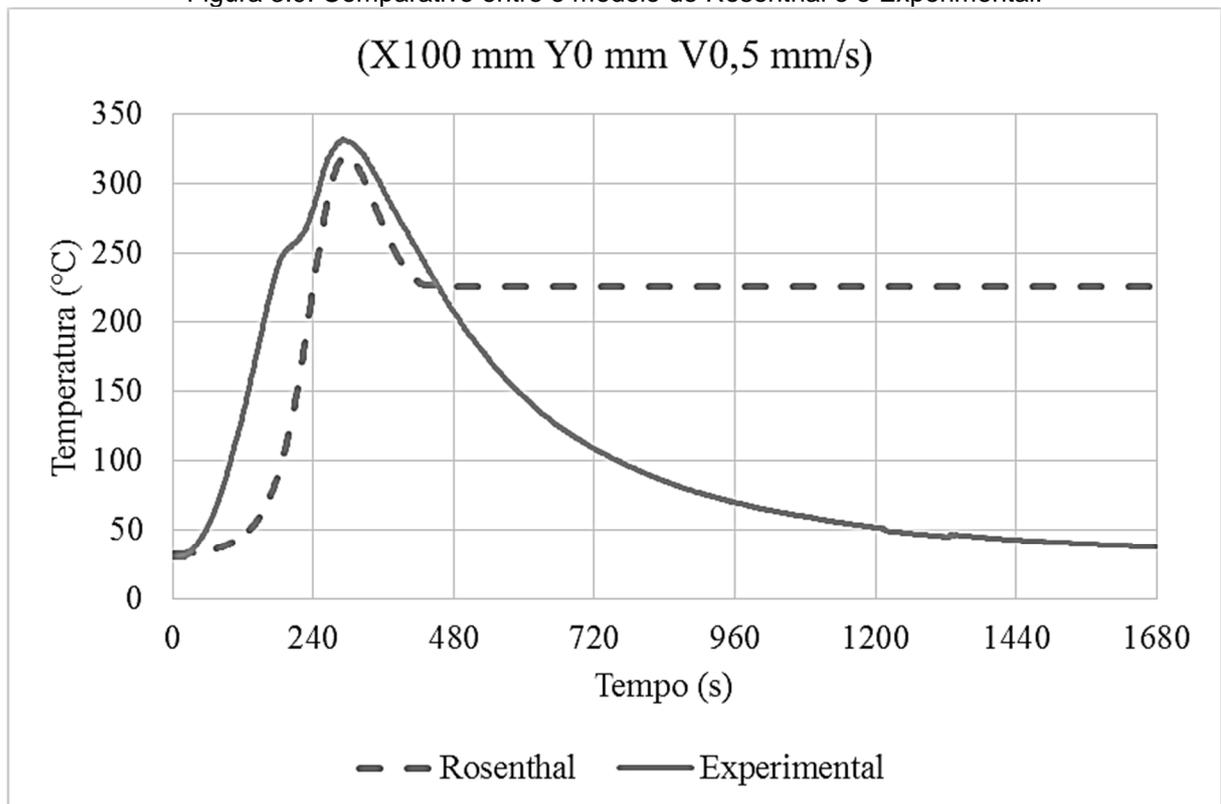
Fonte: Adaptado de Guimarães (2010)

Considerando a soldagem de um material com elevada condutividade térmica e baixa velocidade, as isotermas assumem uma forma circular ao redor da fonte. No entanto o aumento na velocidade provoca um alongamento na direção do deslocamento da fonte de calor, e a redução na condutividade provoca um estreitamento na direção perpendicular ao deslocamento da fonte de calor.

3.4.1 A função de Green Para Condução de Calor

A figura 3.9 mostra o limite de 240 °C para a modelagem usando-se Rosenthal.

Figura 3.9: Comparativo entre o modelo de Rosenthal e o Experimental.



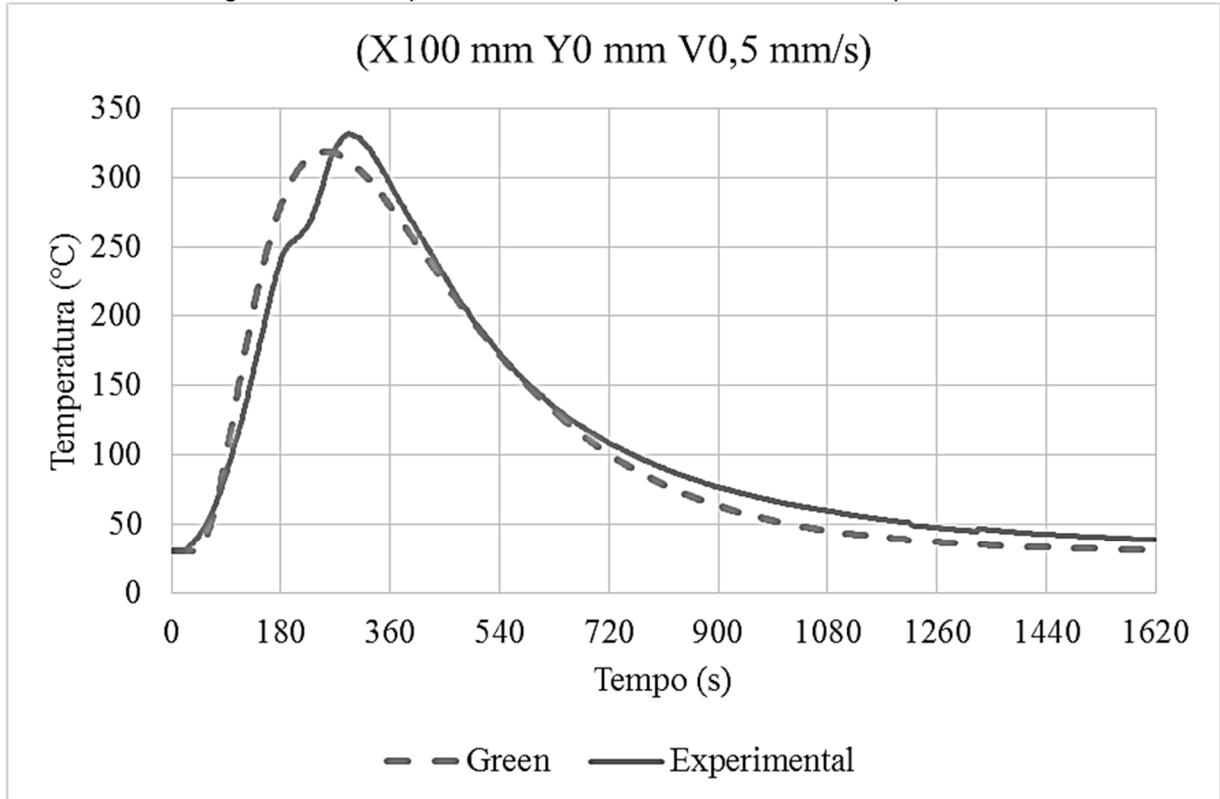
Fonte: O Autor

Para contornar esta limitação usa-se função de Green, Eq. (3.35).

$$G(x, y, z, t) = \frac{1}{\sqrt[3]{4\pi\alpha t}} \times \exp\left(-\frac{(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2})^2}{4\alpha t}\right) \quad (3.35)$$

Autores como Atabaki, Nikodinovski, *et al.*, (2014), utilizam esta função, para obter o ciclo térmico do ponto (x, y, z) no instante t , quando um pulso de calor é aplicado no ponto (x', y', z') no tempo $t' = 0$ s. O resultado é mostrado na figura 3.10.

Figura 3.10: Comparativo entre o modelo de Green e o Experimental.



Fonte: O Autor

Outra vantagem na utilização da função de Green encontra-se no fato desta função considerar uma fonte de calor instantânea aplicada em um dado ponto, assim os resultados das temperaturas de pico também variam ponto a ponto.

A modelagem proposta por Rosenthal considera o deslocamento da fonte de calor ao longo da peça, desta forma, independente do ponto analisado, a temperatura de pico apresenta sempre o valor correspondente a média das temperaturas de pico, obtidas tanto no procedimento experimental quanto na função de Green.

3.4.2 Condições de Contorno

Modenesi, Marques e Santos, (2012), concordam no fato das perdas superficiais poderem ser desprezadas sem danos significativos nos resultados do campo de temperatura, resultado comprovado por Flint, Francis e Yates, (2013).

Nos experimentos realizados com linhas de calor, para temperaturas inferiores a 500°C, será investigada a veracidade desta afirmação. Comparando os resultados experimentais com a modelagem de Green e Rosenthal, através do uso, ou não, do coeficiente de convecção.

Contudo a aplicação da função Green, altera as condições de contorno propostas por Goldak, Bibby, *et al.*, (1986). Caso elas fossem utilizadas, as temperaturas de pico não seriam condizentes do valor real, resultado não desejável.

Frente a este problema Pathak, Navale, *et al.*, (2012) propôs um fator de correção Eq. (3.36) a ser aplicada a função de Green.

$$F_C = \frac{Q_A}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \times \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4\alpha t}\right) \quad (3.36)$$

Este fator de correção leva em consideração os efeitos das perdas de calor superficiais por radiação e por convecção, através do parâmetro “ Q_A ” definido pelas Eq. (3.37), (3.38), (3.39). Mas a perda por condução ao longo da chapa não é considerada, desta forma, utilizando uma chapa fina, com distribuição de calor bidimensional, a solução torna-se aceitável.

$$Q_A = h_e A (T_s - T_\infty) \quad (3.37)$$

$$h_e = h_{conv} + h_{rad} \quad (3.38)$$

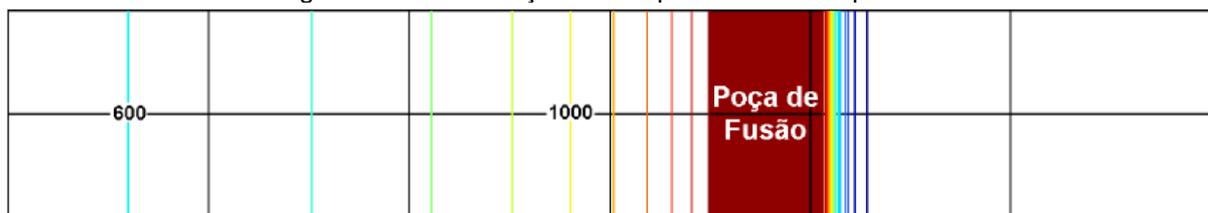
$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 - T_\infty^2) (T_s - T_\infty) \quad (3.39)$$

3.4.3 Zonas de Soldagem.

Uma junta soldada pode ser dividida em quatro regiões, a zona fundida, a zona de ligação, a zona termicamente afetada e o metal de base. Cada uma com características microestruturais próprias variando em função da temperatura máxima atingida pela superfície.

Esta variação de temperaturas máximas, associada com a velocidade de resfriamento, na seção transversal do cordão responsabiliza-se pela mudança microestrutural em cada uma das regiões do cordão conforme esquema mostrado na figura 3.11.

Figura 3.11: Distribuição de temperatura em chapa fina.



Fonte: Guimarães (2010)

A região central do cordão é denominada Zona Fundida (ZF), sua formação deve-se a fusão do metal de adição com diluição parcial das paredes do metal de base (chanfro), e por um curto espaço de tempo encontra-se no estado líquido.

Devido a fusão do metal, esta região é caracterizada pelo crescimento competitivo de grãos durante a solidificação da poça.

Adjacente a Zona Fundida tem-se a Zona de Ligação (ZL), caracterizada por ser uma região limite entre o material líquido da poça e o material sólido do metal de base. A partir desta linha tem-se o crescimento dos grãos indo em direção ao centro do cordão.

Afastando-se do centro do cordão, após a Zona de Ligação, tem-se a Zona Termicamente Afetada (ZTA). Sua constituição varia conforme o metal a ser soldado, o processo e procedimento utilizado para a soldagem.

O comprimento da ZTA é diretamente proporcional ao gradiente térmico, assim é influenciado pela temperatura de aquecimento, e pela velocidade de resfriamento da junta soldada a qual a espessura da peça possui um papel fundamental.

4 METODOLOGIA

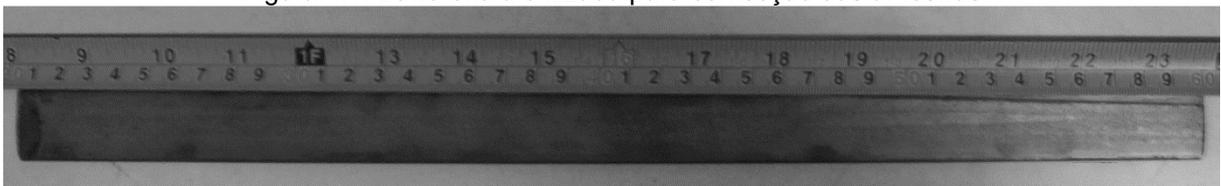
4.1 Análise da Convecção

Para avaliar os efeitos da convecção em juntas soldadas, é necessário compreender o comportamento da mesma e quais os fatores a influenciam. Para tal, a primeira parte da pesquisa investigou como a convecção Natural e Forçada, variam sob os seguintes aspectos: Velocidade do Fluxo de Ar, Temperatura de Aquecimento, Comprimento Característico.

4.1.1 Procedimento Experimental

Para analisar a convecção foram utilizadas cinco amostras de SAE 1011 cortadas a partir de uma barra chata com 400 mm de comprimento 25 mm de largura e 3,4 mm de espessura. (Figura 4.1).

Figura 4.1: Barra chata utilizada para confecção das amostras



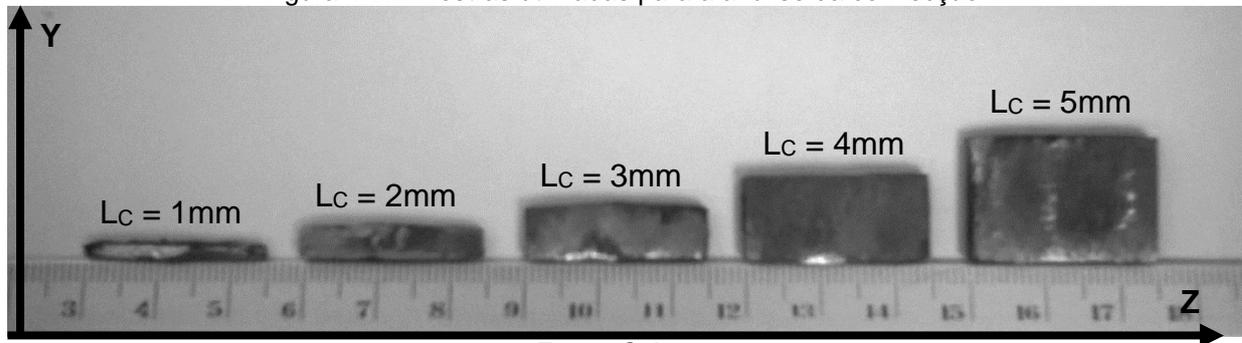
Fonte: O Autor

Os comprimentos característicos (L_C) foram calculados com base na Eq. (4.1), e escolhidos de maneira a conter os comprimentos característicos mais recorrentes a poça de fusão nos processos de soldagem, conforme o modelo apresentado por Antonino (2014).

$$L_C = \frac{\text{Área Superficial}}{\text{Perímetro}} \quad (4.1)$$

A figura 4.2 exibe as amostras de mesma largura e espessura da barra chata, com comprimentos de três, cinco, oito, doze e dezessete milímetros.

Figura 4.2: Amostras utilizadas para a análise da convecção.



Fonte: O Autor

Com as amostras prontas deu-se início ao procedimento experimental descrito a seguir, repetido cinco vezes para cada amostra, totalizando dois mil setecentos e cinquenta experimentos.

Primeiro, quatro termopares do tipo K (Alumel – Chromel) são soldados. Dois na face superior (T01 e T02) e dois na face inferior (T03 e T04). Não foi fixado um ponto específico para a localização dos termopares, pois desta forma garante-se uma leitura aleatória representativa da distribuição de temperatura na superfície.

Fixos os termopares, a amostra é aquecida no forno mufla, mostrado na figura 4.3. Foram definidas dez temperaturas de aquecimento variando de cem a mil graus célsius com patamares de cem graus.

Figura 4.3: Forno Mufla Micro Processado.

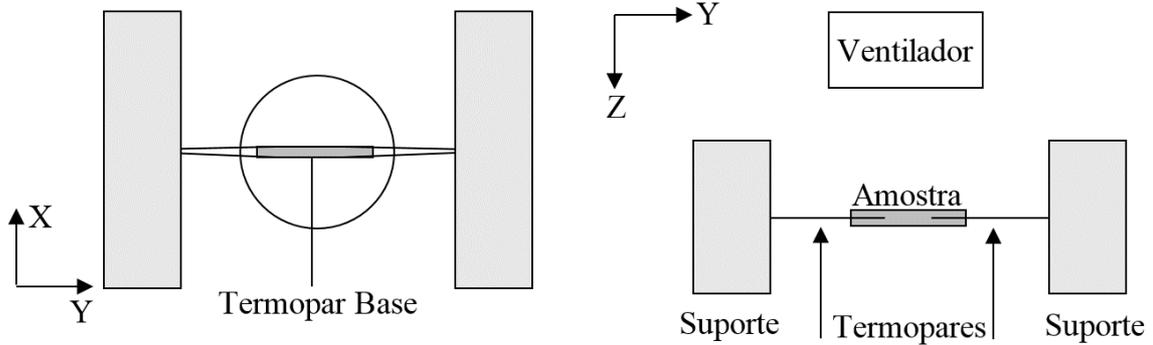


Fonte: QUIMIS (2014).

Atingida a temperatura de aquecimento definida, a amostra é levada a montagem esquematizada na figura 4.4, e resfriada a uma determinada velocidade de fluxo de ar. Foram definidas onze velocidades de resfriamentos distintas, variando de 0 m/s

(Convecção Natural) a 10 m/s, com patamares unitários, totalizando desta forma onze modos de resfriamento distintos.

Figura 4.4: Esquema da montagem experimental.

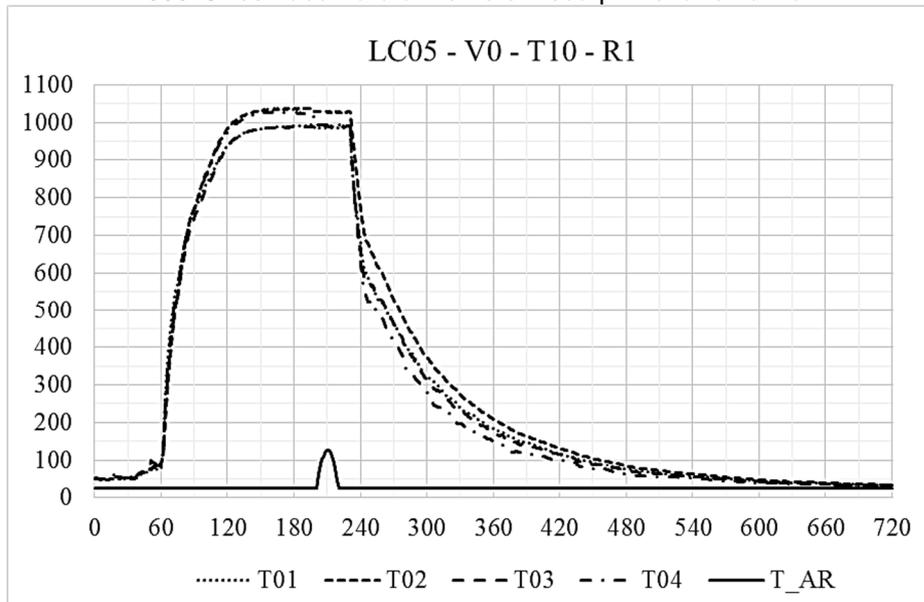


Fonte: O Autor

Seguindo o sistema de coordenadas mostrado na figura 4.4, as amostras foram posicionadas mantendo a largura de vinte e cinco milímetros sempre paralela ao eixo z e a espessura de três milímetros paralela ao eixo x. Assim a dimensão variável fica contida no eixo y mostrado na figura 4.2.

O Termopar base, indicado na figura 4.4, e denominado (T_AR), possui a função de aferir a temperatura do fluxo de ar, indicar a chegada da amostra a montagem experimental, e o início das medições, através de um pequeno pico (Figura 4.5.)

Figura 4.5: Variação de temperatura da amostra com comprimento característico de 5mm aquecida a 1000°C resfriada naturalmente em sua primeira tentativa.



Fonte: O Autor

Com a temperatura ambiente de $29 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, o tempo hábil para a temperatura da chapa igualar-se a temperatura ambiente era extremamente longo, podendo levar a uma camuflagem dos dados. Desta forma, durante a análise cada amostra foi deixada para ser resfriada na posição horizontal até a temperatura de 35°C .

Para o fluxo de ar foi utilizado um ventilador, com velocidades mostradas no Apêndice 2 e aferidas utilizando um anemômetro mostrado na figura 4.6.

Figura 4.6: Anemômetro digital utilizado para aferir a velocidade do vento



Fonte: CIENLAB (2014)

4.1.2 Processamento dos Dados

Os cinco termopares utilizados nos experimentos encontravam-se ligados a um coletor de dados DATATAKER DT80 mostrado na figura 4.7.

Figura 4.7: Coletor de dados DATATEKER DT80.



Fonte: DATATAKER (2014)

Os dados são armazenados em um dispositivo de armazenamento móvel, no formato nativo “DBD”, sendo posteriormente convertidos para o formato CSV (*Comma Separated Values* - Valores Separados Por Vírgula), e transformados em planilha de dados com um aplicativo comercial. Sendo finalmente processados com o mesmo aplicativo para os cálculos pertinentes à convecção.

Como resultados dos experimentos realizados foram obtidas leituras de temperaturas por segundo, para cada termopar utilizado.

Para o cálculo dos dados relativos à convecção, considera-se a temperatura superficial T_s , Eq. (4.2) e a temperatura ambiente T_∞ , Eq. (4.3), constantes durante todo processo.

A temperatura superficial como função do tempo $T_s(t)$, Eq. (4.4), é calculada a partir da média das leituras dos termopares da face superior e inferior, caracterizando um aquecimento uniforme ao longo de toda amostra.

$$T_s = \frac{1}{N^\circ \text{ de Leituras}} \sum T_s(t) \quad (4.2)$$

$$T_\infty = \frac{1}{N^\circ \text{ de Leituras}} \sum T_{AR}(t) \quad (4.3)$$

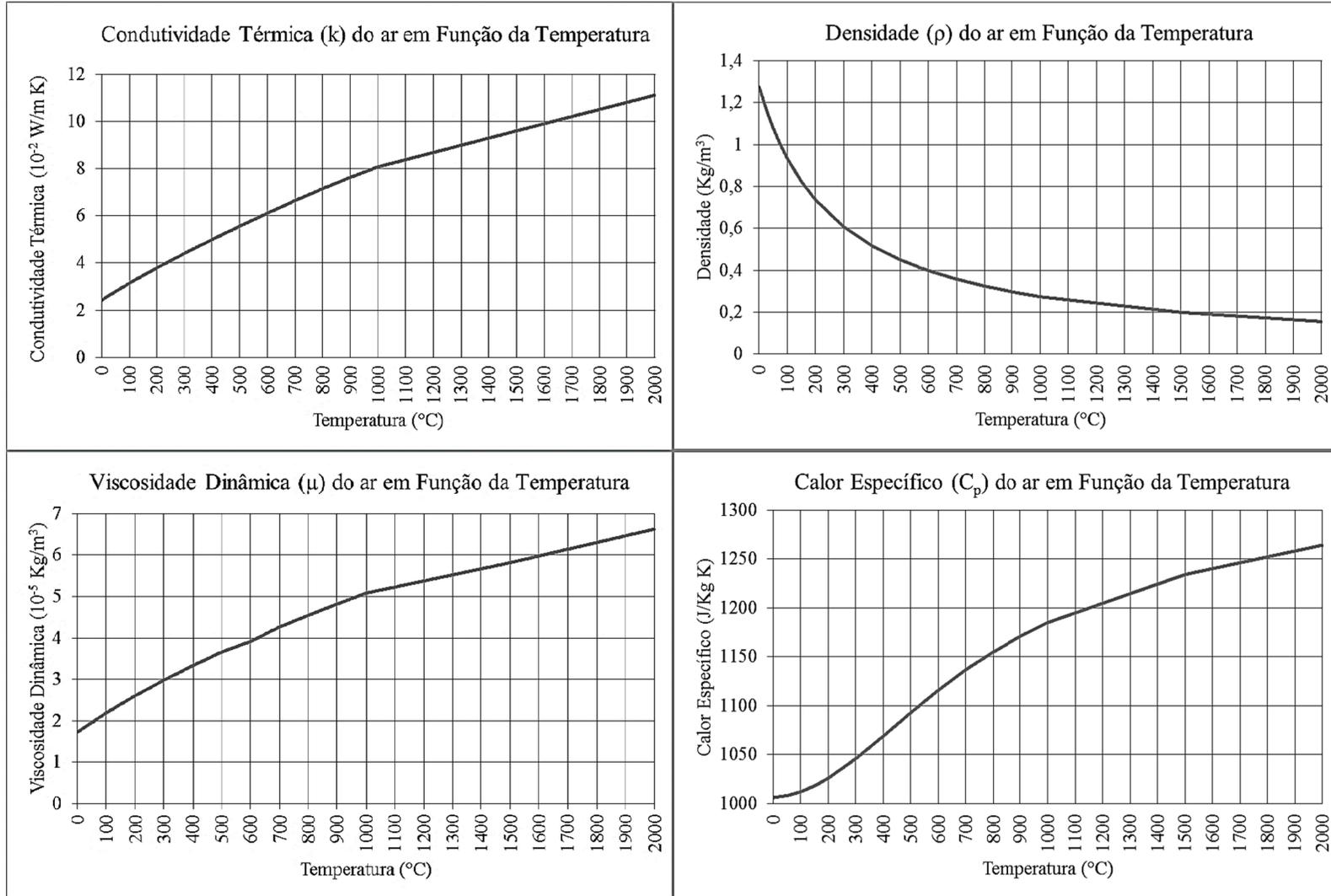
$$T_s(t) = \frac{T01(t) + T02(t) + T03(t) + T04(t)}{4} \quad (4.4)$$

Conforme Kitamura e Mitsubishi (2010), o cálculo da temperatura de filme, ou temperatura de película, considera a média entre as temperaturas superficial e ambiente conforme a Eq. (4.5).

$$T_P = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (4.5)$$

Conhecendo-se a temperatura de película e as propriedades do ar em função da temperatura mostradas na, figura 4.8 torna-se possível calcular os parâmetros adimensionais, e assim obter o coeficiente de convecção através da Eq. (3.21).

Figura 4.8: Propriedades do ar variando em função da temperatura.



Fonte: Compilação gráfica dos dados apresentados por Çengel (2009).

4.2 Análise Das Linhas De Calor

Para análise dos efeitos da convecção sobre a distribuição de temperaturas em uma chapa fina foi utilizada uma chapa SAE 1020 com $(x; y; z) = (200; 570; 3,4)$ mm com propriedades mostradas no quadro 4.1.

Quadro 4.1: Propriedades do SAE 1020.

| | |
|--|-----------------------------|
| Densidade | 7870 Kg m ⁻³ |
| Condutividade Térmica (100°C) | 51,9 W/m °C |
| Calor Específico (100°C) | 486 J/Kg °C |
| Difusividade Térmica $\left(\frac{k}{\rho C_p}\right)$ | 0,0000014 m ² /s |

Fonte: ASM, (1990).

Para o estudo do campo de temperatura foi utilizada uma fonte de calor por chama, pois a baixa temperatura evita reações endotérmicas internas ao material, e as leituras feitas através do termopar seriam afetadas pelo arco elétrico. Como fonte de calor foi utilizado um bico de Bunsen, mostrado na Figura 4.9.

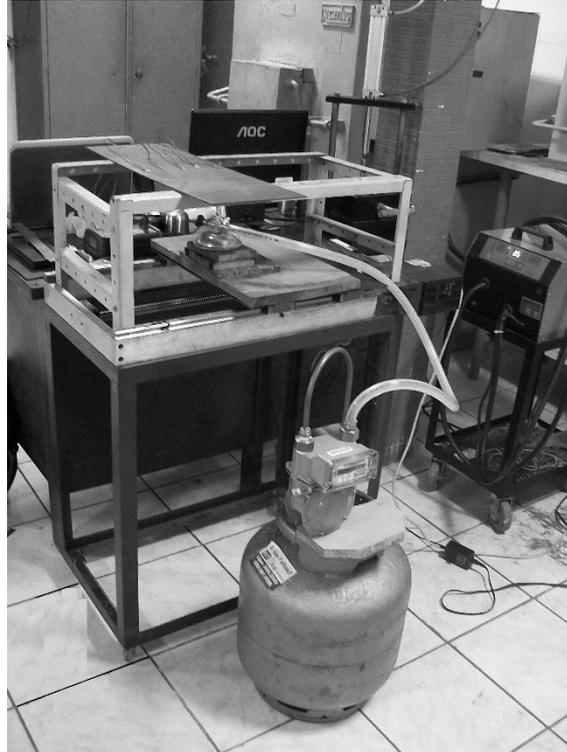
Figura 4.9: Bico de Bunsen utilizado nos experimentos.



Fonte: (CIENLAB, 2014)

Conforme a figura 4.10, a chapa permanece estática, enquanto o bico de Bunsen, situado sobre uma mesa de coordenadas unidirecional, desloca-se com velocidade controlada ao longo da chapa.

Figura 4.10: Montagem Experimental para a realização das linhas de calor.



Fonte: O Autor.

Como combustível para a produção da chama, foi utilizado o gás butano residencial cujas propriedades encontram-se mostras no Quadro 4.2.

Quadro 4.2: Dados Relativos ao Bico de Bunsen.

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Tipo de Gás | Gás Liquefeito do Petróleo |
| Densidade do Gás | 2,2 Kg/m ³ |
| Vazão Volumétrica Gás | 0,00001 m ³ /s |
| Vazão Mássica do Gás | 0,000022 Kg/s |
| Poder Calorífico Inferior Gás | 48 148 200 J/Kg |
| Capacidade Térmica do Gás | 2 500 J/Kg °C |
| Temperatura do Gás | 30 °C |

Fonte: Branco (2014)

A vazão aferida utilizando-se um gasômetro mostrado na figura 4.11 com suas demais características.

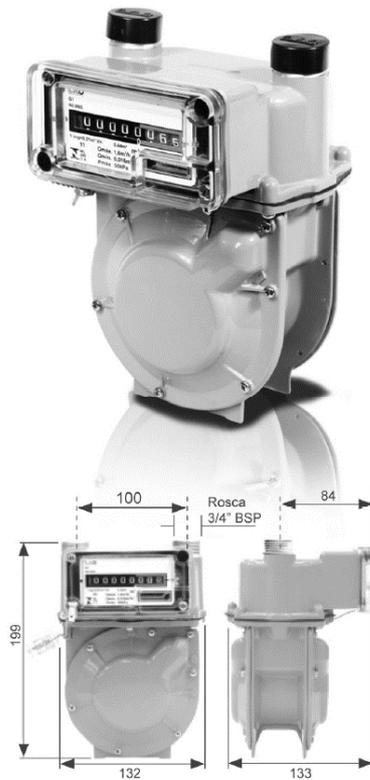
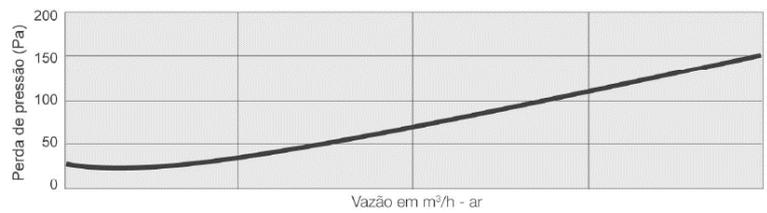


Figura 4.11: Dados do Gasômetro

Curva de Erros



Curva de Perda de Pressão



DADOS TÉCNICOS

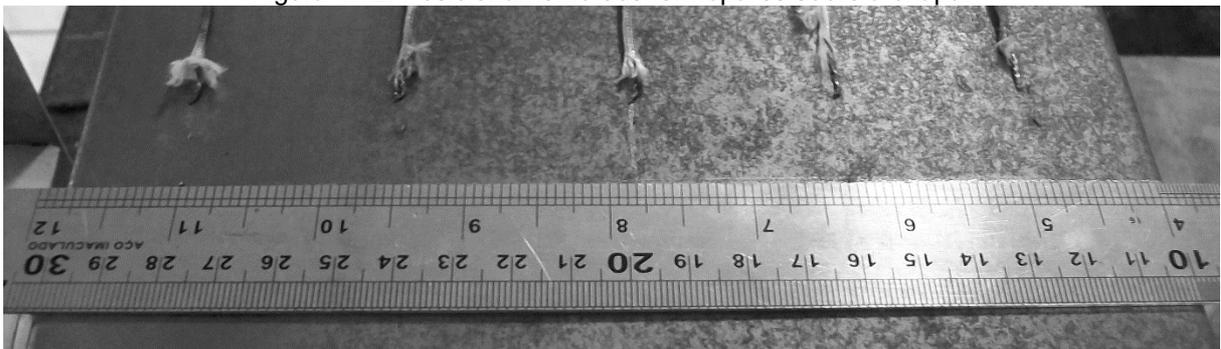
| Tipo de Gás m ³ /h | Vazão Máx. m ³ /h | Vazão Min. m ³ /h | Vazão de Início de Funcionamento m ³ /h | Pressão Máx. de Trabalho kPa | Capacidade Cíclica dm ³ |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|
| Ar | 1,6 | 0,016 | 0,002 | 50 | 0,4 |
| Gas Natural | 2,3 | 0,016 | 0,002 | 50 | 0,4 |
| GLP | 1,4 | 0,016 | 0,002 | 50 | 0,4 |

Gás Natural (peso específico em relação ao ar 0,64) | GLP (peso específico em relação ao ar 1,52)
 Leitura Máx.: 99999,999 m³ | Leitura Min.: 0,2 dm³ | Peso: 1,2 kg

Fonte: LAO (2015)

Com a fonte de calor deslocando-se ao longo da linha central da chapa a uma velocidade de 0,5 mm/s. O campo de temperatura foi monitorado posicionando-se cinco termopares distanciados de 40 mm entre si e 20mm das extremidades da chapa na linha central, na face oposta ao deslocamento da fonte de calor (Figura 4.12).

Figura 4.12: Posicionamento dos termopares sobre a chapa.



Fonte: O Autor

4.2.1 Potência Líquida do Equipamento

Para analisar o campo de temperatura, a potência da fonte de calor utilizada deve ser calculada. Para tal, foi realizado o aquecimento de uma massa de oitenta gramas de água. Este procedimento foi repetido quatro vezes e os resultados encontram-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Temperaturas e tempos de aquecimento da massa de água.

| Experimento | Temperatura Inicial | Temperatura Final | Tempo |
|-------------|---------------------|-------------------|--------|
| 01 | 30,1 °C | 99,1 °C | 88 s |
| 02 | 30,1 °C | 99,1 °C | 82 s |
| 03 | 30,4 °C | 100,9 °C | 91 s |
| 04 | 30,5 °C | 99,2 °C | 89 s |
| Média | 30,3 °C | 99,6 °C | 87,5 s |

Fonte: O Autor

Utilizando a Eq. (4.6) pode-se estimar o fato de ser necessária uma quantidade de calor $Q = 23200$ J para promover uma variação de temperatura $\Delta T = 69,3$ °C de uma massa $m = 80$ g de água, com uma capacidade térmica de $C_p = 4,2$ J/g °C.

$$Q = mC_p\Delta T \quad 4.6$$

Em conformidade com Branco (2014), a Eq. (4.7), determina a energia fornecida pelo bico de Bunsen. Sendo conhecidos:

- Vazão mássica: $\dot{m}_c = 0,000022$ Kg/s
- Tempo de uso do equipamento: 87,5 s
- Massa de combustível: $m_c = 0,001925$ Kg
- Energia fornecida: $Q = 92800$ J

$$Q = m_c [PCI + (C_p \times t_c)] \quad (4.7)$$

A energia calculada pela Eq. (4.7) é muito superior a necessária para o aquecimento da massa de água calculada pela Eq. 4.6). Desta maneira pode-se estimar a eficiência do equipamento como sendo $\eta_c = 25\%$.

No entanto para avaliar o campo de temperatura faz-se necessário conhecer a potência líquida da fonte de calor, 265 W, obtida através da Eq. (4.8).

$$Q = \eta_c \dot{m}_c [PCI + (C_p \times t_c)] \quad (4.8)$$

4.3 Análise da Convecção na Soldagem

Para avaliar como a convecção forçada afeta os processos de soldagem foram realizados três tipos de experimentos, cada um repetido três vezes. No primeiro, foi realizada uma solda sem fluxo de ar. No segundo utilizou-se um fluxo de ar perpendicular à chapa, e no terceiro um fluxo paralelo. Ambos os fluxos incidentes na face oposta a realização da solda, conforme esquematizado na figura 4.13.

Figura 4.13: Esquema para o direcionamento do fluxo de ar.



Fonte: O Autor

Como amostras para as juntas soldadas foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 cortadas nas dimensões (100 × 50 × 3 mm). Para uma melhor proteção nas soldas com escoamento perpendicular foi fixado na face oposta ao cordão uma chapa de mesmo material com dimensões (100 × 10 × 3 mm). O fluxo de ar, em ambos experimentos, possui uma velocidade média de 10 m/s.

Para a realização das soldas utilizou-se o equipamento da figura 4.14.

- Fonte: (17 – 35) V (50 – 315) A
- Alimentador de arame de duas roldanas: (1,5 – 19) m/min
- Metal de adição: AWS SFA 5.18 (1,2 mm de diâmetro)
- Gás: Argônio com um quarto de dióxido de carbono.

Figura 4.14: Equipamento utilizado nas soldas



Fonte: ESAB (2014)

O deslocamento da tocha, realizada de maneira automatizada através da máquina de corte a gás, mostrada na figura 4.15. Assim pode-se definir os parâmetros do processo:

- Velocidade de soldagem: 5mm/s
- Tensão: $18,8\text{V}$
- Velocidade de alimentação do arame: 6m/min
- Vazão de Gás: 18 l/min

Figura 4.15: Máquina Semiautomática de Corte a Gás

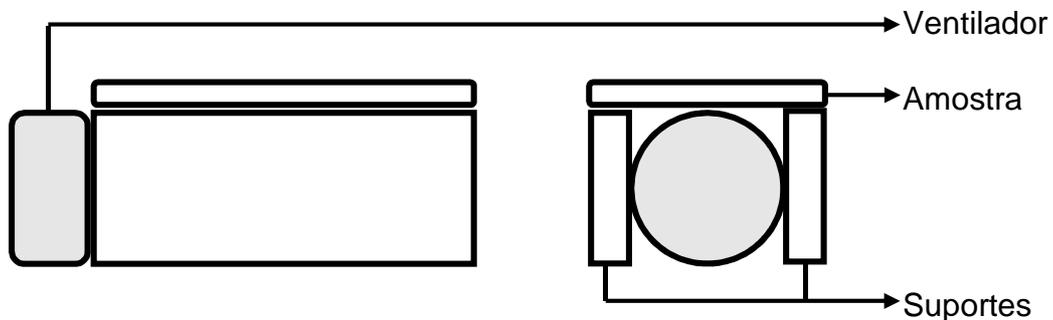


Fonte: INTERNATIONAL (2015)

As soldas de topo, com e sem cobre junta e sem abertura de raiz foram realizadas com chapas SAE 1020 com três milímetros de espessura, com milímetros de comprimento (direção do cordão) e cinquenta milímetros de largura (perpendicular ao cordão). Foi utilizado um fluxo de ar com velocidade média de dez metros por segundo a uma temperatura de trinta graus Celsius.

Para o escoamento paralelo as amostras foram mantidas na posição horizontal e o cordão realizado com a tocha na posição vertical. A montagem utilizada encontra-se esquematizada na figura 4.16.

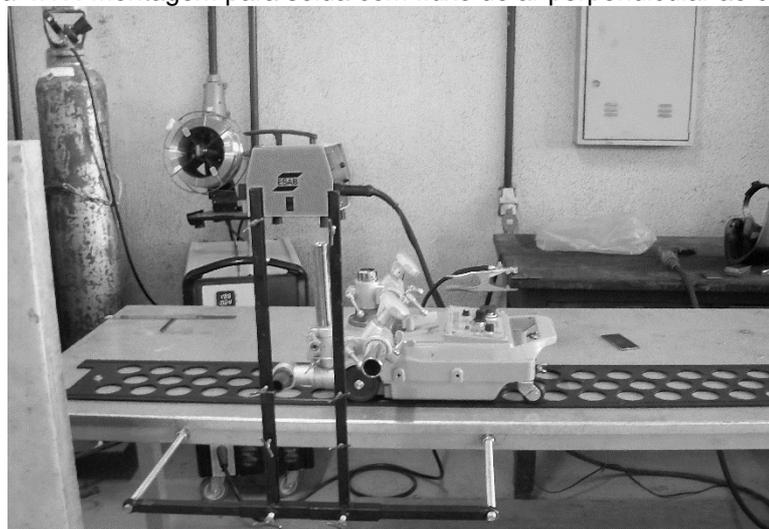
Figura 4.16: Esquema para as soldas com escoamento paralelo.



Fonte: O Autor

Para o escoamento perpendicular as amostras foram mantidas na posição vertical e o cordão realizado como a tocha na horizontal. A montagem utilizada encontra-se na figura 4.17.

Figura 4.17: Montagem para solda com fluxo de ar perpendicular ao cordão.



Fonte: O Autor

5 RESULTADOS

Com os experimentos realizados foram obtidos dois resultados distintos. No primeiro obteve-se um banco de dados para avaliação do comportamento da convecção, bem como sobre os fatores de influência no mesmo. Na segunda etapa foi avaliado como a convecção forçada afeta um processo de soldagem.

5.1 Comportamento Da Convecção

Nos experimentos para análise do comportamento da convecção, podem-se obter as variações do coeficiente de película e da taxa de resfriamento, contudo os dados da variação da taxa de resfriamento, apresentavam uma aleatoriedade muito elevada, e por este motivo foram descartados.

Os valores do coeficiente de película, por outro lado, em um conjunto de cinco repetições apresentaram uma variação da ordem de $\pm 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nas tabelas presentes no APÊNDICE 1, tem-se os valores médios destas cinco leituras, organizadas para cada comprimento característico em função da temperatura de aquecimento e velocidade de resfriamento.

De forma genérica pode-se caracterizar a convecção como um processo “independente” da temperatura, com crescimento associado ao aumento da velocidade de resfriamento e diminuição do comprimento característico, para placas planas.

5.1.1 Amostra com Comprimento Característico de Um Milímetro.

A figura 5.1 indica, para a amostra com dimensões $25 \times 3 \times 3 \text{ mm}$, o fato do coeficiente de convecção variar em função da velocidade de resfriamento conforme a Eq. (5.1).

$$h(V) = 0,37441V^3 - 7,86072V^2 + 71,88275V + 29,44727 \therefore R^2 = 0,995 \quad (5.1)$$

A Eq. (5.1) descreve um comportamento genérico assumindo haver apenas a convecção forçada, função da velocidade e do comprimento característico, assumindo a convecção natural como um caso especial com velocidade do escoamento é nula. Embora este comportamento possa ser expresso matematicamente, ele não ocorre na prática.

Assim de forma mais contundente, pode-se definir a convecção com dois casos específicos, no primeiro, a modalidade forçada varia em função da velocidade do fluxo de ar Eq. (5.2).

$$h(V) = 105,01906 \times V^{0,50059} \therefore R^2 = 1 \quad (5.2)$$

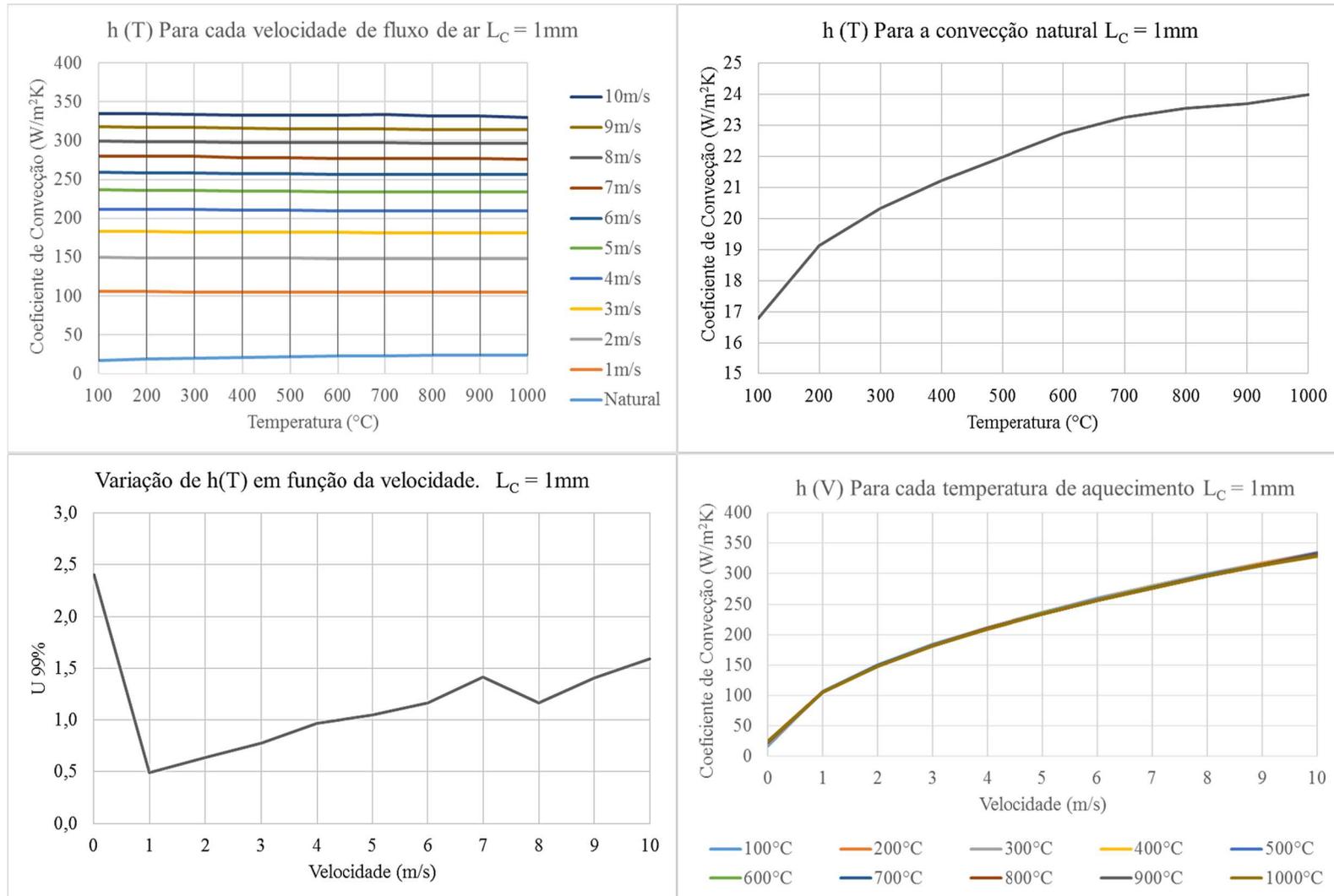
A modalidade natural varia em função da temperatura de aquecimento Eq. (5.3), considerando o comprimento característico igual a um milímetro.

$$h(T) = 24,46839 - \frac{10,11987}{\exp\left(\frac{T}{339,95037}\right)} \therefore R^2 = 0,99606 \quad (5.3)$$

A hipótese da independência da temperatura, pode ser fundamentada através da figura 5.1, para uma confiabilidade de 99% dos valores apresentados, uma variação máxima (U99%) de $\pm 1,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a amostra resfriada com um fluxo de ar a 10 m/s, com valor médio de $332,66 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A convecção natural, apresenta uma variação máxima (U99%) de $\pm 2,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ para uma confiabilidade de 99% e valor médio igual a $21,67 \text{ W/m}^2\text{K}$, não sendo coerente afirmar o fato desta modalidade ser insensível a variação de temperatura.

Figura 5.1: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_C = 1\text{mm}$.



Fonte: O Autor

5.1.2 Amostra com Comprimento Característico de Dois Milímetros.

O comportamento do coeficiente de convecção em função da velocidade do fluxo de ar para a amostra com dimensões de $25 \times 5 \times 3$ mm encontra-se na figura 5.2 e obedece a Eq. (5.4).

$$h(V) = 0,28861V^3 - 6,09309V^2 + 56,47056V + 25,26273 \therefore R^2 = 0,99582 \quad (5.4)$$

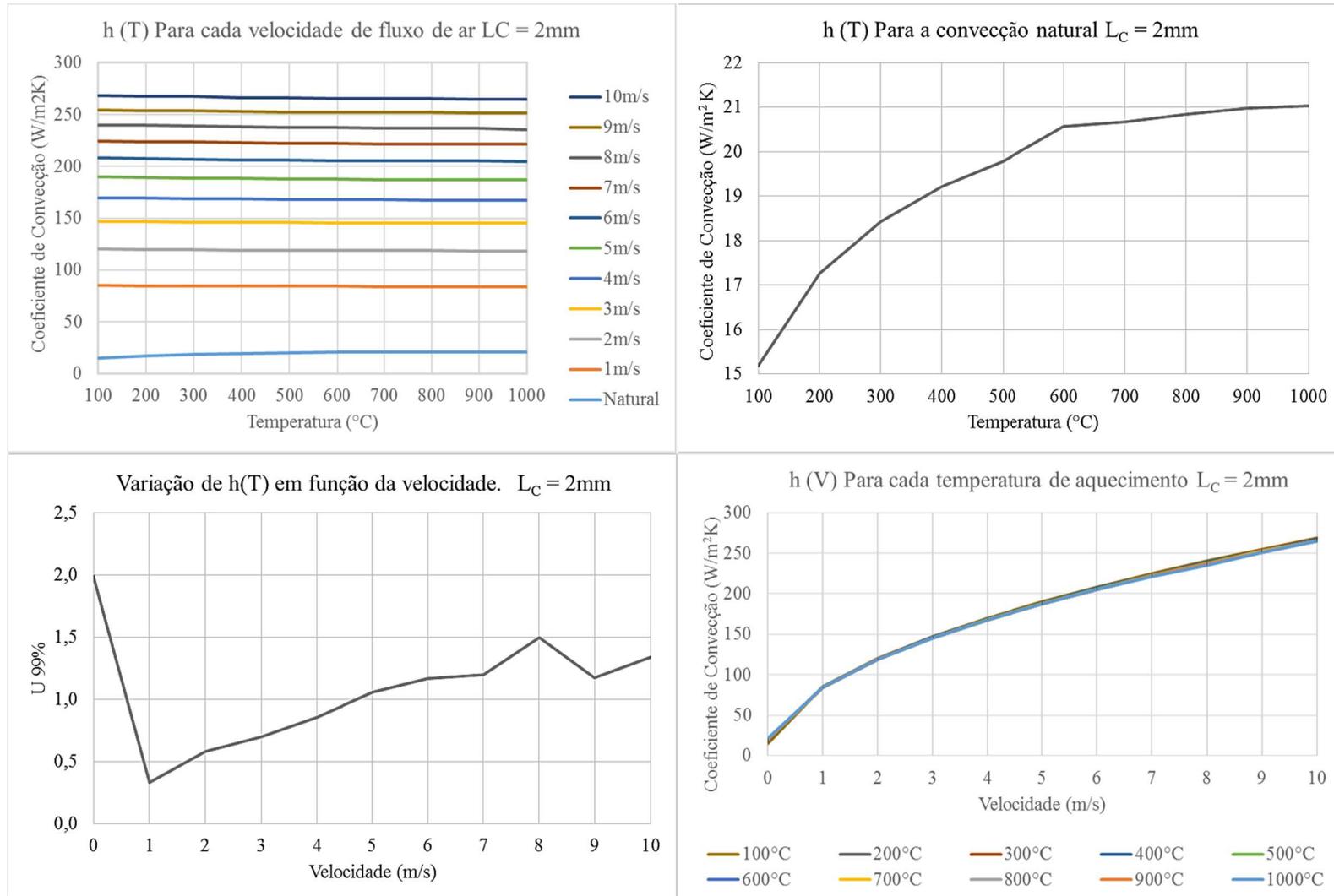
A independência da temperatura para o coeficiente de convecção forçada pode ser observada na figura 5.2, com uma variação máxima (U99%) de $\pm 1,50$ W/m²K para a velocidade de 8 m/s, com um valor médio de 237,94 W/m²K. Desta forma pode-se escrever sua variação em função da velocidade através da Eq. (5.5).

$$h(V) = 84,23516 \times V^{0,49967} \therefore R^2 = 1 \quad (5.5)$$

O coeficiente de convecção natural possui uma variação máxima (U99%) de $\pm 1,98$ W/m²K com valor médio de 19,38 W/m²K, podendo ser escrito como função da temperatura de aquecimento através da Eq. (5.6).

$$h(T) = 21,26455 - \frac{8,82649}{\exp\left(\frac{T}{263,45588}\right)} \therefore R^2 = 0,99607 \quad (5.6)$$

Figura 5.2: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_C = 2\text{mm}$.



Fonte: O Autor

5.1.3 Amostra com Comprimento Característico de Três Milímetros.

O comportamento do coeficiente de convecção para a amostra com dimensões 25×8×3 mm encontra-se na figura 5.3 e obedece a Eq. (5.7).

$$h(V) = 0,23229V^3 - 4,92978V^2 + 46,19253V + 21,85308 \therefore R^2 = 0,9977 \quad (5.7)$$

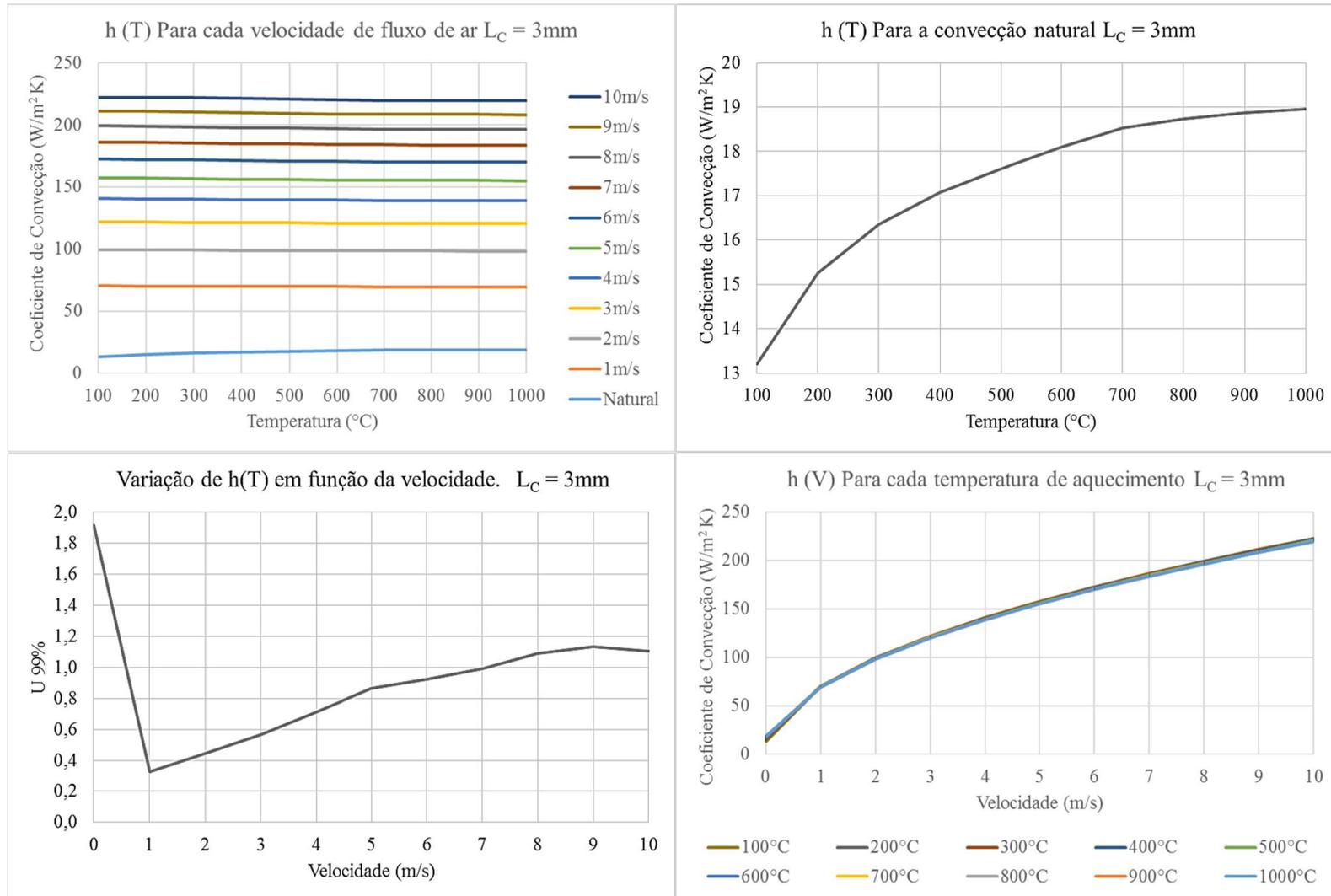
Os valores apresentados na figura 5.3, possuem variação máxima (U99%) de $\pm 1,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a velocidade de 9 m/s, com valor médio de 209,40 $\text{W/m}^2\text{K}$, assim é possível escrever o coeficiente de convecção forçada em função da velocidade do fluxo de ar através da Eq. (5.8).

$$h(V) = 69,87153 \times V^{0,49945} \therefore R^2 = 1 \quad (5.8)$$

Para convecção natural tem-se uma variação máxima (U99%) de $\pm 1,91 \text{ W/m}^2\text{K}$, com valor médio de 17,27 $\text{W/m}^2\text{K}$, o comportamento da convecção natural em função da temperatura pode ser descrito na Eq. (5.9).

$$h(T) = 19,17872 - \frac{8,32944}{\exp\left(\frac{T}{282,95636}\right)} \therefore R^2 = 0,99598 \quad (5.9)$$

Figura 5.3: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_C = 3\text{mm}$.



Fonte: O Autor

5.1.4 Amostra com Comprimento Característico de Quatro Milímetros

O comportamento do coeficiente de convecção para a amostra com dimensões de $25 \times 12 \times 3$ mm encontra-se na figura 5.4 e obedece a Eq. (5.10).

$$h(V) = 0,19546V^3 - 4,16367V^2 + 39,41926V + 19,58112 \therefore R^2 = 0,99655 \quad (5.10)$$

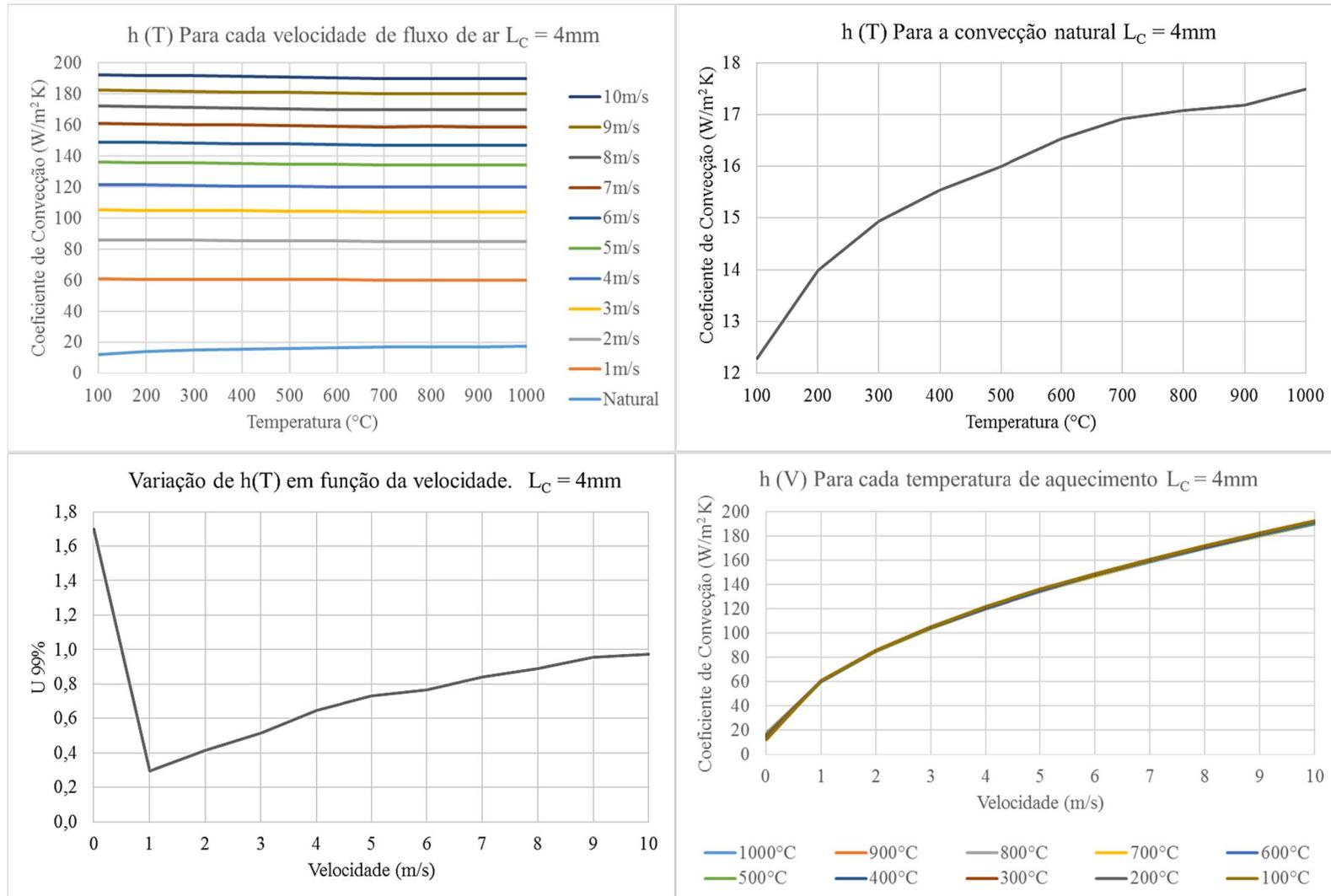
Os valores da convecção como função da temperatura, encontra-se na figura 5.4 com uma variação máxima (U99%) de $\pm 0,97$ W/m²K para um valor médio de 190,89 W/m²K, para a velocidade de 10 m/s, permitindo escrever coeficiente de convecção forçada como uma função da velocidade do fluxo de ar através da Eq. (5.11).

$$h(V) = 60,34866 \times V^{0,49998} \therefore R^2 = 1 \quad (5.11)$$

A modalidade natural possui um valor médio de 15,80 W/m²K e variação de $\pm 1,70$ W/m²K podendo ser escrita como uma função da temperatura através da Eq. (5.12).

$$h(T) = 17,70174 - \frac{7,2062}{\exp\left(\frac{T}{324,22596}\right)} \therefore R^2 = 0,9944 \quad (5.12)$$

Figura 5.4: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_C = 4\text{mm}$.



Fonte: O Autor

5.1.5 Amostra com Comprimento Característico de Cinco Milímetros

O comportamento do coeficiente de convecção para a amostra com dimensões de $25 \times 17 \times 3$ mm encontra-se na figura 5.5 e varia conforme a Eq. (5.13).

$$h(V) = 0,16794V^3 - 3,60333V^2 + 34,6549V + 18,36965 \therefore R^2 = 0,99695 \quad (5.13)$$

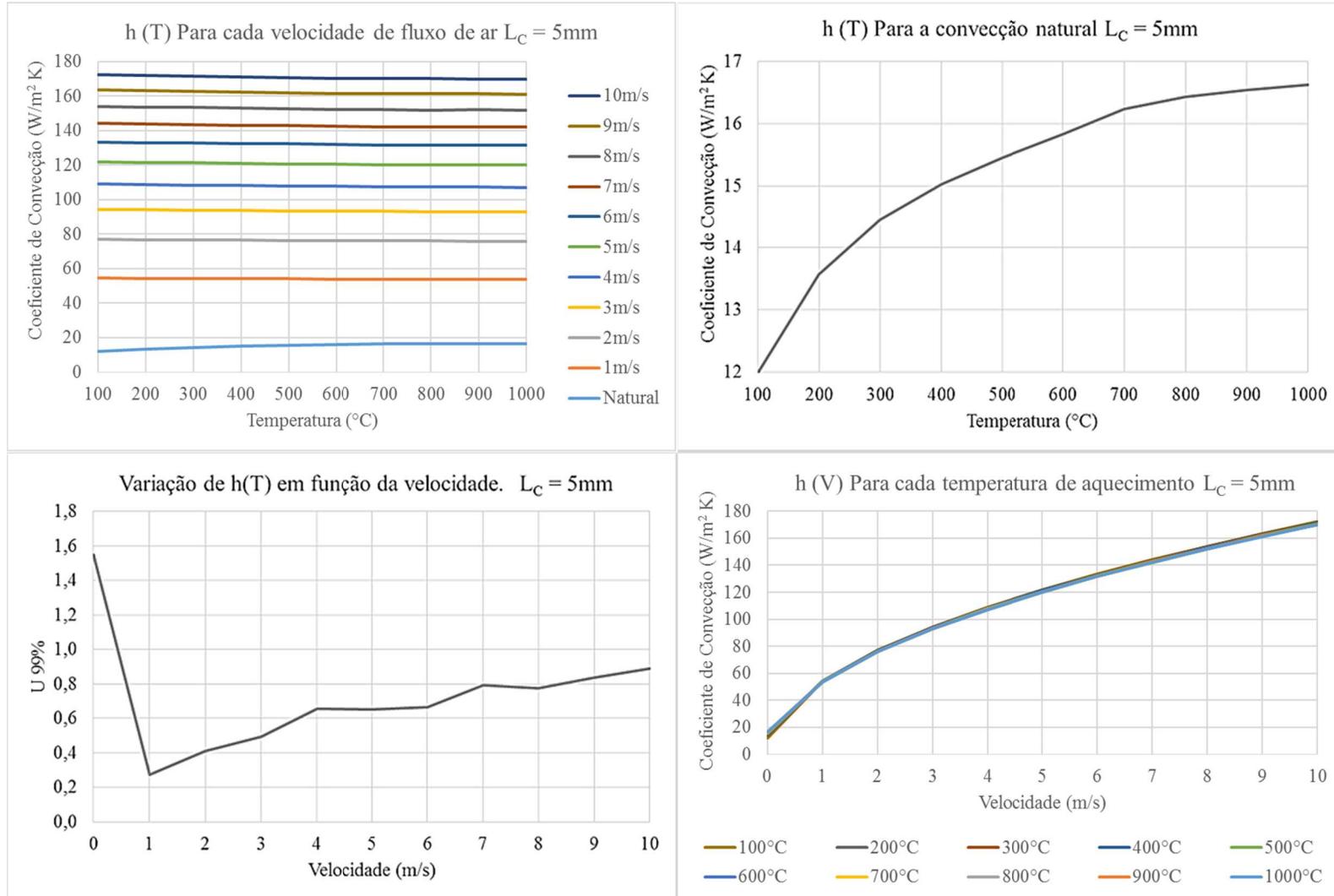
A figura 5.5 mostra uma variação máxima de $\pm 0,89$ W/m²K para a velocidade de 10 m/s, com valor médio de 170,86 W/m²K, assim pode-se escrever a convecção forçada como função da velocidade do fluxo de ar através da Eq. (5.14).

$$h(V) = 53,98977 \times V^{0,50026} \therefore R^2 = 1 \quad (5.14)$$

O resfriamento natural possui uma variação de $\pm 1,55$ W/m²K para um valor médio de 15,21 W/m²K, assim a variação deste coeficiente em função da temperatura obedece a Eq. (5.15).

$$h(T) = 16,85672 - \frac{6,63263}{\exp\left(\frac{T}{304,77445}\right)} \therefore R^2 = 0,99526 \quad (5.15)$$

Figura 5.5: Comportamento do coeficiente de convecção e variação da função $h(T)$. $L_C = 5\text{mm}$.



Fonte: O Autor

5.1.6 Visão Geral da Variação Do Coeficiente de Convecção.

Seguindo a metodologia experimental pode-se obter os resultados mostrados na tabela 5.1. Média dos valores obtidos nas tabelas presentes no APÊNDICE 1.

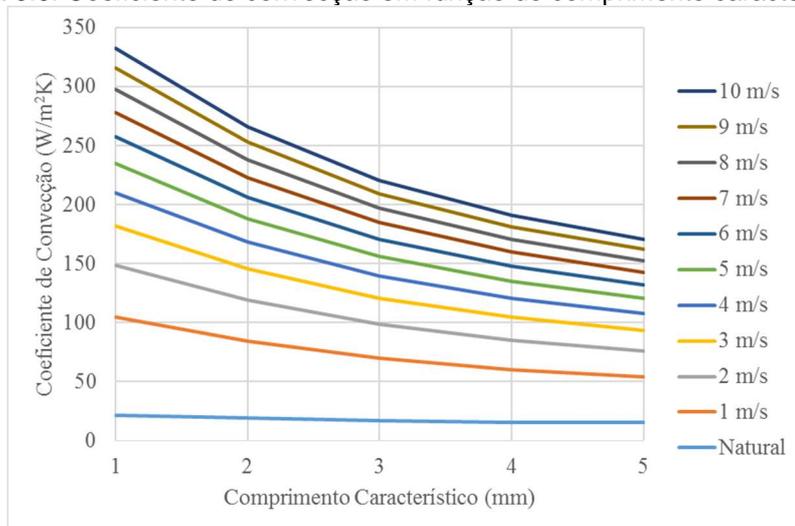
Tabela 5.1: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e do comprimento característico amostra.

| | $L_c = 1 \text{ mm}$ | $L_c = 2 \text{ mm}$ | $L_c = 3 \text{ mm}$ | $L_c = 4 \text{ mm}$ | $L_c = 5 \text{ mm}$ |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 00 m/s | 21,67 | 19,40 | 17,27 | 15,80 | 15,21 |
| 01 m/s | 105,06 | 84,34 | 69,85 | 60,38 | 54,03 |
| 02 m/s | 148,65 | 119,12 | 98,83 | 85,38 | 76,37 |
| 03 m/s | 182,08 | 145,90 | 121,00 | 104,57 | 93,56 |
| 04 m/s | 210,27 | 168,39 | 139,66 | 120,64 | 107,95 |
| 05 m/s | 234,91 | 188,12 | 156,03 | 134,91 | 120,78 |
| 06 m/s | 257,37 | 206,11 | 170,88 | 147,77 | 132,31 |
| 07 m/s | 278,00 | 222,69 | 184,64 | 159,61 | 142,89 |
| 08 m/s | 297,46 | 237,94 | 197,42 | 170,68 | 152,78 |
| 09 m/s | 315,54 | 252,76 | 209,40 | 181,07 | 162,08 |
| 10 m/s | 332,66 | 266,22 | 220,70 | 190,89 | 170,86 |

Fonte: O Autor.

Com base na tabela 5.1 é possível construir os gráficos da figura 5.6 os quais mostram o comportamento do coeficiente de convecção em função do comprimento característico.

Figura 5.6: Coeficiente de convecção em função do comprimento característico.



Fonte: O Autor

As equações governantes do coeficiente de convecção em função do comprimento característico são definidas para cada velocidade de resfriamento desde a natural Eq. (5.16), com velocidade nula, até dez metros por segundo na Eq. (5.26).

$$h(Lc) = 12,61129 + 12,6965 \times 0,71957^{Lc} \therefore R^2 = 0,99117 \quad (5.16)$$

$$h(Lc) = 40,47407 + 95,64331 \times 0,67584^{Lc} \therefore R^2 = 0,99992 \quad (5.17)$$

$$h(Lc) = 57,42855 + 135,31843 \times 0,67444^{Lc} \therefore R^2 = 0,99998 \quad (5.18)$$

$$h(Lc) = 70,47879 + 165,73591 \times 0,67372^{Lc} \therefore R^2 = 0,99997 \quad (5.19)$$

$$h(Lc) = 81,37612 + 191,56053 \times 0,67318^{Lc} \therefore R^2 = 0,99998 \quad (5.20)$$

$$h(Lc) = 91,44036 + 213,64983 \times 0,67185^{Lc} \therefore R^2 = 0,99997 \quad (5.21)$$

$$h(Lc) = 100,2125 + 234,1438 \times 0,67157^{Lc} \therefore R^2 = 0,99996 \quad (5.22)$$

$$h(Lc) = 107,97966 + 252,98482 \times 0,67243^{Lc} \therefore R^2 = 0,99997 \quad (5.23)$$

$$h(Lc) = 116,01357 + 270,71411 \times 0,67049^{Lc} \therefore R^2 = 0,99998 \quad (5.24)$$

$$h(Lc) = 122,49775 + 287,38543 \times 0,67215^{Lc} \therefore R^2 = 0,99995 \quad (5.25)$$

$$h(Lc) = 129,64618 + 302,83272 \times 0,67071^{Lc} \therefore R^2 = 0,99997 \quad (5.26)$$

De posse das equações de Eq. (5.16), (5.17), (5.18), (5.19), (5.20), (5.21), (5.22), (5.23), (5.24), (5.25) e (5.26) é possível determinar o valor do coeficiente de convecção para uma chapa plana totalmente aquecida imersa no ar, para comprimentos característicos variando de um a cinco milímetros, com fluxos de ar variando de zero (convecção natural) a dez metros por segundo.

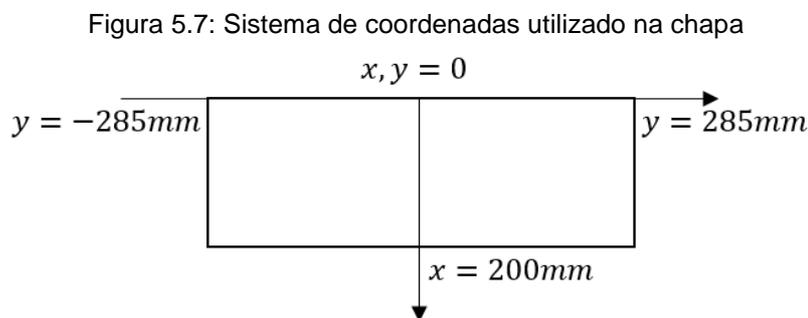
Vale salientar o fato de ter sido considerado, no escoamento natural, uma chapa plana aquecida apenas na face superior onde a convecção é mais expressiva.

5.2 Estudo do Campo de Temperatura

Obtidas as equações para a determinação dos coeficientes de convecção para as diversas temperaturas de aquecimento, velocidades de fluxo de ar e comprimentos característico, pode-se analisar o campo de temperatura e como as perdas superficiais o afeta.

Para avaliar o campo de temperatura é necessário classificar a chapa no tocante a espessura, assim fazendo uso da Eq. (3.32), tem-se uma espessura relativa de 0,15. Classificando a chapa como fina, desta forma toma-se o fluxo de calor como bidimensional.

Para análise do campo de temperatura sobre a superfície da chapa em função do tempo, foram fixados, para cada experimento, termopares nos pontos $x = 20, 60, 100, 140$ e 180 mm com $y = 0$ na linha central onde ocorre, na face oposta, o deslocamento da fonte de calor (Figura 5.7).



Fonte: O Autor.

5.2.1 Efeito das Condições de Contorno

Foram realizadas duas análises distintas do campo de temperatura, na primeira foi computado o campo desconsiderando as perdas por convecção e radiação, pois como a chapa é considerada fina, a perda de calor por condução ao longo da espessura é desprezível. Na segunda todas as perdas foram desprezadas, e considerou-se todo o calor sendo absorvido pela peça.

Conforme calculado anteriormente a fonte de calor fornece à peça uma energia de 265 W. Caso fossem consideradas as perdas superficiais, estas deveriam ser subtraídas da energia total da fonte.

$$Q_{cond} = \frac{k\Delta T}{\epsilon} = \frac{51,9 \times 0}{0,0034} = 0$$

A geometria da fonte, pode ser considerada como um disco com 17,5 mm de raio. Desta forma tem-se um comprimento característico de 8,75 mm.

$$L_c = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} = \frac{17,5 \text{ mm}}{2} = 8,75 \text{ mm}$$

O coeficiente de convecção é calculado através da Eq. (5.16).

$$h(8,75) = 12,61129 + 12,6965 \times 0,71957^{8,75} = 13,32 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A temperatura superficial considerada foi tomada como a maior temperatura média obtida durante o processo, caso, fosse analisado um processo de soldagem seria considerado a temperatura de fusão do material, mas nos experimentos a temperatura máxima média atingida foi de quinhentos e setenta e três Kelvin assim:

$$Q_{conv} = h(T_S - T_0) = 13,32 \times (573 - 303) = 3596,4 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{rad} = \sigma\epsilon(T_S^4 - T_0^4) = 5,6704 \times 10^{-8} \times 0,21 \times (573^4 - 303^4) = 1183,3 \text{ W/m}^2$$

Como dito anteriormente a área de transferência de calor é de aproximadamente novecentos e sessenta milímetros quadrados, correspondendo ao disco de trinta e cinco milímetros de diâmetro, multiplicando-se esta área pelas perdas calculadas anteriormente tem-se:

$$Q_{conv} = 3596,4 \text{ W/m}^2 \times 0,000962 \text{ m}^2 = 3,46 \text{ W}$$

$$Q_{rad} = 1183 \text{ W/m}^2 \times 0,000962 \text{ m}^2 = 1,14 \text{ W}$$

Desta forma considerando as perdas superficiais, será utilizada uma energia de $265W - 5,85W = 260,4W$.

5.2.2 Comparação dos Resultados

O modelo de Green, na forma proposta, não contempla ciclos térmicos com temperatura de pico inferior a duzentos e quarenta graus Celsius. Devido à baixa potência do bico de Bunsen, esta temperatura só pode ser ultrapassada com baixas velocidades de deslocamento da fonte de calor, assim os resultados encontram-se limitados a velocidade de meio milímetro por segundo em diversos pontos conforme mostrado na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Temperaturas experimentais e o modelo de Rosenthal considerando e desconsiderando as perdas por convecção e radiação. Linha central a 0,5 mm/s.

| Posição | Experimental (°C) | Com Perdas (°C) | Sem Perdas (°C) |
|------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| X = 020 mm | 289,0 | 314,16 | 319,6 |
| X = 060 mm | 325,3 | 314,16 | 319,6 |
| X = 100 mm | 331,8 | 314,16 | 319,6 |
| X = 140 mm | 335,7 | 314,16 | 319,6 |
| X = 180 mm | 358,6 | 314,16 | 319,6 |
| Média | 328,08 | 314,16 | 319,6 |

Fonte: O Autor

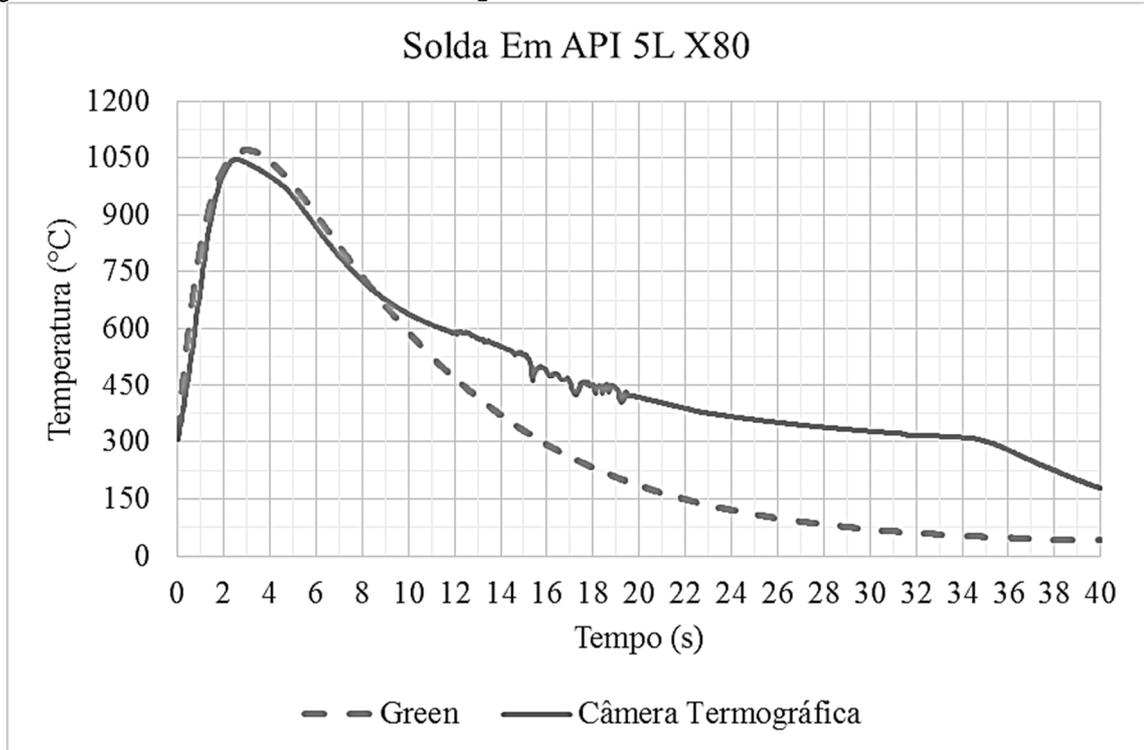
Tabela 5.3: Temperaturas experimentais e o modelo de Green considerando e desconsiderando o fator de correção. Linha central a 0,5 mm/s.

| Posição | Experimental (°C) | Com Correção (°C) | Sem Correção (°C) |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| X = 020 mm | 289,0 | 269,5 | 235,1 |
| X = 060 mm | 325,3 | 300,1 | 248,5 |
| X = 100 mm | 331,8 | 318,8 | 254,4 |
| X = 140 mm | 335,7 | 332,7 | 257,7 |
| X = 180 mm | 358,6 | 344,1 | 259,8 |
| Média | 328,08 | 313,0 | 251,1 |

Fonte: O Autor

Para comprovar a real eficiência do modelo, foi realizada uma solda em um aço API 5L X80, com uma diferença entre temperaturas de pico de 25°C e leituras mostradas na Figura 5.8. Os parâmetros de soldagem encontram-se na Tabela 5.4.

Figura 5.8: Leituras de uma câmera termográfica e o modelo de Green em uma solda em API 5L X80



Fonte: O Autor

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem para o Aço API 5L X80

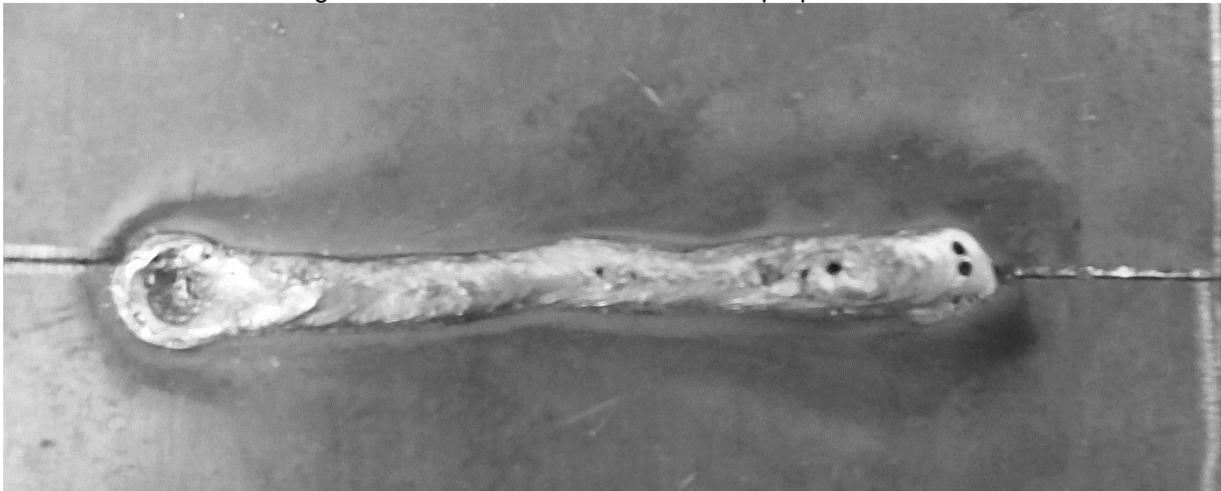
| | |
|--|------------|
| Corrente | 192 A |
| Tensão | 18,4 V |
| Velocidade de soldagem | 3 mm/s |
| Velocidade alimentação do arame | 10 m/min |
| Vazão do gás (75% Ar+25% CO ₂) | 16 L/min |
| Polaridade | CC+ |
| Eficiência térmica do processo | 85% |
| Comprimento do cordão de solda | 100 mm |
| Posição de soldagem | Horizontal |

Fonte: O Autor

5.3 Influência da Convecção na Soldagem

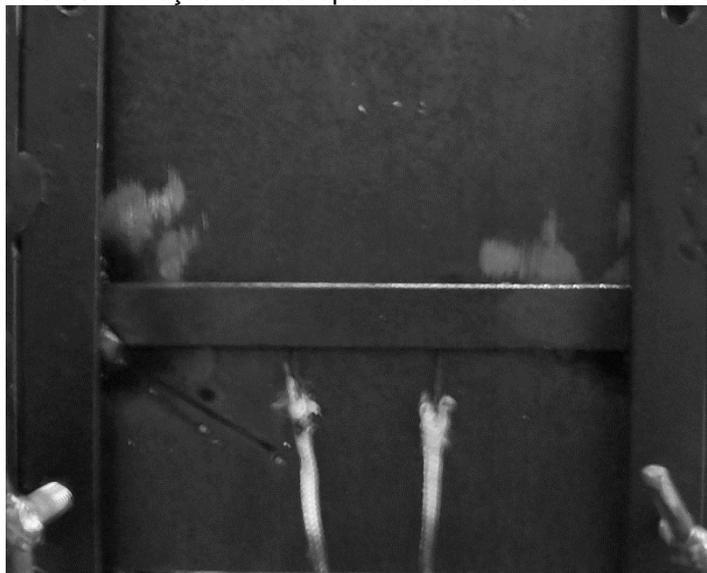
Tendo como base os experimentos realizados por (AZEVEDO, 2010) e (FERREIRA, YADAVA, *et al.*, 2013), os quais mostraram ser inviável utilizar de um fluxo de ar sobre o cordão de solda. Os experimentos realizados direcionaram um fluxo de ar mais intenso na face oposta ao deslocamento da tocha, no entanto os resultados com o fluxo perpendicular (Figura 5.9), mesmo utilizando uma proteção por chapa externa, na face oposta, conforme Figura 5.10, a não foi possível impedir a porosidade.

Figura 5.9: Cordão realizado com fluxo perpendicular.



Fonte: O Autor

Figura 5.10: Proteção na face oposta ao deslocamento do da tocha.



Fonte: O Autor

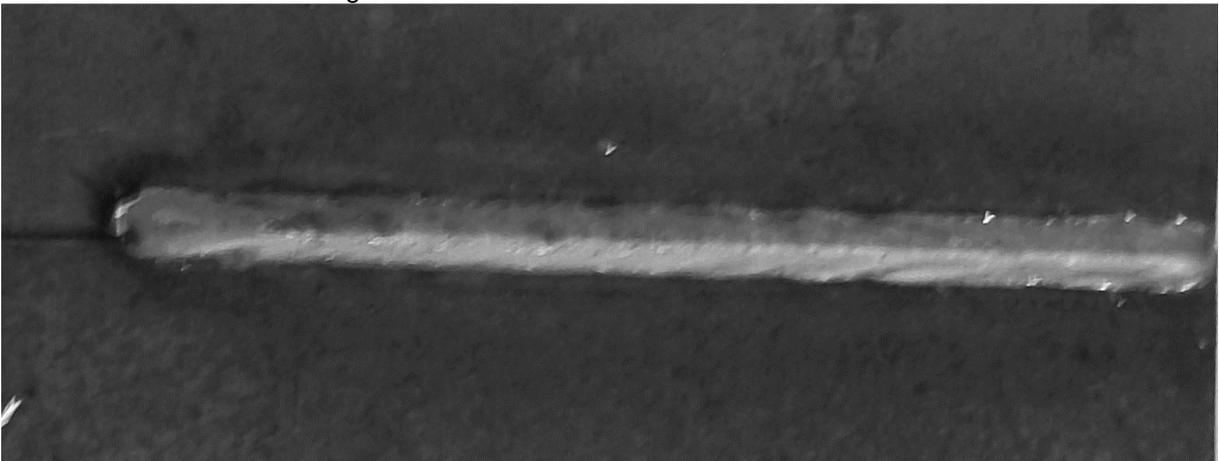
Contudo os resultados como o fluxo de ar paralelo (Figura 5.12), foram melhores, mesmo sem a proteção do cordão por uma chapa externa. Assemelhando-se aos resultados obtidos sem a utilização do fluxo de ar (Figura 5.11).

Figura 5.11: Cordão realizado sem o fluxo de ar.



Fonte: O Autor.

Figura 5.12: Cordão Realizado com Fluxo de ar.

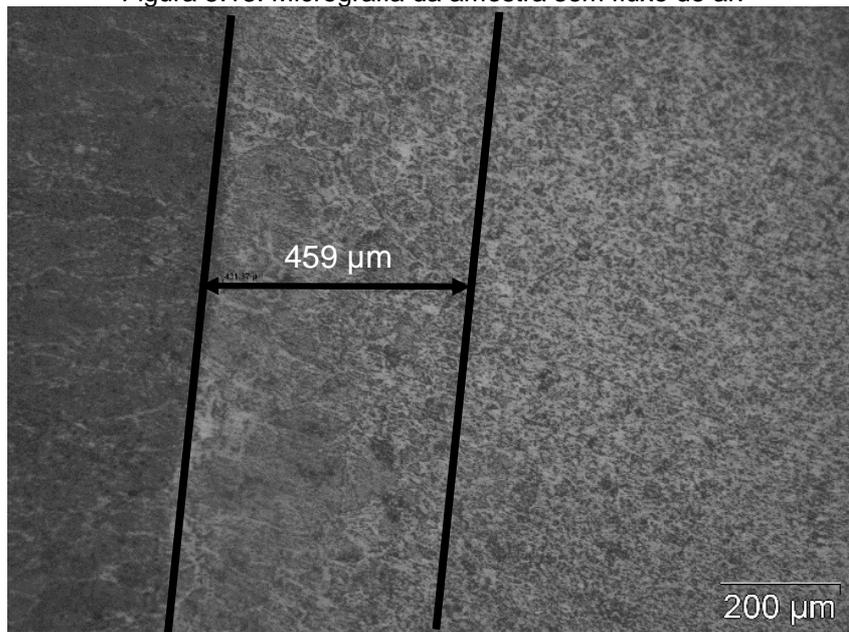


Fonte: O Autor.

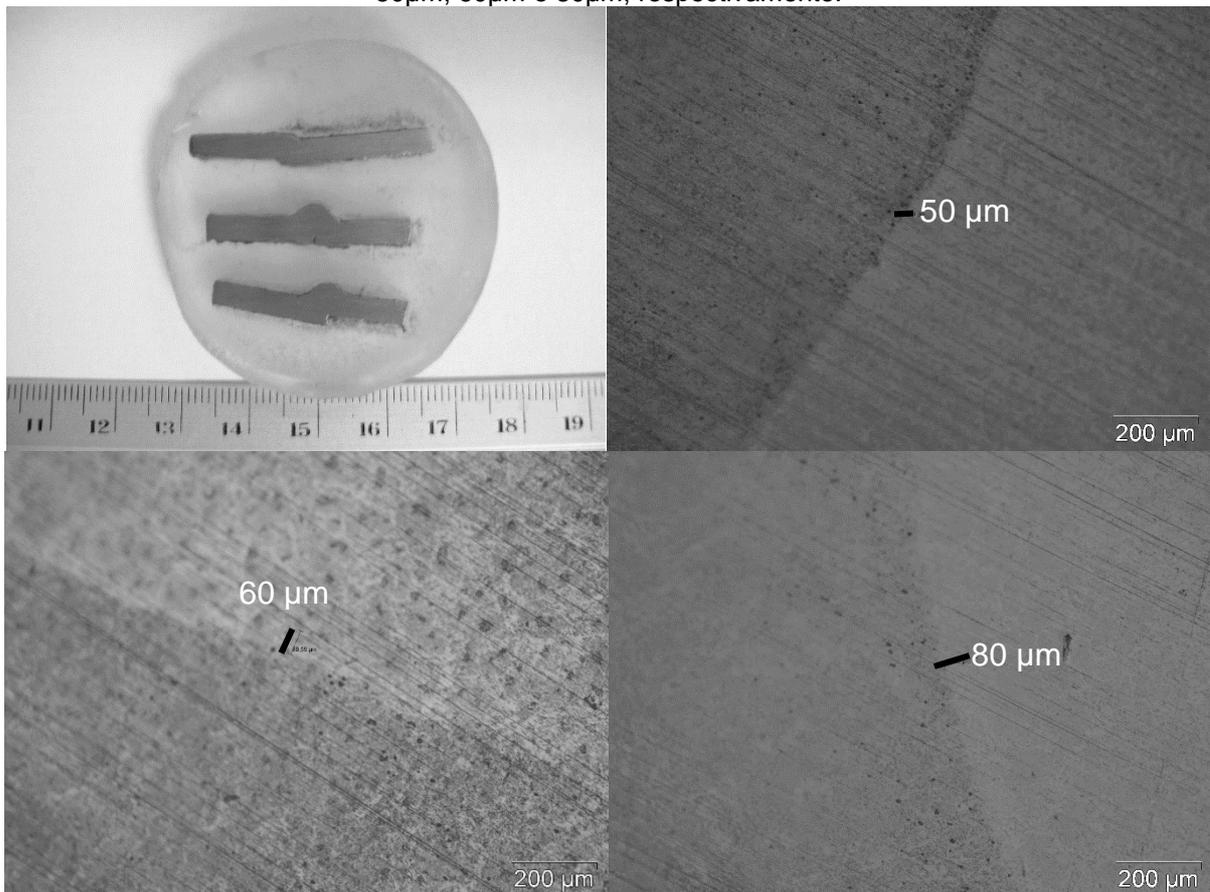
Tendo o procedimento com fluxo de ar paralelo, apresentado um bom resultado visual, procedeu-se a análise microscópica das três soldas realizadas sob as mesmas condições.

A figura 5.13, mostra a micrografia da amostra soldada sem a presença do fluxo de ar com uma ZTA da ordem de $450\mu\text{m}$. A figura 5.14 mostra as micrografias das amostras soldadas com a presença do fluxo de ar com uma ZTA da ordem de $50\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ e $80\mu\text{m}$.

Figura 5.13: Micrografia da amostra sem fluxo de ar.



Fonte: O Autor

Figura 5.14: Amostras, realizadas com o fluxo de ar, e suas respectivas micrografias. ZTA na ordem de $50\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ e $80\mu\text{m}$, respectivamente.

Fonte: O Autor

6 CONCLUSÕES

O coeficiente de convecção natural para chapas planas horizontais é diretamente proporcional a temperatura, pois o ar tem sua densidade reduzida, e inversamente proporcional ao comprimento característico, devido ao aumento da superfície a ser resfriada.

Para a convecção natural, a variação com a temperatura, dependendo da análise, não pode ser negligenciada, pois este coeficiente é inferior a $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ com variação na ordem de $\pm 2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Com a tendência de redução mediante o aumento do comprimento característico, esta variação torna-se cada vez mais significativa, pois valor é reduzido para a ordem de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

O coeficiente de convecção forçada para chapas planas horizontais diminui com o aumento da temperatura e do comprimento característico e aumenta com a velocidade de resfriamento.

Diferente da convecção natural, a forçada, comporta-se de forma totalmente oposta, pois o fluxo de ar sobre a chapa não permite a troca do ar pelo ar frio pelo ar quente, o qual é arrastado de forma constante.

Assim, existe, na superfície, uma quantidade de calor “fixa” a ser removida pelo fluxo de ar, desta forma o coeficiente de convecção forçada é inversamente proporcional ao comprimento característico da superfície, considerando placas planas.

Contudo para valores médios da ordem de $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ uma variação na ordem de $\pm 2 \text{ W/m}^2\text{K}$, esta variação torna-se irrelevante e desta forma pode-se afirmar o fato do coeficiente de convecção forçada ser independente da temperatura.

O aumento com a velocidade de resfriamento é esperado, pois o coeficiente de convecção forçada é diretamente proporcional ao número de Nusselt e este ao número de Reynolds, uma função da velocidade. Esta relação pode ser expressa de forma a relacionar o coeficiente de convecção forçada diretamente a raiz quadrada da temperatura.

Na avaliação dos efeitos sobre o campo de temperatura, percebe-se ser de fundamental importância considerar um coeficiente de convecção próximo ao valor real, para obtenção de leituras mais corretas.

A análise de Rosenthal permite obter o valor médio das temperaturas de pico ao longo da linha de calor, enquanto a análise com a função de Green fornece a temperatura ponto a ponto.

Nos processos de soldagem a convecção forçada possui dois comportamentos distintos:

- Quando o fluxo de ar é dirigido perpendicularmente ao cordão de solda o rápido resfriamento provoca descontinuidades macroscópicas inviabilizando a aplicação do mesmo.

- Para o escoamento paralelo, tem-se um resfriamento mais brando e uniforme ao longo do cordão, acelerando a troca de calor na face oposta da chapa. Como a distribuição de calor em chapas finas ocorre de forma bidimensional, e a redução da ZTA de maneira uniforme.

De acordo com os experimentos realizados pode-se perceber de maneira aproximada uma ZTA da ordem de 0,5mm, para o processo resfriado naturalmente, e de 0,07mm para o processo auxiliado pela convecção forçada.

Este resultado significa uma redução de aproximadamente 85% na espessura da ZTA da junta soldada, mostrando uma significativa melhoria do processo. O ponto negativo, relaciona-se ao surgimento de micro poros nas regiões da ZF e ZTA.

Desta maneira, sugere-se para futuros trabalhos investigar as propriedades mecânicas da junta soldada com a utilização do método desenvolvido.

REFERÊNCIAS

ANTONINO, T. S. **ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE UMA JUNTA SOLDADA DO AÇO API 5L X80.** UFPE. Recife, p. 114. 2014.

ASM. **ASM HANDBOOK.** 10^a. ed. [S.l.]: [s.n.], v. I, 1990.

ATABAKI, M. M. et al. Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration. **Optics & Laser Technology**, v. Único, n. 59, p. 68 - 92, 13 Dezembro 2014.

AZEVEDO, R. M. L. **Estudo da Influência dos Ventos Sobre a Soldabilidade de Aço Baixo Carbono Pelos Processos FCAW-G e FCAW-S.** UFPE. Recife. 2010. (Dissertação).

BRANCO, W. Encontro GLP. **GASESCOMBUSTIVEIS.COM.BR**, 01 Janeiro 2014.

Disponível em:

<http://www.gasescombustiveis.com.br/encontroglp/PALESTRAS/WAGNER_BRANCO/EFICIENCIA_PROC_COMBUSTAO_GAS_WAGNER_BRANCO.pdf>. Acesso em: 01 Junho 2014.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem Prática.** 3^a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. 900 p. ISBN 978-85-7726-075-1.

CHURCHILL, W. S.; CHU, H. H. S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Plate. **International Journal of Heat Mass Transfer**, 1975. 1049.

CHURCHILL, W. S.; CHU, H. H. S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. **International Journal of Heat Mass Transfer**, 1975. 1323.

CENLAB. Ferragens - Bico de Bunsen. **CENLAB.COM.BR**, 01 Janeiro 2014.

Disponível em: <<http://www.cienlab.com.br/51-402-thickbox/bico-de-bunsen-com-registro.jpg>>. Acesso em: 01 junho 2014.

CIENLAB. Segurança e Medicina no Trabalho - Anemômetros. **CIENLAB.COM.BR**, 01 Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.cienlab.com.br/334-658-thickbox/anemometro-digital-portatil.jpg>>. Acesso em: 01 Junho 2014.

CORCIONE, M. Natural convection heat transfer above heated horizontal surfaces. **5th. Conf. on Heat and Mass transfer**, Acapulco, Mexico, n. 08, p. 206-243, Janeiro 2008. ISSN ISBN: 978-960-6766-31-2 / ISSN: 1790-2769.

CORCIONE, M.; HABIB, E.; CAMPO, A. Natural convection from inclined plates to gases and liquids when both sides are uniformly heated at the same temperature. **International Journal of Thermal Sciences**, 2011. 1405 - 1416.

DATATAKER. Intelligent Data Logger with in-built Web Server. **DATATAKER.COM**, 01 Janeiro 2014. Disponível em: <<http://datataker.com/images/products/DT80zoom.jpg>>. Acesso em: 01 Junho 2014.

ESAB. Conhecimento - Apostilas. **ESAB.COM.BR**, 25 Janeiro 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmig_low.pdf>. Acesso em: 01 Junho 2014.

ESAB. Soldagem MIG/MAG. **ESAB.COM.BR**, 01 Janeiro 2014. Disponível em: <http://mam.esab.com/assets/1/BDBA5CC688D14EBE822C00D265DF8E7D/img/79BE7A47D8434DEE8520EE854DCFDBA8/0030016-pt_BR-MainView-01.jpg>. Acesso em: 01 Junho 2014.

FERREIRA, R. A. S. et al. ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DO AÇO AH 32 SOLDADAS SOB O EFEITO DOS VENTOS. **ABM - BRASIL**, 2013. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br>>. Acesso em: 01 Junho 2014.

FISHENDEN, W.; SAUNDER, O.. **An Introduction to Heat Transfer**. Oxford: Clarendon Press, 1950.

FLINT, T. F.; FRANCIS, J. A.; YATES, J. R. Analytical solutions of the transient thermal field induced in finite bodies with insulating and convective boundary conditions subjected to a welding heat source. **22° Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology**, San Francisco, Agosto 2013.

FOGAGNOLO, J. B. **Introdução a Processos e Metalurgia da Soldagem**. Unicamp. São Paulo, p. 99. 2011.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução A Mecânica Dos Fluidos**. 7ª. ed. Rio De Janeiro: LTC, 2010.

GOLDAK, J. et al. Computer Modeling of Heat Flow in Welds. **Metalurgical Transactions B**, v. 17B, p. 587 - 600, Setembro 1986.

GOLDAK, J.; ASADI, M.; ALENA, R. G. Why power per unit length of weld does not characterize a weld? **Computational Materials Science**, 24 Fevereiro 2010. 390 - 401.

GUIMARÃES, P. B. **Estudo do Campo De Temperatura Obtido Numericamente para Posterior Determinação das Tensões Residuais numa Junta Soldada de Aço ASTM AH36**. UFPE. Recife, p. 112. 2010. (Tese).

INTERNATIONAL, J. Business & Industry. **JOYFAY.COM**, 01 Janeiro 2015.

Disponível em:

<<http://cdn.joyfay.com/media/catalog/product/cache/1/image/720x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/J/F/JFGCM00001.jpg>>. Acesso em: 01 fevereiro 2015.

KITAMURA, K.; MITSUISHI, A. Fluid flow and heat transfer of mixed convection over heated horizontal plate placed in vertical downward flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 2327 – 2336, Janeiro 2010.

LAO. LAO INDÚSTRIA, 2015. Disponível em: <<http://www.laoindustria.com.br/>>.

Acesso em: 01 jun. 2014.

LINDSTEDT, M.; KARVINEN, R. Conjugate heat transfer in a plate – One surface at constant temperature and the other cooled by forced or natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 489 - 495, Agosto 2013.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. Único, 2011. 365 p.

MEHRTASH, M.; TARI, I. A Correlation for Natural Convection Heat Transfer from Inclined Plate-lined Heat Sinks. **Applied Thermal Engineering**, 2012.

MILER. **Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)**, 2014. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com>>. Acesso em: 01 Junho 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. Processos de Soldagem. **DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**, 01 Fevereiro 2006. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br>>. Acesso em: Junho 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. **ESCOLA DE ENGENHARIA - UFMG**, 01 Janeiro 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 31 Junho 2014.

OSTRACH, S. Analysis of Laminar Free Convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Parallel to the Direction of the Generating Body Force. **National Advisory Committee for Aeronautics**, 1953. 63 -79.

PANTOKRATORAS, A. Steady laminar assisted mixed convection normally to a heated horizontal plate with finite length. **International Journal of Thermal Sciences**, 2012. 158-169.

PATHAK, C. S. et al. Analysis of Thermal Cycle during Multipass Arc Welding. **Welding Research**, v. 91, p. 149-s - 154-s, Maio 2012.

QUIMIS. Forno Mufla Microprocessado. **QUIMIS.COM.BR**, 01 Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.quimis.com.br/produtos/imagens/prod118.jpg>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: Ed. Soldasoft, 2002.

STEWARTSON, K. On the Free Convection from a Horizontal Plate. **Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP**, 01 set. 1958.

WAINER, E.; BRANDÍ, S. D.; MELO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., v. Único, 2004. 506 p. ISBN ISBN 85-212-0238-5.

APÊNDICE 1: COEFICIENTES DE CONVECÇÃO.

Tabela A.1: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 1mm$.

| | Natural | 1m/s | 2m/s | 3m/s | 4m/s | 5m/s | 6m/s | 7m/s | 8m/s | 9m/s | 10m/s |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100°C | 16,79 | 105,93 | 149,79 | 183,50 | 211,89 | 236,70 | 259,48 | 280,30 | 299,65 | 317,95 | 334,99 |
| 200°C | 19,12 | 105,64 | 149,44 | 182,98 | 211,38 | 236,24 | 258,83 | 279,58 | 298,77 | 317,12 | 334,14 |
| 300°C | 20,32 | 105,44 | 149,12 | 182,65 | 211,19 | 235,68 | 258,18 | 279,45 | 298,31 | 316,70 | 333,25 |
| 400°C | 21,22 | 105,17 | 148,76 | 182,29 | 210,54 | 235,21 | 257,64 | 278,37 | 297,50 | 315,89 | 332,90 |
| 500°C | 21,98 | 105,03 | 148,60 | 181,97 | 210,14 | 234,74 | 257,04 | 277,83 | 297,24 | 315,36 | 332,62 |
| 600°C | 22,74 | 104,85 | 148,38 | 181,75 | 209,88 | 234,41 | 256,85 | 277,43 | 296,98 | 315,17 | 332,60 |
| 700°C | 23,27 | 104,71 | 148,25 | 181,60 | 209,67 | 234,05 | 256,44 | 277,08 | 297,09 | 314,87 | 333,27 |
| 800°C | 23,54 | 104,64 | 148,15 | 181,48 | 209,50 | 234,37 | 256,76 | 276,84 | 296,64 | 314,46 | 331,96 |
| 900°C | 23,70 | 104,62 | 148,06 | 181,33 | 209,33 | 234,15 | 256,35 | 276,83 | 296,34 | 314,17 | 331,68 |
| 1000°C | 23,98 | 104,55 | 147,95 | 181,24 | 209,20 | 233,56 | 256,13 | 276,25 | 296,04 | 313,69 | 329,24 |
| Média | 21,67 | 105,06 | 148,65 | 182,08 | 210,27 | 234,91 | 257,37 | 278,00 | 297,46 | 315,54 | 332,66 |
| Desvio Padrão | 2,37 | 0,48 | 0,62 | 0,76 | 0,94 | 1,02 | 1,13 | 1,38 | 1,14 | 1,37 | 1,55 |
| Fator t (99%) | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| U (99%) | 2,44 | 0,49 | 0,64 | 0,78 | 0,96 | 1,05 | 1,16 | 1,41 | 1,17 | 1,41 | 1,59 |
| Limite Superior | 24,07 | 105,55 | 149,29 | 182,86 | 211,24 | 235,96 | 258,53 | 279,41 | 298,62 | 316,94 | 334,26 |
| Limite Inferior | 19,26 | 104,57 | 148,01 | 181,30 | 209,31 | 233,86 | 256,21 | 276,58 | 296,29 | 314,13 | 331,07 |

Fonte: O Autor

Tabela A.2: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 2mm$.

| | Natural | 1m/s | 2m/s | 3m/s | 4m/s | 5m/s | 6m/s | 7m/s | 8m/s | 9m/s | 10m/s |
|-----------------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100°C | 15,18 | 84,94 | 120,13 | 147,13 | 169,89 | 189,89 | 208,03 | 224,73 | 240,18 | 254,79 | 268,53 |
| 200°C | 17,26 | 84,72 | 119,80 | 146,72 | 169,42 | 189,45 | 207,48 | 224,12 | 239,59 | 254,14 | 267,87 |
| 300°C | 18,44 | 84,59 | 119,58 | 146,46 | 169,07 | 188,88 | 207,06 | 223,68 | 239,14 | 253,61 | 267,37 |
| 400°C | 19,22 | 84,44 | 119,29 | 146,12 | 168,63 | 188,49 | 206,53 | 223,09 | 238,51 | 252,91 | 266,60 |
| 500°C | 19,78 | 84,28 | 119,12 | 145,87 | 168,37 | 188,16 | 206,21 | 222,64 | 237,89 | 252,44 | 265,90 |
| 600°C | 20,46 | 84,20 | 118,83 | 145,57 | 167,92 | 187,57 | 205,49 | 222,01 | 237,33 | 252,54 | 265,50 |
| 700°C | 20,67 | 84,13 | 118,64 | 145,35 | 167,76 | 187,39 | 205,35 | 221,85 | 237,26 | 252,38 | 265,30 |
| 800°C | 20,84 | 84,08 | 118,62 | 145,30 | 167,63 | 187,28 | 205,25 | 221,79 | 237,18 | 252,18 | 265,23 |
| 900°C | 20,98 | 84,05 | 118,61 | 145,24 | 167,63 | 187,16 | 205,09 | 221,65 | 237,03 | 251,30 | 265,06 |
| 1000°C | 21,03 | 83,99 | 118,55 | 145,26 | 167,58 | 186,93 | 204,64 | 221,35 | 235,24 | 251,30 | 264,81 |
| Média | 19,38 | 84,34 | 119,12 | 145,90 | 168,39 | 188,12 | 206,11 | 222,69 | 237,94 | 252,76 | 266,22 |
| Desvio Padrão | 1,93 | 0,32 | 0,56 | 0,68 | 0,83 | 1,03 | 1,13 | 1,16 | 1,45 | 1,14 | 1,30 |
| Fator t (99%) | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| U (99%) | 1,98 | 0,33 | 0,58 | 0,70 | 0,86 | 1,06 | 1,16 | 1,20 | 1,50 | 1,17 | 1,34 |
| Limite Superior | 21,37 | 84,67 | 119,70 | 146,60 | 169,25 | 189,18 | 207,28 | 223,89 | 239,43 | 253,93 | 267,56 |
| Limite Inferior | 17,40 | 84,01 | 118,54 | 145,20 | 167,53 | 187,06 | 204,95 | 221,49 | 236,44 | 251,59 | 264,88 |

Fonte: O Autor

Tabela A.3: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 3mm$.

| | Natural | 1m/s | 2m/s | 3m/s | 4m/s | 5m/s | 6m/s | 7m/s | 8m/s | 9m/s | 10m/s |
|-----------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100°C | 13,22 | 70,43 | 99,60 | 121,99 | 140,86 | 157,49 | 172,29 | 186,30 | 199,21 | 211,29 | 222,14 |
| 200°C | 15,27 | 70,23 | 99,29 | 121,65 | 140,47 | 157,03 | 172,05 | 185,83 | 198,69 | 210,74 | 222,14 |
| 300°C | 16,36 | 70,10 | 99,22 | 121,44 | 140,39 | 156,74 | 171,70 | 185,46 | 198,35 | 210,34 | 221,76 |
| 400°C | 17,08 | 69,95 | 98,99 | 121,20 | 139,83 | 156,31 | 171,23 | 184,95 | 197,81 | 209,81 | 221,28 |
| 500°C | 17,60 | 69,85 | 98,84 | 120,99 | 139,62 | 156,07 | 170,96 | 184,70 | 197,48 | 209,46 | 220,87 |
| 600°C | 18,11 | 69,74 | 98,69 | 120,79 | 139,32 | 155,64 | 170,49 | 184,15 | 196,92 | 208,81 | 220,22 |
| 700°C | 18,53 | 69,59 | 98,54 | 120,59 | 139,10 | 155,43 | 170,08 | 183,92 | 196,62 | 208,60 | 219,89 |
| 800°C | 18,73 | 69,56 | 98,43 | 120,48 | 139,06 | 155,32 | 170,14 | 183,80 | 196,47 | 208,46 | 219,71 |
| 900°C | 18,87 | 69,55 | 98,38 | 120,46 | 139,02 | 155,18 | 170,05 | 183,67 | 196,38 | 208,36 | 219,59 |
| 1000°C | 18,95 | 69,54 | 98,36 | 120,44 | 138,97 | 155,07 | 169,84 | 183,61 | 196,22 | 208,16 | 219,42 |
| Média | 17,27 | 69,85 | 98,83 | 121,00 | 139,66 | 156,03 | 170,88 | 184,64 | 197,42 | 209,40 | 220,70 |
| Desvio Padrão | 1,86 | 0,32 | 0,43 | 0,55 | 0,69 | 0,84 | 0,90 | 0,97 | 1,06 | 1,10 | 1,07 |
| Fator t (99%) | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| U (99%) | 1,91 | 0,33 | 0,44 | 0,57 | 0,71 | 0,87 | 0,92 | 0,99 | 1,09 | 1,13 | 1,10 |
| Limite Superior | 19,19 | 70,18 | 99,28 | 121,57 | 140,38 | 156,89 | 171,81 | 185,63 | 198,51 | 210,54 | 221,81 |
| Limite Inferior | 15,36 | 69,53 | 98,39 | 120,44 | 138,95 | 155,16 | 169,96 | 183,65 | 196,32 | 208,27 | 219,60 |

Fonte: O Autor

Tabela A.4: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 4mm$.

| | Natural | 1m/s | 2m/s | 3m/s | 4m/s | 5m/s | 6m/s | 7m/s | 8m/s | 9m/s | 10m/s |
|-----------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100°C | 12,30 | 60,89 | 86,09 | 105,47 | 121,81 | 136,16 | 148,95 | 160,94 | 172,23 | 182,68 | 192,56 |
| 200°C | 13,99 | 60,72 | 85,87 | 105,18 | 121,43 | 135,78 | 148,74 | 160,66 | 171,76 | 182,20 | 192,05 |
| 300°C | 14,94 | 60,60 | 85,69 | 104,97 | 121,12 | 135,52 | 148,45 | 160,34 | 171,41 | 181,85 | 191,69 |
| 400°C | 15,55 | 60,46 | 85,51 | 104,73 | 120,81 | 135,14 | 148,04 | 159,92 | 170,92 | 181,39 | 191,20 |
| 500°C | 16,00 | 60,39 | 85,38 | 104,56 | 120,59 | 134,90 | 147,81 | 159,65 | 170,64 | 181,13 | 190,89 |
| 600°C | 16,54 | 60,31 | 85,23 | 104,34 | 120,28 | 134,52 | 147,40 | 159,17 | 170,11 | 180,67 | 190,35 |
| 700°C | 16,92 | 60,18 | 85,05 | 104,16 | 120,17 | 134,24 | 147,05 | 158,83 | 170,05 | 180,38 | 190,16 |
| 800°C | 17,09 | 60,13 | 85,03 | 104,12 | 120,11 | 134,33 | 147,16 | 158,98 | 169,96 | 180,10 | 190,11 |
| 900°C | 17,18 | 60,11 | 85,02 | 104,10 | 120,09 | 134,28 | 147,08 | 158,80 | 169,92 | 180,23 | 190,02 |
| 1000°C | 17,50 | 60,03 | 84,90 | 104,08 | 120,02 | 134,21 | 146,99 | 158,80 | 169,81 | 180,11 | 189,88 |
| Média | 15,80 | 60,38 | 85,38 | 104,57 | 120,64 | 134,91 | 147,77 | 159,61 | 170,68 | 181,07 | 190,89 |
| Desvio Padrão | 1,65 | 0,29 | 0,40 | 0,50 | 0,63 | 0,71 | 0,75 | 0,82 | 0,86 | 0,93 | 0,95 |
| Fator t (99%) | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| U (99%) | 1,70 | 0,30 | 0,42 | 0,51 | 0,65 | 0,73 | 0,77 | 0,84 | 0,89 | 0,96 | 0,97 |
| Limite Superior | 17,50 | 60,68 | 85,79 | 105,08 | 121,29 | 135,64 | 148,53 | 160,45 | 171,57 | 182,03 | 191,87 |
| Limite Inferior | 14,10 | 60,09 | 84,96 | 104,05 | 119,99 | 134,18 | 147,00 | 158,77 | 169,79 | 180,12 | 189,92 |

Fonte: O Autor

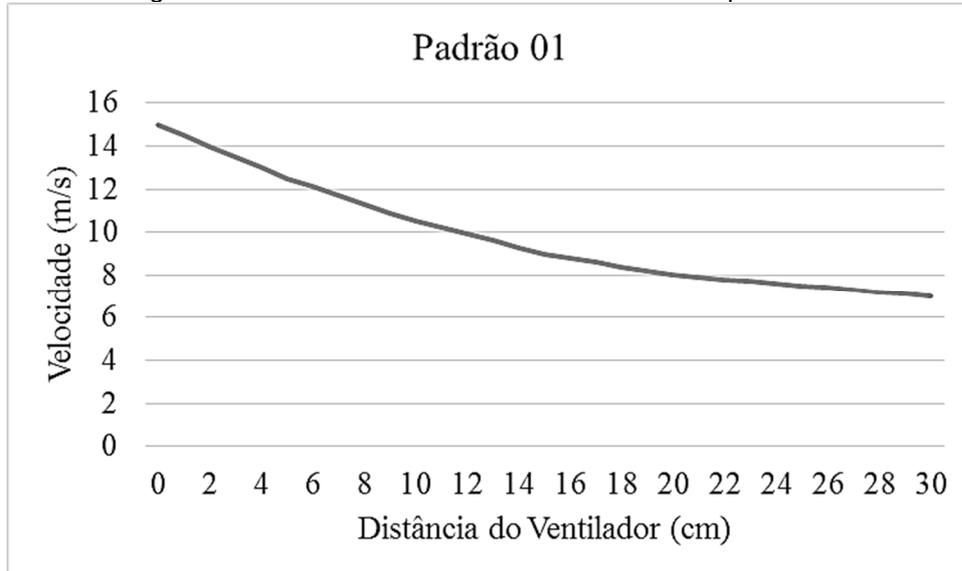
Tabela A.5: Valores médios do Coeficiente de convecção (W/m^2K) variando em função da velocidade do fluxo de ar e da temperatura de aquecimento da amostra com $L_c = 5mm$.

| | Natural | 1m/s | 2m/s | 3m/s | 4m/s | 5m/s | 6m/s | 7m/s | 8m/s | 9m/s | 10m/s |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100°C | 11,98 | 54,51 | 77,08 | 94,41 | 109,01 | 121,88 | 133,33 | 144,21 | 153,96 | 163,52 | 172,37 |
| 200°C | 13,58 | 54,36 | 76,87 | 94,15 | 108,71 | 121,55 | 133,15 | 143,82 | 153,77 | 163,07 | 171,92 |
| 300°C | 14,45 | 54,25 | 76,68 | 93,94 | 108,50 | 121,30 | 132,91 | 143,53 | 153,47 | 162,78 | 171,59 |
| 400°C | 15,02 | 54,11 | 76,49 | 93,70 | 108,19 | 120,99 | 132,53 | 143,15 | 153,08 | 162,32 | 171,20 |
| 500°C | 15,45 | 54,04 | 76,34 | 93,57 | 107,97 | 120,80 | 132,33 | 142,94 | 152,81 | 162,08 | 170,84 |
| 600°C | 15,83 | 53,93 | 76,16 | 93,37 | 107,67 | 120,48 | 132,01 | 142,59 | 152,36 | 161,64 | 170,29 |
| 700°C | 16,24 | 53,83 | 76,08 | 93,21 | 107,55 | 120,16 | 131,80 | 142,17 | 152,22 | 161,44 | 170,20 |
| 800°C | 16,43 | 53,74 | 76,03 | 93,14 | 107,40 | 120,25 | 131,72 | 142,26 | 151,99 | 161,37 | 170,11 |
| 900°C | 16,54 | 53,79 | 75,99 | 93,08 | 107,26 | 120,20 | 131,68 | 142,21 | 152,12 | 161,33 | 170,08 |
| 1000°C | 16,62 | 53,78 | 75,98 | 93,04 | 107,19 | 120,15 | 131,60 | 142,00 | 151,98 | 161,25 | 169,97 |
| Média | 15,21 | 54,03 | 76,37 | 93,56 | 107,95 | 120,78 | 132,31 | 142,89 | 152,78 | 162,08 | 170,86 |
| Desvio Padrão | 1,51 | 0,27 | 0,40 | 0,48 | 0,64 | 0,63 | 0,65 | 0,77 | 0,75 | 0,82 | 0,87 |
| Fator t (99%) | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| U (99%) | 1,55 | 0,27 | 0,41 | 0,49 | 0,66 | 0,65 | 0,66 | 0,79 | 0,78 | 0,84 | 0,89 |
| Limite Superior | 16,76 | 54,31 | 76,78 | 94,06 | 108,60 | 121,43 | 132,97 | 143,68 | 153,55 | 162,92 | 171,75 |
| Limite Inferior | 13,66 | 53,76 | 75,96 | 93,07 | 107,29 | 120,13 | 131,64 | 142,10 | 152,00 | 161,24 | 169,97 |

Fonte: O Autor

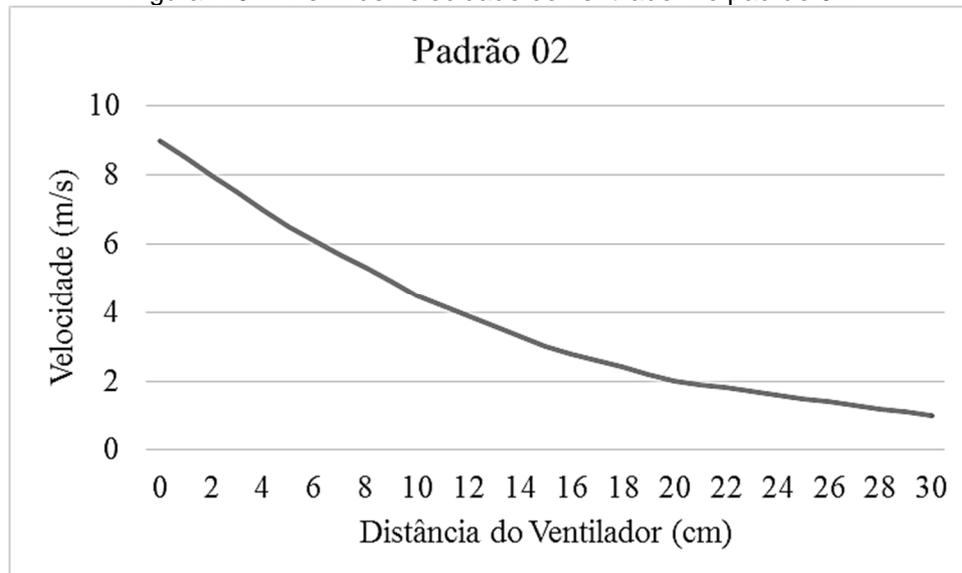
APÊNDICE 2: CARACTERÍSTICAS DO VENTILADOR.

Figura A.0.1: Perfil de velocidade do ventilador no padrão 01.



Fonte: O Autor

Figura A.0.2: Perfil de velocidade do ventilador no padrão 02.



Fonte: O Autor.