



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

MILTON CORREIA DOS SANTOS JUNIOR

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO FLUXO DE CALOR
PARA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO**

CURITIBA

2013

MILTON CORREIA DOS SANTOS JUNIOR

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO FLUXO DE CALOR
PARA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

CURITIBA

2013

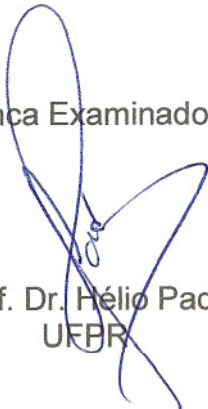
TERMO DE APROVAÇÃO

MILTON CORREIA DOS SANTOS JUNIOR

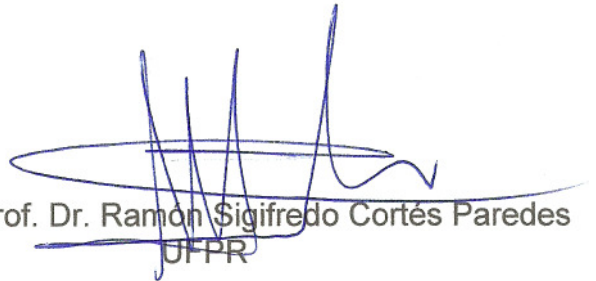
INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO FLUXO DE CALOR PARA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia de Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR



Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR



Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

**“Cantem ao Senhor um novo cântico, pois ele fez coisas maravilhosas; a sua mão direita
e o seu braço santo lhe deram a vitória!”**

Salmos 98:1

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, ABS-ANB e ao CTA DEMEC-TC/UFPR.

Aos professores Paulo Cesar Okimoto, Ramón Sigifredo Cortés Paredes, Daniel M. de Almeida pela confiança depositada.

Ao professor Américo Scotti que gentilmente me orientou neste trabalho.

À minha esposa Vera Lucia e à minha filha Isabelle que como sempre, apoiaram este projeto sem restrições.

À Dolores Nunes Galvão, pelo apoio e amizade.

Aos vários colegas desta grande empreitada no curso de especialização em soldagem.

RESUMO

O estudo da distribuição de temperatura, extensão da ZTA, ciclo térmico e taxa de resfriamento são muito importantes, principalmente, quando se deseja estudar o impacto dessas sobre a formação de determinada microestrutura. Entretanto, a seleção das equações adequadas à soldagem real não é simples, pois na maioria dos casos fica numa condição intermediária entre os modelos de chapa grossa e fina propostos por Rosenthal.

Neste trabalho, apresentou-se os conceitos clássicos descritos por Rosenthal entre outros e algoritmos escritos em MATLAB para auxiliar o estudante na compreensão da relação entre o aporte térmico e a extensão da ZTA, taxa média de resfriamento e distribuição de temperatura. Também foi apresentada a metodologia desenvolvida por Poorhaydari para o cálculo da taxa média de resfriamento na ZTA em que se usa um fator de correção baseado na extensão da ZTA.

A aplicação do software MATLAB no estudo do fluxo de calor tornou o aprendizado mais interativo e ilustrativo, pois permitiu ao estudante visualizar de forma gráfica qual o impacto das variáveis de entrada sobre o resultado final. E por outro lado, a aplicação da metodologia para o cálculo da taxa média de resfriamento com base na dimensão da ZTA mostrou-se como uma ferramenta interessante quando se deseja ter uma estimativa da taxa de resfriamento sem fazer medições práticas.

Palavras-chave: Distribuição de temperatura, ciclo térmico, taxa média de resfriamento na ZTA, MATLAB

ABSTRACT

The study of temperature distribution, extent of the HAZ, thermal cycle and cooling rate are very important, especially when studying the impact of these on the formation of specific microstructures. However, the selection of the appropriate equations to actual welding is not simple, because in most cases is a condition intermediate between models of thick and thin plate proposed by Rosenthal.

In this work, presented the classical concepts described by Rosenthal and others and algorithms written in MATLAB to assist the student in understanding the relationship between the heat input and the extent of the HAZ, the average rate of cooling and temperature distribution. Was also presented the methodology developed by Poorhaydari to calculate the average rate of cooling in the HAZ using a correction factor based on the extent of the HAZ.

Application of MATLAB in the study of heat flow made learning more interactive and illustrative because it allowed students to visualize graphically the impact of input variables on the outcome. And on the other hand, the application of the methodology for calculating the average rate of cooling based on the size of the ZTA proved to be an interesting tool when you want to have an estimate of the cooling rate without making practical measurements.

Keywords: Temperature distribution, peak temperature, average cooling rate on HAZ, MATLAB

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01. Transferência de calor no processo de soldagem	- 20
Figura 02. Diferença da geometria do cordão de soldagem em função da eficiência de soldagem	- 22
Figura 03. Seção transversal do cordão de soldagem mostrando as áreas A_{BASE} e A_{ARAME}	- 23
Figura 04. Representação do sistema de coordenadas para o sistema quase-estacionário	- 24
Figura 05. Simplificações para representar a fonte de soldagem	- 24
Figura 06. Representação da fonte de calor real e imaginária para chapa de espessura intermediária	- 27
Figura. 2.5.1. Ciclo térmico de soldagem	- 28
Figura 2.5.2. Temperatura de pico em função da distância Y e energia de soldagem	- 30
Figura 2.5.3. Regiões de uma solda	- 30
Figura 2.5.4. Forma de medição da largura da ZTA na direção de interesse	- 33
Figura 3.1.1. Algoritmo do MATLAB para cálculo do aporte térmico	- 35
Figura 3.1.2. Resultado do cálculo do aporte térmico	- 35
Figura 3.2.1. Algoritmo do MATLAB para cálculo da largura da ZTA para o modelo de chapa grossa	- 36
Figura 3.2.2. Algoritmo do MATLAB para cálculo da largura da ZTA para o modelo de chapa fina	- 37
Figura 3.2.3. Algoritmo do MATLAB para cálculo do fator de correção “F”	- 37
Figura 3.3.1. Algoritmo do MATLAB para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 C para o modelo de chapa grossa	- 38
Figura 3.3.2. Algoritmo do MATLAB para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 C para o modelo de chapa fina	- 39
Figura 3.3.3. Algoritmo do MATLAB para cálculo da taxa de resfriamento na ZTA	- 39

Figura 3.4.1. Ciclo térmico para o modelo de chapa grossa para aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de resfriamento de 10 mms^{-1}	- 40
Figura 3.4.2. Ciclo térmico para o modelo de chapa fina para aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de resfriamento de 10 mms^{-1}	- 41
Figura 3.4.3. Ciclo térmico corrigido pelo fator “F” aplicado aos resultados dos modelos de chapa grossa e fina	- 41
Figura 3.5.1. Algoritmo do MATLAB para cálculo da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa	- 42
Figura 3.5.2. Distribuição de temperatura para o plano XY na superfície da chapa para o modelo de chapa grossa e aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de resfriamento de 10 mms^{-1}	- 43
Figura 4.1.1 Algoritmo para cálculo da largura da ZTA para os modelos de chapa grossa e fina com dois níveis de aporte térmico	- 45
Figura 4.1.2 Algoritmo para cálculo do tempo entre 800 e 500 °C e taxa média de resfriamento na ZTA para os modelos de chapa grossa e fina com dois níveis de aporte térmico	- 46
Figura 4.2.1 Algoritmo para cálculo da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa com dois níveis de aporte térmico	- 48
Figura 4.2.2 Representação da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa; (a) aporte térmico de 150 Jmm^{-1} ; (b) aporte térmico de 195 Jmm^{-1}	- 48
Figura 4.3.1 Representação do ciclo térmico para um ponto fixo aplicando-se o modelo de chapa grossa com dois níveis de aporte térmico	- 49

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.4.1. Propriedades físicas	- 25
Tabela 3.1.1. Parâmetros para a simulação do cálculo do aporte térmico	- 34
Tabela 4.1.1 – Valores de aporte térmico para simulação	- 44
Tabela 4.1.2 – Influência do aporte térmico sobre a largura da ZTA para os modelos de chapa grossa e fina	- 45
Tabela 4.1.3 – Influência da variação do aporte térmico sobre Δt_{8-5} e taxa média de resfriamento na ZTA	- 47
Tabela 4.4.1 – Dados reais para cálculo da taxa média de resfriamento e Δt_{8-5}	- 50
Tabela 4.4.2 – Valores reais medidos no experimento	- 50
Tabela 4.4.3 – Valores calculados pela simulação numérica	- 50

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Difusividade térmica

ρc - Capacidade térmica volumétrica

λ - Condutividade térmica

η - Rendimento térmico

Δt_{8-5} - Tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C após aplicação do fator F

Δt_{8-5-CG} - Tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C calculado pelo modelo de chapa grossa

Δt_{8-5-CF} - Tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C calculado pelo modelo de chapa fina

A_{BASE} - Área correspondente ao metal de base na seção transversal do cordão

A_{ARAME} - Área correspondente ao arame depositado na seção transversal do cordão

d - Espessura da chapa

F - Fator de correção

H_{ARAME} - Energia necessária para fundir uma unidade de volume do arame

H_{BASE} - Energia necessária para fundir uma unidade de volume do metal de base

H_L - Aporte térmico ou energia de soldagem líquida

i - Corrente de soldagem

Q_T - Potência disponível na fonte de soldagem

Q_L - Potência transferida para a peça

r - Distância radial

T' - Taxa média de resfriamento na ZTA

T_0 – Temperatura ambiente

$T_m=T_S$ – Temperatura correspondente a linha de ligação na ZTA

$T_{\text{pico-P}}$ – Temperatura de pico calculada após aplicação do fator F

$T_{\text{p-chapa-grossa}}$ – Distribuição de temperatura calculada pelo modelo de chapa grossa

$T_{\text{p-chapa-fina}}$ – Distribuição de temperatura de pico calculada pelo modelo de chapa fina

$T_{\text{p-chapa-intermed}}$ – Distribuição de temperatura de pico calculada pelo modelo de chapa intermediária

$T_{\text{pico-CG}}$ – Temperatura de pico calculada pelo modelo de chapa grossa

$T_{\text{pico-CF}}$ – Temperatura de pico calculada pelo modelo de chapa fina

t_{SOLDA} – Tempo de soldagem

V – Tensão de soldagem

v – Velocidade de soldagem

$W_{\text{chapa-fina}}$ – Largura da ZTA calculada pelo modelo de chapa fina

$W_{\text{chapa-grossa}}$ – Largura da ZTA calculada pelo modelo de chapa grossa

W_{medido} – Largura da ZTA real medida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	- 18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 20
2.1. Rendimento térmico do arco	- 20
2.2. Aporte térmico ou energia de soldagem líquida	- 21
2.3. Eficiência de fusão	- 21
2.4. Distribuição de temperatura na soldagem	- 23
2.5. Ciclo térmico de soldagem	- 27
3. DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	- 34
3.1. Cálculo do aporte térmico	- 34
3.2. Cálculo da largura da ZTA e fator de correção “F”	- 36
3.3. Cálculo da taxa de resfriamento na ZTA	- 38
3.4. Representação do ciclo térmico	- 40
3.5. Representação da distribuição de temperatura	- 42
4. ESTUDOS DE CASOS	- 44
4.1. Influência do aporte térmico sobre a largura da ZTA e a taxa média de resfriamento na ZTA	- 44
4.2. Influência do aporte térmico sobre a distribuição de temperatura	- 47
4.3. Influência do aporte térmico sobre o ciclo térmico	- 49
4.4. Validação do cálculo da taxa média de resfriamento na ZTA através da medição da largura real da ZTA	- 50
5. CONCLUSÕES	- 52
6. REFERÊNCIAS	- 53
APÊNDICES	- 55

APÊNDICE A1 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO MODELO DE CHAPA GROSSA	- 55
APÊNDICE A.2 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO MODELO DE CHAPA FINA	- 57
APÊNDICE A.3 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO CORRIGIDO PELO FATOR F	- 59
APÊNDICE A.4 ALGORITMO PARA VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DA TAXA MÉDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA	- 61

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos processos de soldagem aplica o calor como principal fonte de energia. Entretanto, este tipo de energia poderá estar associada a uma série de problemas de qualidade nas juntas, devido às alterações metalúrgicas e mecânicas resultado das temperaturas e ciclos térmicos na região de soldagem. O conhecimento das temperaturas de pico, ciclo térmico e taxa de resfriamento são de grande valia na avaliação do processo de soldagem e minimização dos riscos relacionados a estes problemas na junta soldada. Dentre os processos que aplicam calor como forma de energia, os processos de soldagem a arco elétrico têm uma aplicação muito grande na indústria. Logo, o conhecimento da forma de cálculo dos parâmetros térmicos para os processos de soldagem a arco elétrico é uma ferramenta valiosa ao engenheiro de soldagem.

A soldagem por arco elétrico tem como característica um grande aporte térmico sobre os materiais em processamento. A temperatura atingida pelo material e a forma como ocorre seu resfriamento são muito importantes para a formação das microestruturas na zona fundida e zona termicamente afetada. Pois, de maneira geral, as propriedades mecânicas da junta soldada são função das microestruturas presentes.

Rosenthal, na década de 40, e posteriormente outros pesquisadores estudaram equações envolvendo o fluxo de calor na soldagem visando à predição do parâmetro térmico. As equações basicamente estão divididas em três modelos, chapa grossa, fina e espessura intermediária, sendo que esta última apresenta uma dificuldade maior para sua manipulação. Outra dificuldade está na identificação do modelo a ser aplicado ao caso em estudo, pois a maioria das aplicações está mais próxima ao modelo de chapa de espessura intermediária. Entretanto, estas equações podem ser usadas para se determinar com boa aproximação as grandezas de interesse. A aplicação de recursos computacionais, de fácil acesso e manipulação, tornam o uso dessas equações mais acessíveis aos usuários. Até mesmo como ferramenta para auxiliar estudantes a compreender e aplicar os conceitos relacionados a estes fenômenos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma rotina computacional para determinação de parâmetros térmicos (pico de temperatura, taxa de resfriamento na ZTA e distribuição de temperatura) frente às variações de parâmetros de entrada (parâmetros de soldagem, espessura da chapa entre outros) e apresentar uma alternativa para estimar a taxa média de resfriamento na ZTA aplicando metodologia baseada na largura da ZTA para determinação de um fator de correção que será aplicado sobre as equações desenvolvidas por Rosenthal para os modelos de chapa grossa e fina.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RENDIMENTO TÉRMICO DO ARCO

Conforme Kou (2002), Tanuguchi (2004), Modenesi (2011), nem toda a energia disponível na fonte é transferida para a peça, pois há perdas por irradiação e convecção no arco elétrico. O estudo do rendimento térmico do arco (η) aborda a relação entre a potência disponível (Q_T) e a transferida para a peça (Q_L) e depende entre outros fatores, do tipo de gás, do processo de soldagem e da transferência metálica. É calculado como a razão entre a potência disponível na fonte e a efetivamente transferida para a peça. As equações abaixo determinam Q_T , Q_L e η . De acordo com Modenesi (2011) o rendimento térmico para o processo MAG está numa faixa entre 0,75 e 0,95. Para Grong (1994), este valor flutua entre 0,66 e 0,93. Finalmente para Wainer (2004), a faixa seria entre 0,66 e 0,85. A Figura 01 ilustra a transferência de calor durante o processo de soldagem, onde V é a tensão do arco (volts), I é a corrente (ampéres) e as potências em (watts).

$$Q_T = V \times I \quad (1)$$

$$\eta = \frac{Q_L}{Q_T} \quad (2)$$

$$Q_L = \eta \times Q_T \quad (3)$$

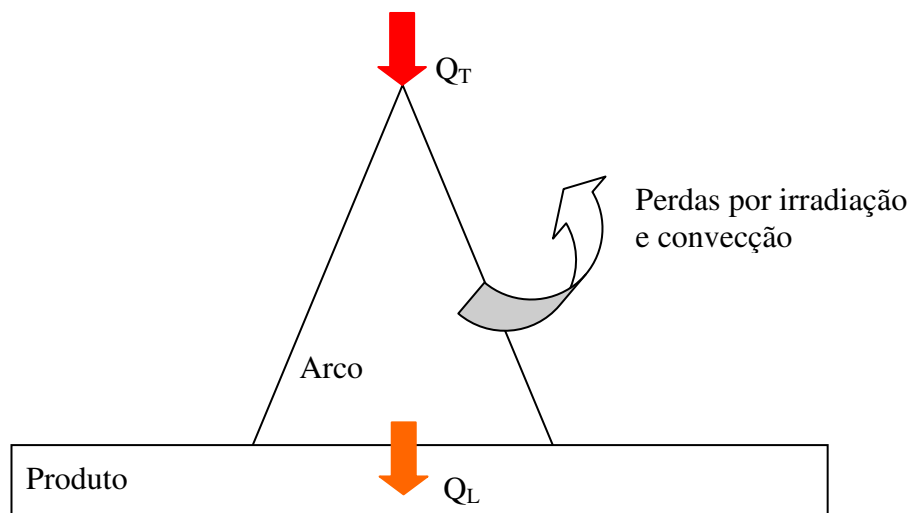


Figura 01. Transferência de calor no processo de soldagem

2.2 APORTE TÉRMICO OU ENERGIA DE SOLDAGEM LÍQUIDA

Entretanto, somente a aplicação do conceito potência de soldagem e rendimento térmico do arco sem levar em consideração a velocidade com que a fonte de energia se desloca sobre a peça não tem aplicações técnicas, pois se faz necessário conhecer a quantidade de energia que foi efetivamente transmitida por unidade de comprimento de soldagem. A relação entre a potência transmitida e a velocidade de soldagem é conhecida como aporte térmico ou energia líquida de soldagem (H_L) e calculada pela equação abaixo.

$$H_L = \eta \times \frac{V \times I}{v} \quad (4)$$

$$\left[\frac{J}{mm} \right] = \frac{W}{\frac{mm}{s}} = \frac{\frac{J}{s}}{\frac{mm}{s}} = \frac{J}{mm}$$

Onde V é a tensão do arco (volts), I é a corrente (ampéres), v é a velocidade de soldagem (cm/s ou mm/s) e η é o rendimento térmico. A escolha adequada da unidade da velocidade de soldagem ajudará nos cálculos posteriores de distribuição de temperatura, temperatura de pico e taxa de resfriamento.

2.3 EFICIÊNCIA DE FUSÃO

A análise do perfil do cordão levando em consideração somente o aporte térmico transmitido à peça está incompleta, pois se para um mesmo processo de soldagem forem aplicados parâmetros de soldagem distintos que levem ao mesmo valor de aporte térmico, ainda assim, pode-se ter geometrias bastante distintas. A Figura 02 apresenta a geometria do cordão para um aporte térmico praticamente igual

de 385 Jmm^{-1} , sendo que a figura à esquerda teve menores valores de potência e velocidade de soldagem que a da direita.

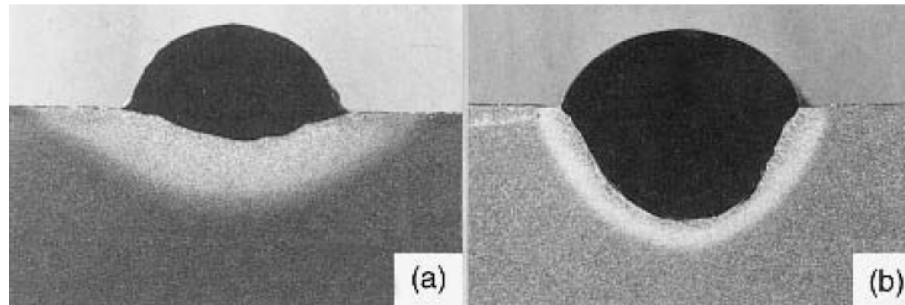


Figura 02. Diferença na geometria do cordão em função da eficiência de soldagem (ambas as figuras apresentam aporte térmico aproximado de 385 Jmm^{-1}) (a) resultado de potência de soldagem de $3,83 \text{ kW}$ e velocidade de soldagem de 10 mms^{-1} ; e (b) com $10,2 \text{ kW}$ e 26 mms^{-1} .

Fonte: Kou, 2002

Desta forma, é necessário levar em consideração outra grandeza, a eficiência de fusão ou rendimento teórico η_M que pode ser descrita como a habilidade da fonte de calor em fundir o metal de base e o metal de adição. Conforme Modenesi (2011), é a razão entre a energia necessária para aquecer o material do cordão até sua temperatura de fusão e fundi-lo e a energia efetivamente gasta no processo. Para os processos a arco elétrico, a eficiência de fusão varia entre 5% e 50%, sendo que os maiores valores são obtidos quando a potência e a velocidade de soldagem são elevadas simultaneamente. De acordo com Kou (2002), ela pode ser calculada pela equação a seguir.

$$\eta_M = \frac{(A_{BASE} \times v \times t_{SOLDA}) \times H_{BASE} + (A_{ARAME} \times v \times t_{SOLDA}) \times H_{ARAME}}{\eta \times V \times i \times t_{SOLDA}} \quad (5)$$

Onde v é a velocidade de soldagem, H_{BASE} e H_{ARAME} são as energias necessárias para levar uma unidade de volume do metal de base e material de adição, respectivamente, até o ponto de fusão e fundi-los. A quantidade dentro dos parênteses representa o volume de material fundido, enquanto que, o denominador representa a quantidade de calor transferido pela fonte de soldagem para a peça. t_{SOLDA} é o tempo de soldagem, A_{BASE} e A_{ARAME} estão representados na Figura 03.

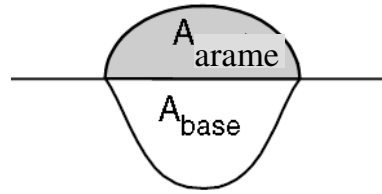


Figura 03. Seção transversal do cordão de soldagem mostrando as áreas A_{BASE} e A_{ARAME}
 Fonte: Kou, 2011

2.4 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM

O fluxo de calor na soldagem pode ser dividido de maneira básica em duas fases: o fornecimento de calor e resfriamento da junta. Durante a soldagem, as transformações são forçadas a ocorrer em poucos segundos num pequeno volume de metal, onde as condições térmicas são muito diferentes daquelas encontradas na produção, refino e fabricação de metais e ligas. A soldagem de metais é caracterizada pelo pico de temperatura bastante elevada e altos gradientes de temperatura, da ordem de 100 °C/mm. Do ponto de vista prático, a abordagem analítica para a solução dos fluxos de calor é preferível, pois ela permite a derivação de equações que fornecem dados para a compreensão do par temperatura x tempo. Entretanto, devido à complexidade dos fenômenos de transferência de calor, os modelos analíticos recebem um número significativo de simplificações. Ainda assim, são capazes de prover no mínimo uma descrição qualitativa da distribuição de temperatura.

As perdas de calor por radiação e convecção são usualmente negligenciadas na soldagem e, desta forma, a distribuição de temperatura pode ser obtida a partir de equações diferenciais na condução de sólidos e nas condições de fluxos bi-axiais e tri-axiais podem ser expressas por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{bidimensional} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \text{ tridimensional} \quad (7)$$

$$\text{Onde } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Soluções para as equações de condução de calor foram propostas por Rosenthal na década de 40, tendo como premissa as simplificações descritas a seguir:

a) Processo quasi-estacionário: Supõe-se que a distribuição de temperatura se mantém constante para um sistema de coordenadas que se move junto com a fonte de calor. Em situações reais, esta suposição pode ser aplicada em soldas relativamente curtas. Particularmente, esta suposição é bastante adequada para soldagens feitas com velocidade constante, sem movimento de tecimento, em peças grandes e de baixa difusividade térmica.

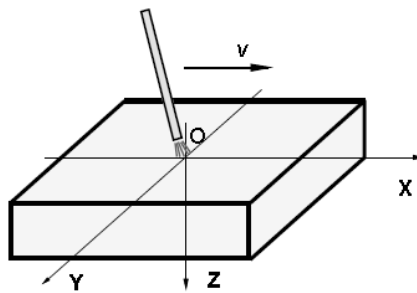


Figura 04. Representação do sistema de coordenadas para processo quase-estacionário
Fonte: Modenesi, 2011

b) A fonte tem forma simplificada, terá a forma pontual para uma chapa grossa e linear para uma chapa de espessura fina, o formato da peça é simplificado para uma chapa de comprimento, largura e em alguns casos, espessura infinitos.²⁰

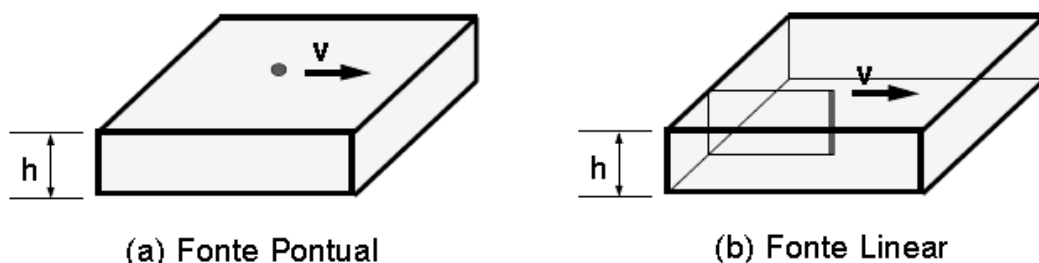


Figura 05. Simplificações para representar a fonte de soldagem
Fonte: Modenesi, 2011

c) A variação de propriedades físicas com a variação da temperatura é desprezada, para a maioria dos metais, esta condição não é real, pois α (difusividade

térmica), λ (condutividade térmica) e ρ, c (capacidade térmica volumétrica) devem variar significativamente com a temperatura. Mesmo com estas simplificações, a escolha adequada de valores médios para as propriedades α, λ, ρ, c nos fornece soluções com boa aproximação. A tabela 2.4.1 apresenta valores médios desconsiderando o calor latente de fusão do metal, capacidade térmica volumétrica e variação de Entalpia.

Tabela 2.4.1 – Propriedades físicas (adaptada de GRONG pag. 3)

Material	λ (W mm ⁻¹ °C ⁻¹)	α (mm ² s ⁻¹)	ρc (J mm ⁻³ °C ⁻¹)	T _m (°C)
Aço carbono	0,040	8	0,005	1520
Aço baixa liga	0,025	5	0,005	1520

α - difusividade térmica, λ - condutividade térmica e ρ, c - capacidade térmica volumétrica

Rosenthal propôs duas soluções distintas considerando as espessuras das chapas em estudo, sendo uma solução para Chapa Grossa e outra para Chapa Fina. Em ambos os casos, o cálculo da temperatura leva em consideração a potência transferida para a peça, velocidade de soldagem e distância do ponto à fonte de calor.

A solução clássica desenvolvida por Rosenthal para determinação da distribuição de temperatura para os modelos de chapa grossa e chapa fina são:

$$T_{p-chapa-grossa} = T_0 + \frac{H}{2\pi\lambda R} \times \exp\left(\frac{-v}{2a} \times (R + x)\right) \quad (8)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (9)$$

$$H = \eta \times V \times I \quad (10)$$

$$T_{p-chapa-fina} = T_0 + \frac{H}{2\pi\lambda d} \times \exp\left(\frac{-vx}{2a}\right) \times K_0\left(\frac{vR}{2a}\right) \quad (11)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (12)$$

Onde K_0 é função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero e H é calculado pela equação 10. Note que nestas equações não está sendo usado o aporte térmico, pois a variável velocidade de soldagem entra em outras parcelas das equações.

Para os casos em que a velocidade de soldagem e potência transferida forem elevadas, a determinação de distribuição de temperaturas T_p pode ser determinada por equações mais simples conforme citado por Poorhaydari (2005), Grong (1994) e Modenesi (2011). Para o caso da chapa grossa assume-se que a condução de calor ocorrerá somente nas direções perpendiculares ao eixo de movimento da fonte de calor e para o modelo de chapa fina, a suposição é o de que a transmissão de calor se dará de forma unidimensional. As equações abaixo determinam a distribuição de temperatura para este caso.

$$T_{p\text{-chapa-grossa}} = T_0 + \frac{H}{2\pi\lambda vt} \times \exp\left(\frac{-r^2}{4at}\right) \quad (13)$$

$$r = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (14)$$

$$T_{p\text{-chapa-fina}} = T_0 + \frac{H}{(4\pi\lambda\rho ct)^{\frac{1}{2}} \times d} \times \exp\left(\frac{-y^2}{4at}\right), \text{ H é calculado pela eq. 10} \quad (15)$$

Entretanto para condições reais de soldagem, nem sempre se consegue classificar o fluxo de calor como bidimensional ou tridimensional, neste caso, aplica-se o conceito de chapa de espessura intermediária. Este modelo considera duas fontes de calor dispostas acima e abaixo da superfície, se movendo através do eixo em que está a espessura “d” da chapa, conforme ilustrado na Figura 06.

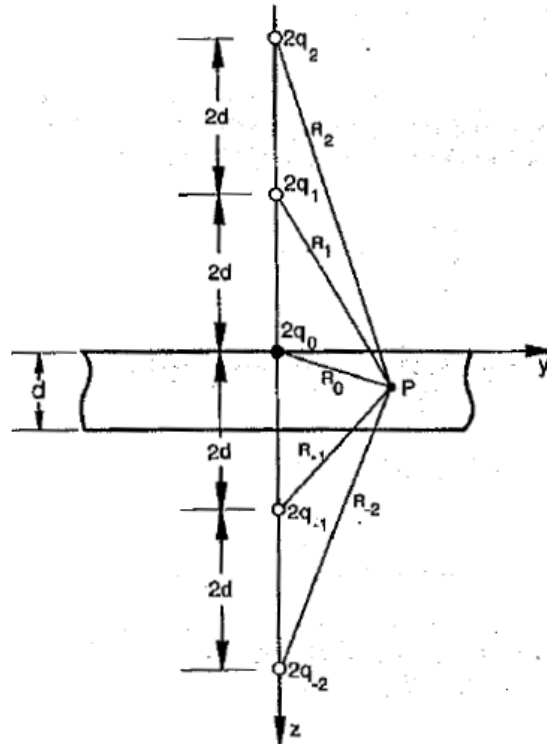


Figura 06. Representação de fonte de calor real e imaginária para chapa de espessura intermediária
Fonte: Grong, 1994

A distribuição de temperatura para este modelo pode ser calculada pela equação 16, que como pode ser observado tem difícil manipulação.

$$T_{p\text{-chapa-int ermed}} = T_0 + \frac{H}{2\pi\lambda} \times \exp\left(\frac{-vx}{2a}\right) \times \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} \frac{1}{R_i} \times \exp\left(-\frac{v}{2a} \times R_i\right) \quad (16)$$

$$R_i = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2di)^2} \quad (17)$$

2.5 CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM

Durante o processo de soldagem, o material experimenta uma variação de temperatura que depende entre fatores das condições de soldagem, propriedades térmicas e distância do ponto à fonte de calor. A esta variação de temperatura denomina-se ciclo térmico de soldagem. A figura 2.5.1 ilustra este fenômeno para um ponto P genérico.

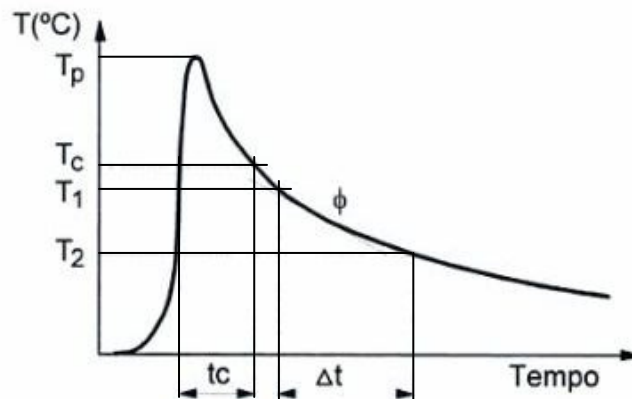


Figura 2.5.1 Ciclo térmico de soldagem
 Fonte: Marques, Paulo Villani 2009

O ciclo térmico pode ser descrito em termos de suas principais características:

Temperatura de pico (T_p): é a temperatura máxima atingida pelo ponto e indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais. É função das condições de soldagem, geometria e propriedades térmicas do material, temperatura inicial e distância do ponto analisado em relação à fonte de calor. O cálculo da temperatura de pico num determinado ponto, conforme Poorhaydari (2005), para os modelos de chapa grossa e fina é feito conforme as equações 18 e 19.

$$T_{pico-CG} = T_0 + \left(\frac{2}{\pi e}\right) \times \left(\frac{H_L}{\rho c r^2}\right) \quad (18)$$

$$T_{pico-CF} = T_0 + \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{H_L}{d\rho c 2r}\right) \quad (19)$$

Entretanto, os termos Chapa Grossa e Chapa Fina não podem ser analisados como fator determinante para a seleção da equação, pois a resposta da temperatura para uma determinada condição de soldagem pode não se adaptar aos modelos propostos por Rosenthal, visto que sofre uma grande influência de parâmetros como a eficiência de fusão e velocidade de soldagem. Para adequar as equações às condições reais de soldagem, Poorhaydari (2005), propôs um fator de correção “F” baseado na relação entre as extensões da ZTA real e fornecida através dos cálculos de equações

derivadas daquelas propostas por Rosenthal. Depois de calculado este fator, ele é aplicado às soluções fornecidas para chapa fina e para chapa grossa e fornece uma resposta intermediária entre os dois limites, que é mais adequada e próxima ao real medido através de termopares na região de solda. Abaixo seguem as equações aplicadas ao cálculo deste fator de correção.

$$F = \frac{(W_{medido} - W_{chapa-grossa})}{(W_{chapa-fina} - W_{chapa-grossa})} \quad (20)$$

$$W_{chapa-grossa} = C_1 \times (H_L)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$\text{Onde: } C_1 = \left[\frac{2}{\pi e \rho c} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{1}{(A_1 - T_0)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(T_s - T_0)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (22)$$

$$W_{chapa-fina} = C_2 \times H_L \quad (23)$$

$$\text{Onde: } C_2 = \left[\frac{2}{\pi e} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{(T_s - A_1)}{2d\rho c \times (T_s - T_0) \times (A_1 - T_0)} \right] \quad (24)$$

$$A_1 = 996 - 30Ni - 25Mn - 5Co + 25Si + 30Al + 25Mo + 50V \text{ [graus Kelvin]} \quad (25)$$

$$T_s = 1810 - 90C \text{ [graus Kelvin]} \quad (26)$$

Nas equações 25 e 26 a temperatura será função da composição química do material em estudo. Assim, a temperatura no ponto em estudo será dada finalmente por:

$$T_{pico-P} = T_{pico-CG} + F \times (T_{pico-CF} - T_{pico-CG}) \quad (27)$$

A figura 2.5.2 ilustra a variação da temperatura de pico em função da distância à fonte de soldagem e energia de soldagem.

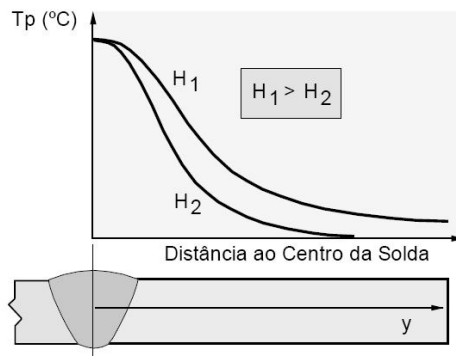


Figura 2.5.2 Temperatura de pico em função da distância Y e energia de soldagem
Fonte: Modenesi, 2011

Temperatura crítica (T_c): é a temperatura mínima necessária para que ocorra alteração microestrutural ou significativa mudança de propriedade.

Tempo de permanência (t_c): é tempo que o ponto ficou exposto acima da temperatura crítica.

Com base na temperatura de pico atingida no material pode-se classificar suas regiões de soldagem conforme ilustração da figura 2.5.3.

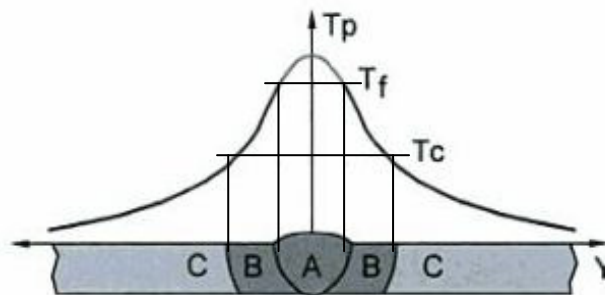


Figura 2.5.3 Regiões de uma solda
Fonte: Marques, Paulo Villani, 2009

A – Zona Fundida (ZF): região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante o ciclo de soldagem. (As temperaturas foram superiores à temperatura de fusão T_f do metal de base);

B – Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do metal de base que teve sua microestrutura e/ou propriedades mecânicas alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. (As temperaturas de pico nesta região foram superiores a temperatura crítica e inferiores à temperatura de fusão);

C – Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda que teve sua temperatura de pico inferior à temperatura crítica e por isso não foi afetada pelo ciclo de soldagem.

A velocidade de resfriamento (φ) é obtida pela derivada em uma determinada temperatura T da curva de ciclo térmico durante o resfriamento. Tem grande influência sobre a microestrutura final em aços que podem sofrer transformações metalúrgicas durante o resfriamento.

Alternativamente, é comum caracterizar o resfriamento de uma solda pelo tempo necessário ($\Delta t_{T1/T2}$) para a solda se resfriar de uma temperatura T1 até uma temperatura T2. Para a soldagem de aços, as temperaturas geralmente consideradas são 800 e 500 °C ($\Delta t_{8/5}$). Wainer (2004), Marques (2009).

A taxa de resfriamento na ZTA não depende da posição da fonte de calor segundo Kasuya (1993), este fato também foi confirmado por Zhang (2002) que determinou que a taxa de resfriamento na ZTA depende somente do aporte térmico, espessura e geometria da chapa e temperatura inicial.

Desta forma, a taxa média de resfriamento entre 800 °C e 500 °C conforme apresentada por Poorhaydari, será:

$$T' = \frac{300}{\Delta t_{8/5}} \quad (28)$$

A variável Δt_{8-5} será calculada conforme o modelo aplicado ao estudo de acordo com as seguintes equações, para chapa grossa (CG), será:

$$\Delta t_{8-5-CG} = \frac{H_L}{2\pi\lambda\theta_1} \quad (29)$$

$$\text{Onde } \frac{1}{\theta_1} = \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (30)$$

Para chapa fina (CF) será:

$$\Delta t_{8-5-CF} = \frac{(H_L)^2}{4\pi\lambda\rho cd^2\theta_2} \quad (31)$$

$$\text{Onde } \frac{1}{\theta_2} = \left(\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right) \quad (32)$$

Grong (1994), propõe que o cálculo do tempo de resfriamento seja feito por equações mais simples. Nesta aplicação considera-se T_0 de 20 °C e propriedades térmicas para aço baixa liga. Assim o cálculo de Δt_{8-5} para chapa grossa e para chapa fina serão respectivamente:

$$\Delta t_{8-5-CG-Grong} = 5.1 \times \eta \times \frac{V \times I}{1000 \times v} \quad (33)$$

$$\Delta t_{8-5-CF-Grong} = 1716 \times \left(\eta \times \frac{V \times I}{1000 \times v \times d} \right)^2 \quad (34)$$

Finalmente a variável Δt_{8-5} será calculada pela equação 35.

$$\Delta t_{8-5} = \Delta t_{8-5-CG} + F \times (\Delta t_{8-5-CF} - \Delta t_{8-5-CG}) \quad (35)$$

Quando estas taxas de resfriamento forem superiores as taxas críticas para a formação de determinada microestrutura, esta ocorrerá. A seqüência de cálculos para determinação da taxa de resfriamento deve seguir os seguintes passos:

- a) Cálculo teórico das larguras $W_{\text{chapa-grossa}}$ (eq. 21, 22) e $W_{\text{chapa-fina}}$ (eq. 23, 24), estas dimensões serão comparadas à largura real encontrada no item “b”.
- b) Medição da extensão da largura da ZTA para cada amostra, conforme ilustrado na figura 2.5.4

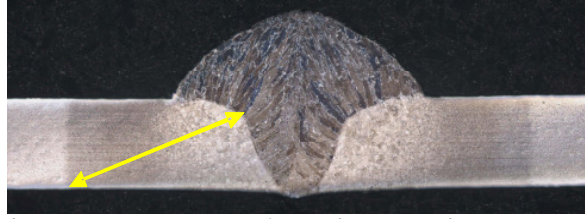


Figura 2.5.4 Forma de medição da largura da ZTA na direção de interesse
Fonte: Santos Junior, 2012

- c) Cálculo do fator F (eq. 20)
- d) Cálculo do tempo Δt_{8-5} para chapa grossa (Δt_{8-5-CG}) (eq. 29, 30) e para chapa fina (Δt_{8-5-CF}) (eq. 31, 32);
- e) Cálculo do Δt_{8-5} final (eq. 35);
- f) Cálculo da taxa média de resfriamento T' na ZTA (eq. 28).

3 DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO NÚMÉRICA

Na maioria dos casos, nos estudos de transformações metalúrgicas nos processos de soldagem, a zona termicamente afetada (ZTA) é a região de interesse, pois ela terá grande peso na resposta final do material ao ciclo térmico e taxa de resfriamento. Nesta região não há como minimizar ou maximizar a formação de determinada microestrutura através da adição de componentes químicos como é feito no caso da zona fundida. Desta forma, este capítulo terá seu foco orientado para a aplicação das equações nesta região. Buscar-se-á, também, deixar um roteiro de como as equações foram introduzidas no MATLAB para que estudantes possam reproduzir estas simulações.

3.1 CÁLCULO DO APORTE TÉRMICO

O cálculo do aporte térmico será feito através da equação 4 (na tabela 3.1.1 encontram-se os parâmetros que serão aplicados).

Tabela 3.1.1 – Parâmetros para simulação de cálculo do aporte térmico

Rendimento térmico	Corrente [A]	Tensão [V]	Velocidade de soldagem [mms^{-1}]
0,8	108,2	17,1	10

O algoritmo no MATLAB pode ser feito de forma interativa, de maneira a solicitar novos valores de parâmetros, para outras simulações. Na Figura 3.1.1 é apresentada a tela de programação com o algoritmo e na Figura 3.1.2 é apresentado o resultado com o valor do aporte térmico H_L em [Jmm^{-1}].

```

C:\matlabR12\work\Aporte.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 % ESTE PROGRAMA CALCULO O APORTE TERMICO [J/mm]
2 % SOLICITARA A ENTRADA DOS PARAMETROS DE SOLDAGEM E RENDIMENTO TERMICO
3 % ENTRAR COM O RENDIMENTO COM "PONTO" EXEMPLO; 0.8 E VELOCIDADE DE SOLDAGEM EM [mm/s]
4
5
6 clear all
7 V=input('Entre com a tensao em volts:');|
8 i=input('Entre com a corrente em amperes:');
9 eta=input('Entre com rendimento:');
10 vs=input('Entre com velocidade de soldagem:');
    HL=(eta*V*i)/vs
  
```

Figura 3.1.1 Algoritmo do MATLAB para cálculo do aporte térmico

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\matlabR12\work
Launch Pad
  MATLAB
  Communications Toolbox
  Control System Toolbox
  Data Acquisition Toolbox
  Database Toolbox
  Datafeed Toolbox
  Filter Design Toolbox
  Financial Derivatives Toolbox
  Financial Time Series Toolbox
Command Window
>> aporte
Entre com a tensao em volts:17.1
Entre com a corrente em amperes:108.2
Entre com rendimento:0.8
Entre com velocidade de soldagem:10

HL =

    148.0176

>> |
  
```

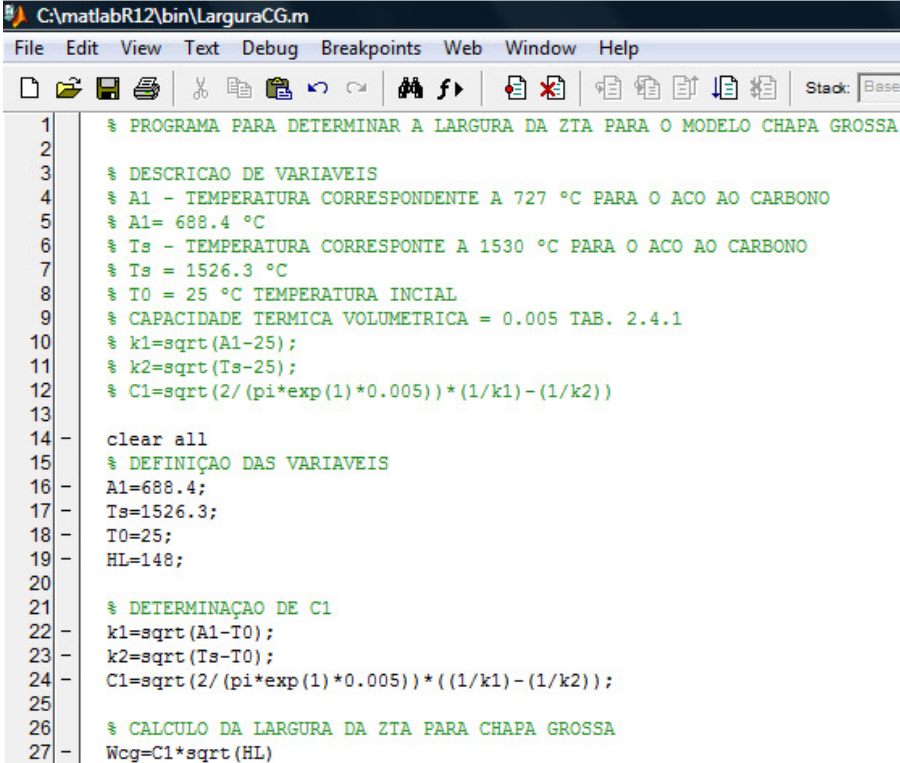
Figura 3.1.2 Resultado do cálculo do aporte térmico

A metodologia de se selecionar os parâmetros de entrada de forma interativa pode ser aplicada a qualquer variável. Desta forma, após esta apresentação, a resolução das demais equações não seguirá este modelo (as variáveis serão definidas logo acima do cálculo das equações).

3.2 CÁLCULO DA LARGURA DA ZTA E FATOR DE CORREÇÃO “F”

A determinação do fator de correção “F” que posteriormente será usado para calcular a taxa de resfriamento e temperatura de pico está baseada na relação entre a dimensão real da ZTA na direção de interesse e os valores teóricos apresentados pelas equações 21 a 24. As variáveis A_1 e T_s serão adotadas como 688,4 °C e 1526,3 °C, respectivamente. Entretanto para o estudo de um determinado material, estas temperaturas podem ser calculadas pelas equações 25 e 26.

O cálculo da dimensão da ZTA para o modelo de chapa grossa é feito pelas equações 21 e 22. A Figura 3.2.1 apresenta o algoritmo resultando em 1,0837 milímetros.



```

C:\matlabR12\bin\LarguraCG.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base
1  § PROGRAMA PARA DETERMINAR A LARGURA DA ZTA PARA O MODELO CHAPA GROSSA
2
3  § DESCRICAO DE VARIAVEIS
4  § A1 - TEMPERATURA CORRESPONDENTE A 727 °C PARA O ACO AO CARBONO
5  § A1= 688.4 °C
6  § Ts - TEMPERATURA CORRESPONTE A 1530 °C PARA O ACO AO CARBONO
7  § Ts = 1526.3 °C
8  § T0 = 25 °C TEMPERATURA INCIAL
9  § CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA = 0.005 TAB. 2.4.1
10 § k1=sqrt(A1-25);
11 § k2=sqrt(Ts-25);
12 § C1=sqrt(2/(pi*exp(1)*0.005))*(1/k1)-(1/k2))
13
14 - clear all
15 § DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
16 - A1=688.4;
17 - Ts=1526.3;
18 - T0=25;
19 - HL=148;
20
21 § DETERMINAÇÃO DE C1
22 - k1=sqrt(A1-T0);
23 - k2=sqrt(Ts-T0);
24 - C1=sqrt(2/(pi*exp(1)*0.005))*((1/k1)-(1/k2));
25
26 § CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA GROSSA
27 - Wcg=C1*sqrt(HL)

```

Figura 3.2.1 Algoritmo do MATLAB para cálculo da largura da ZTA para o modelo de chapa grossa

O cálculo da largura da ZTA para chapa fina é feito pelas equações 23 e 24, na Figura 3.2.2 apresenta o algoritmo resultando em 3,7660 milímetros.

```

1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR A LARGURA DA ZTA PARA O MODELO CHAPA FINA
2
3  % DESCRICAO DE VARIAVEIS
4  % A1 - TEMPERATURA CORRESPONDENTE A 727 °C PARA O ACO AO CARBONO
5  % A1= 688.4 °C
6  % Ts - TEMPERATURA CORRESPONTE A 1530 °C PARA O ACO AO CARBONO
7  % Ts = 1526.3 °C
8  % T0 = 25 °C TEMPERATURA INICIAL
9  % CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA = 0.005 TAB. 2.4.1
10 % D = ESPESSURA DA CHAPA (NESTE CASO 1.6 mm)
11 % k3=(2*D*0.005)*(Ts-T0)*(A1-T0);
12 % C2=sqrt(2/(pi*exp(1)))*((Ts-A1c)/k3);
13
14 - clear all
15 % DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
16 - A1=688.4;
17 - Ts=1526.3;
18 - T0=25;
19 - HL=148;
20 - D=1.6;
21
22 % DETERMINAÇÃO DE C2
23 - k3=(2*D*0.005)*(Ts-T0)*(A1-T0);
24 - C2=sqrt(2/(pi*exp(1)))*((Ts-A1)/k3);
25
26 % CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA FINA
27 - Wcf=C2*HL

```

Figura 3.2.2 Algoritmo do MATLAB para cálculo da largura da ZTA para o modelo de chapa fina

Finalmente o fator “F” será calculado pela equação 20, para este cálculo foi assumido a dimensão da largura da ZTA real como 3,2 milímetros, valor apresentado no estudo feito por Santos Junior (2012), a Figura 3.2.3 apresenta o algoritmo, resultando em 0,7890 adimensional.

```

1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR O FATOR DE CORRECAO F BASEADO NA LARGURA DA ZTA REAL
2  % E TEORICAS
3
4  % DESCRICAO DE VARIAVEIS
5  % Wr= LARGURA REAL DA LARGURA DA ZTA NA DIRECAO DE INTERESSE
6  % Wcg = LARGURA TEORICA PARA O MODELO CHAPA GROSSA
7  % Wcf = LARGURA TEORICA PARA O MODELO CHAPA FINA
8  % F=(Wr-Wcg)/(Wcf-Wcg)
9
10 - clear all
11 % DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
12
13 - Wcg=1.0837;
14 - Wcf=3.7660;
15 - Wr=3.2;
16
17 %CALCULO DO FATOR F
18 - F=(Wr-Wcg)/(Wcf-Wcg)

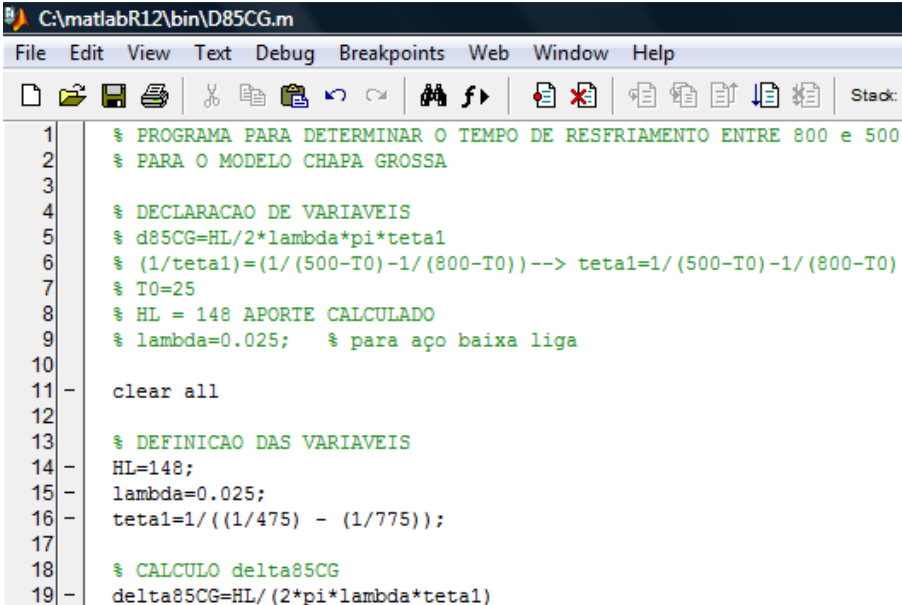
```

Figura 3.2.3 Algoritmo do MATLAB para cálculo do fator de correção F

3.3 CÁLCULO DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA ZTA

O cálculo da taxa de resfriamento na ZTA conforme a equação 28 depende do tempo de resfriamento Δt_{8-5} que será calculado pela equação 35. Entretanto, para isso se faz necessário primeiro calcular o tempo Δt_{8-5} , conforme o modelo clássico de Rosenthal para os modelos de chapa grossa e fina.

A determinação do tempo de resfriamento para chapa grossa é feito pelas equações 29 e 30. A Figura 3.3.1 apresenta o algoritmo, resultando em 0,7678 segundos.



```

C:\matlabR12\bin\D85CG.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack:
1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR O TEMPO DE RESFRIAMENTO ENTRE 800 e 500
2  % PARA O MODELO CHAPA GROSSA
3
4  % DECLARACAO DE VARIAVEIS
5  % d85CG=HL/2*lambda*pi*tetal
6  % (1/tetal)=(1/(500-T0))-1/(800-T0)--> tetal=1/(500-T0)-1/(800-T0)
7  % T0=25
8  % HL = 148 APORTE CALCULADO
9  % lambda=0.025; % para aço baixa liga
10
11 - clear all
12
13 % DEFINICAO DAS VARIAVEIS
14 - HL=148;
15 - lambda=0.025;
16 - tetal=1/((1/475) - (1/775));
17
18 % CALCULO delta85CG
19 - delta85CG=HL/(2*pi*lambda*tetal)

```

Figura 3.3.1 Algoritmo do MATLAB para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C para o modelo de chapa grossa

A determinação do tempo de resfriamento para chapa fina é feito pelas equações 31 e 32. A Figura 3.3.2 apresenta o algoritmo, resultando em 15,0732 segundos.

```

C:\matlabR12\bin\D85CF.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR O TEMPO DE RESFRIAMENTO ENTRE 800 e 500
2  % PARA O MODELO CHAPA FINA
3
4  % DECLARACAO DE VARIAVEIS
5  % d85CF=HL^2/(4*pi*lambda*capacidade termica volumetrica*d^2*teta2)
6  % CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA - 0.005
7  % (1/teta2)=(1/(500-T0)^2-1/(800-T0)^2)
8  % T0=25
9  % HL = 148 APORTE CALCULADO
10 % lambda=0.025; % para aço baixa liga
11
12 - clear all
13
14 % DEFINICAO DAS VARIAVEIS
15 - HL=148;
16 - lambda=0.025;
17 - D=1.6;
18 - T0=25;
19 - teta2=1/(1/(500-T0)^2 - 1/(800-T0)^2);
20
21 % CALCULO d8CCF PARA OS QUATRO HLs
22 - delta85CF=(HL^2)/(4*pi*lambda*0.005*D^2*teta2)

```

Figura 3.3.2 Algoritmo do MATLAB para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C para o modelo de chapa fina

Finalmente a taxa de resfriamento na ZTA será calculada pelas equações 35 e 28. A Figura 3.3.3 apresenta o algoritmo para o cálculo do Δt_{8-5} corrigido pelo fator F e o cálculo da taxa média de resfriamento resultando em $25\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$.

```

C:\matlabR12\bin\TAXARESFTZA.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR O TAXA DE RESFRIAMENTO NA ZTA
2  % CORREÇÃO COM FATOR F
3
4  % DECLARACAO DE VARIAVEIS
5  % delta85CG = CALCULADO
6  % delta85CF = CALCULADO
7  % F= CALCULADO
8  % D85=delta85CG+F*(delta85CF-delta85CG)
9  % TRESF=300/D85
10
11 - clear all
12
13 % DEFINICAO DAS VARIAVEIS
14 - F=0.7890;
15 - delta85CG=0.7678;
16 - delta85CF=15.0732;
17
18 % CALCULO DO TEMPO ENTRE 800 e 500 CORRIGIDO POR F
19 - D85=delta85CG+F*(delta85CF-delta85CG);
20
21 % CALCULO DA TAXA MEDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA
22 - TRESF=300/D85

```

Figura 3.3.3 Algoritmo do MATLAB para cálculo da taxa de resfriamento na ZTA

3.4 REPRESENTAÇÃO DO CICLO TÉRMICO

Das Figuras 3.4.1 a 3.4.3 são apresentados ciclos térmico para os pontos localizados em X e Y iguais a zero e Z variando entre zero e um milímetro e seis décimos de milímetro. A primeira apresenta o ciclo para o modelo de chapa grossa, a segunda para o modelo de chapa fina e a terceira apresenta o ciclo corrigido pelo fator “F”. Para se obter o ciclo em qualquer outro ponto, basta alterar os valores das variáveis Y e Z, a variável X é calculada pela estrutura de repetição do MATLAB denominada *For_End*. Os algoritmos aplicados encontram-se nos apêndices A.1 a A.3.

Assim para o caso real com dimensão da ZTA de 3,2 milímetros, o ciclo térmico real está representado na figura 3.4.3.

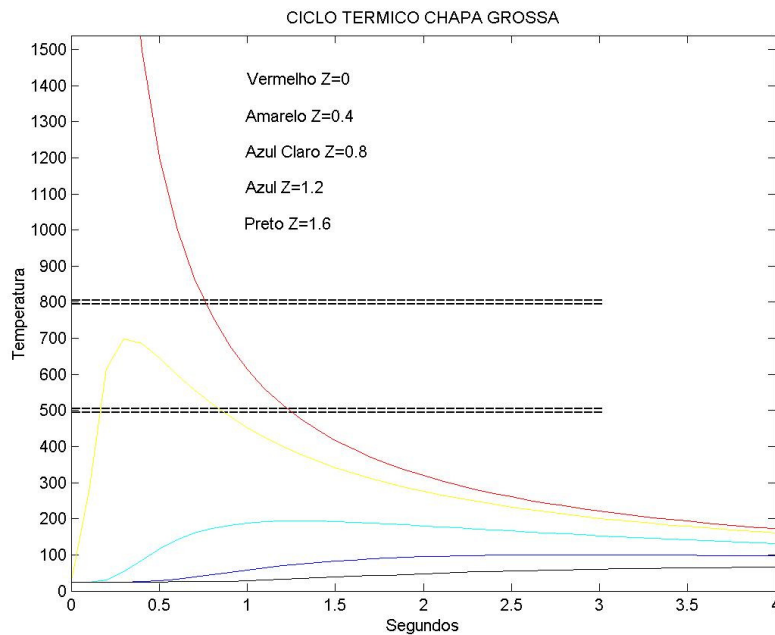


Figura 3.4.1 Ciclo térmico para o modelo de chapa grossa para aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de soldagem de 10 mm s^{-1}

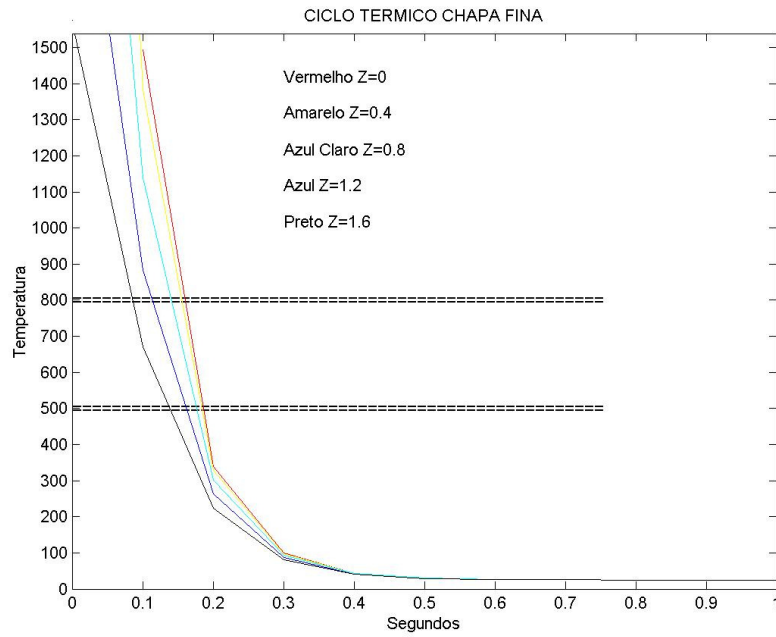


Figura 3.4.2 Ciclo térmico para o modelo de chapa fina para aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de soldagem de 10 mms^{-1}

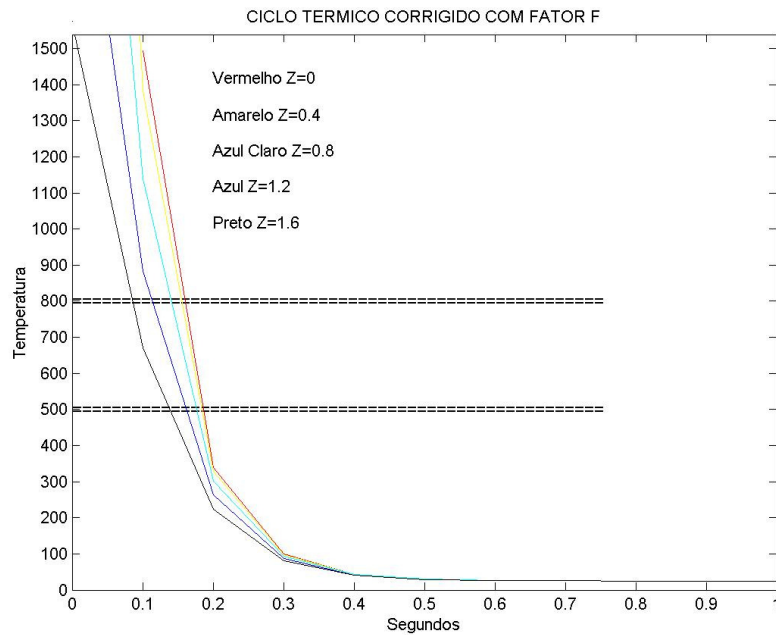
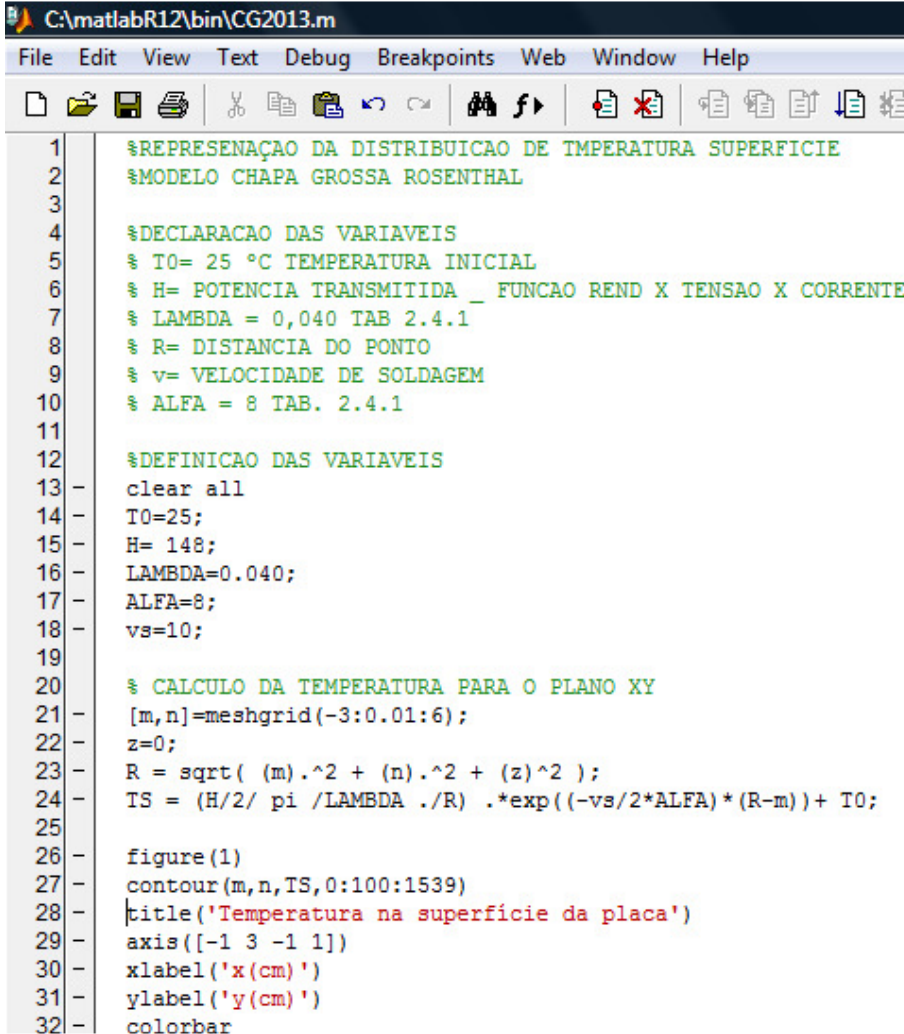


Figura 3.4.3 Ciclo térmico corrigido pelo fator "F" aplicado aos resultados apresentados pelos modelos de chapa grossa e fina

3.5 REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

A distribuição de temperatura calculada pelas equações 13, 15 ou 16 conforme a aplicação, pode ser introduzida no MATLAB para se obter a sua representação. A Figura 3.5.1 apresenta o algoritmo e a 3.5.2 apresenta o resultado (neste caso aplicou-se o modelo para chapa grossa).



```

C:\matlabR12\bin\CG2013.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1  %REPRESENAÇÃO DA DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA SUPERFICIE
2  %MODELO CHAPA GROSSA ROSENTHAL
3
4  %DECLARACAO DAS VARIAVEIS
5  % T0= 25 °C TEMPERATURA INICIAL
6  % H= POTENCIA TRANSMITIDA _ FUNCAO REND X TENSAO X CORRENTE
7  % LAMBDA = 0,040 TAB 2.4.1
8  % R= DISTANCIA DO PONTO
9  % v= VELOCIDADE DE SOLDAGEM
10 % ALFA = 8 TAB. 2.4.1
11
12 %DEFINICAO DAS VARIAVEIS
13 - clear all
14 - T0=25;
15 - H= 148;
16 - LAMBDA=0.040;
17 - ALFA=8;
18 - vs=10;
19
20 % CALCULO DA TEMPERATURA PARA O PLANO XY
21 - [m,n]=meshgrid(-3:0.01:6);
22 - z=0;
23 - R = sqrt( (m).^2 + (n).^2 + (z)^2 );
24 - TS = (H/2/ pi /LAMBDA ./R) .*exp((-vs/2*ALFA)*(R-m))+ T0;
25
26 - figure(1)
27 - contour(m,n,TS,0:100:1539)
28 - title('Temperatura na superficie da placa')
29 - axis([-1 3 -1 1])
30 - xlabel('x(cm)')
31 - ylabel('y(cm)')
32 - colorbar

```

Figura 3.5.1 Algoritmo do MATLAB para cálculo da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa

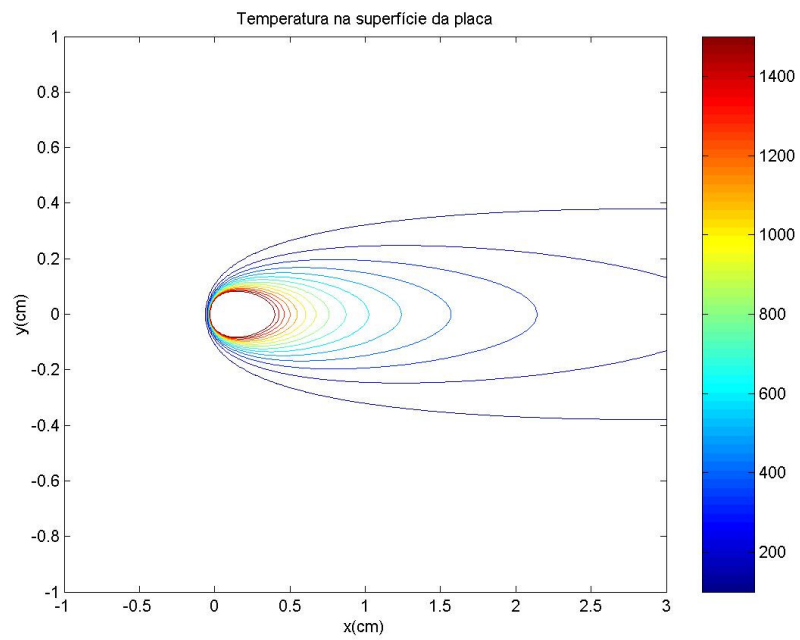


Figura 3.5.2 Distribuição de temperatura para o plano XY na superfície da chapa para o modelo de chapa grossa para aporte térmico de 148 Jmm^{-1} e velocidade de soldagem de 10 mms^{-1}

4 ESTUDOS DE CASOS

O objetivo deste capítulo é auxiliar outros estudantes a compreender a aplicação das equações e interpretar seus resultados.

4.1 INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO SOBRE A LARGURA DA ZTA E A TAXA MÉDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA

Analisando-se qualitativamente as equações aplicadas para a determinação da largura da ZTA (equações 21 a 24), espera-se que sua dimensão aumente com o aumento do aporte térmico. Da mesma forma, se forem analisadas as equações que determinam o intervalo de tempo entre 800 e 500 °C e a taxa média de resfriamento na ZTA, espera-se que o primeiro aumente e, por conseguinte, a segunda diminua. Assim sendo, um aumento no aporte térmico deve gerar uma ZTA de maior dimensão com menor taxa de resfriamento. Para comprovar esta análise teórica, propõem-se aplicar dois níveis de aporte térmico, com uma diferença de 30%, sobre as equações e analisar seus resultados. (A tabela 4.1.1 apresenta os valores numéricos adotados)

Tabela 4.1.1 – Valores de aporte térmico para simulação

Aporte térmico “a” [Jmm ⁻¹]	Aporte térmico “b” [Jmm ⁻¹]
150	195

Para avaliar a influência do aporte térmico sobre a largura da ZTA, seus valores serão introduzidos nas equações 21 e 23 para os modelos de chapa grossa e fina, respectivamente. A figura 4.1.1 apresenta o algoritmo (neste caso foram mantidas as demais variáveis).

```

C:\matlabR12\bin\LarguraZTA2013.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR A LARGURA DA ZTA PARA O MODELO CHAPA FINA e GROSSA
2
3  % DESCRICAO DE VARIAVEIS
4  % A1 - TEMPERATURA CORRESPONDENTE A 727 °C PARA O ACO AO CARBONO
5  % A1= 688.4 °C
6  % Ts - TEMPERATURA CORRESPONTE A 1530 °C PARA O ACO AO CARBONO
7  % Ts = 1526.3 °C
8  % T0 = 25 °C TEMPERATURA INICIAL
9  % CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA = 0.005 TAB. 2.4.1
10 % D = ESPESSURA DA CHAPA (NESTE CASO 1.6 mm)
11 % k3=(2*D*0.005)*(Ts-T0)*(A1-T0);
12 % C2=sqrt(2/(pi*exp(1)))*((Ts-A1c)/k3);
13 % k1=sqrt(A1-25);
14 % k2=sqrt(Ts-25);
15 % C1=sqrt(2/(pi*exp(1)*0.005))*(1/k1)-(1/k2)
16
17 clear all
18 % DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
19 A1=688.4;
20 Ts=1526.3;
21 T0=25;
22 HL1=150;
23 HL2=195;
24 D=1.6;
25
26 % DETERMINAÇÃO DE C2
27 k3=(2*D*0.005)*(Ts-T0)*(A1-T0);
28 C2=sqrt(2/(pi*exp(1)))*((Ts-A1)/k3);
29
30 % CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA FINA
31 Wcf1=C2*HL1
32 Wcf2=C2*HL2
33
34 % DETERMINAÇÃO DE C1
35 k1=sqrt(A1-T0);
36 k2=sqrt(Ts-T0);
37 C1=sqrt(2/(pi*exp(1)*0.005))*((1/k1)-(1/k2));
38
39 % CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA GROSSA
40 Wcg1=C1*sqrt(HL1)
41 Wcg2=C1*sqrt(HL2)

```

Figura 4.1.1 Algoritmo para cálculo da largura da ZTA para os modelos de chapa grossa e fina com dois níveis de aporte térmico

A tabela 4.1.2 apresenta os valores resultantes da simulação.

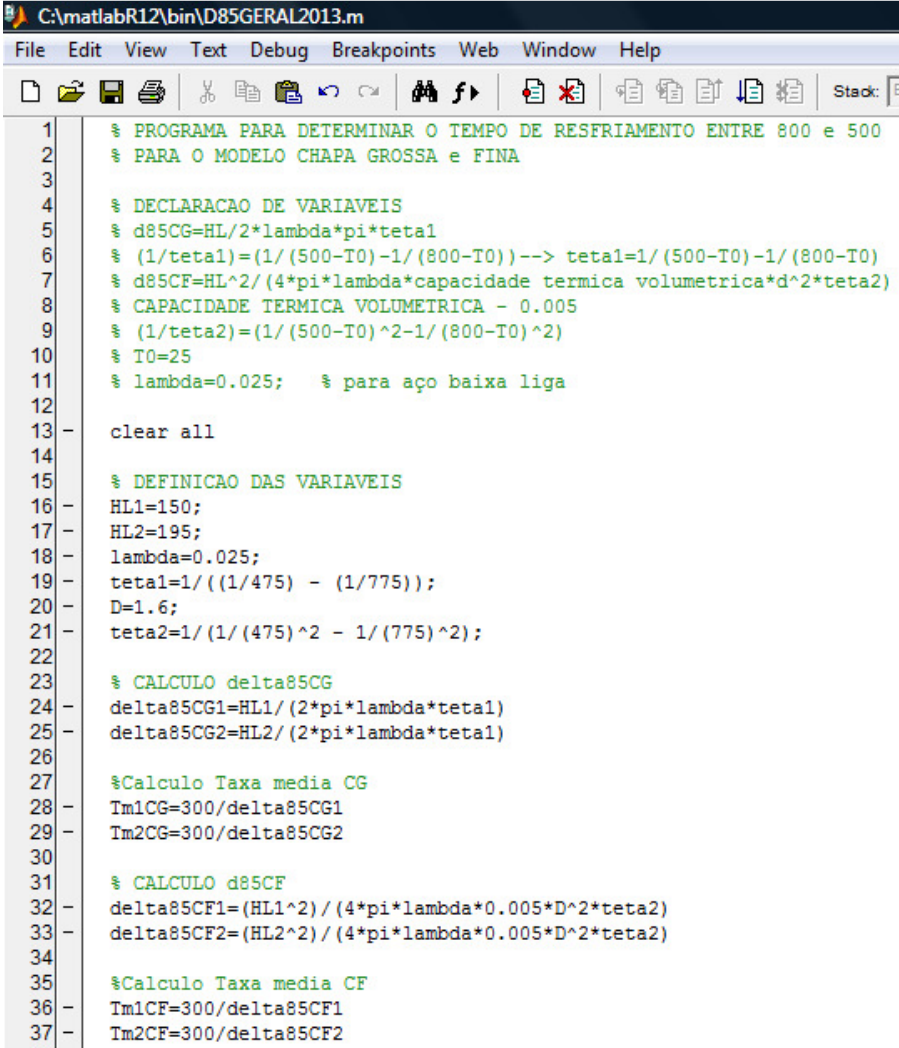
Tabela 4.1.2 – Influência do aporte térmico sobre a largura da ZTA para os modelos de chapa grossa e fina

	Aporte térmico “a” 150 [Jmm ⁻¹]	Aporte térmico “b” 195 [Jmm ⁻¹]	Diferença [%]
Largura da ZTA modelo Chapa fina [mm]	3,82	4,97	+30%
Largura da ZTA modelo Chapa Grossa [mm]	1,09	1,24	+14%
% = (dimensão “b”- dimensão ”a”) / dimensão “a”			

Conclui-se que com base nos resultados da tabela 4.1.2 que o aumento no valor do aporte térmico resulta num acréscimo da largura da ZTA. Verifica-se também que para o modelo de chapa grossa, este aumento não é linear como ocorre para o modelo

de chapa fina. Este resultado se deve à equação 21, pois sobre o valor do aporte térmico é aplicada a operação de radiciação.

Para avaliar a influência do aporte térmico sobre o intervalo de tempo entre 800 e 500 °C e a taxa média de resfriamento na ZTA, seus valores serão introduzidos nas equações 29 e 31, para os modelos de chapa grossa e fina, respectivamente. A figura 4.1.2 apresenta o algoritmo (neste caso foram mantidas as demais variáveis).



```

C:\matlabR12\bin\D85GERAL2013.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: B:
1  % PROGRAMA PARA DETERMINAR O TEMPO DE RESFRIAMENTO ENTRE 800 e 500
2  % PARA O MODELO CHAPA GROSSA e FINA
3
4  % DECLARACAO DE VARIAVEIS
5  % d85CG=HL/2*lambda*pi*teta1
6  % (1/teta1)=(1/(500-T0)-1/(800-T0))--> teta1=1/(500-T0)-1/(800-T0)
7  % d85CF=HL^2/(4*pi*lambda*capacidade termica volumetrica*d^2*teta2)
8  % CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA - 0.005
9  % (1/teta2)=(1/(500-T0)^2-1/(800-T0)^2)
10 % T0=25
11 % lambda=0.025; % para aço baixa liga
12
13 - clear all
14
15 % DEFINICAO DAS VARIAVEIS
16 - HL1=150;
17 - HL2=195;
18 - lambda=0.025;
19 - teta1=1/((1/475) - (1/775));
20 - D=1.6;
21 - teta2=1/(1/(475)^2 - 1/(775)^2);
22
23 % CALCULO delta85CG
24 - delta85CG1=HL1/(2*pi*lambda*teta1)
25 - delta85CG2=HL2/(2*pi*lambda*teta1)
26
27 %Calculo Taxa media CG
28 - Tm1CG=300/delta85CG1
29 - Tm2CG=300/delta85CG2
30
31 % CALCULO d85CF
32 - delta85CF1=(HL1^2)/(4*pi*lambda*0.005*D^2*teta2)
33 - delta85CF2=(HL2^2)/(4*pi*lambda*0.005*D^2*teta2)
34
35 %Calculo Taxa media CF
36 - Tm1CF=300/delta85CF1
37 - Tm2CF=300/delta85CF2

```

Figura 4.1.2 Algoritmo para cálculo do tempo entre 800 e 500 °C e taxa média de resfriamento na ZTA para os modelos de chapa grossa e fina com dois níveis de aporte térmico

A tabela 4.1.3 apresenta os valores resultantes da simulação.

Tabela 4.1.3 – Influência da variação do aporte térmico sobre Δt_{8-5} e taxa média de resfriamento na ZTA

	Aporte térmico “a” 150 [Jmm ⁻¹]	Aporte térmico “b” 195 [Jmm ⁻¹]	Diferença [%]
Δt_{8-5-CG} [s]	0,78	1,01	+29%
T'_{CG} [°Cs ⁻¹]	385	296	-23%
Δt_{8-5-CF} [s]	15,5	26,2	+69%
T'_{CF} [°Cs ⁻¹]	19,4	11,5	-41%
% = (dimensão “b”- dimensão “a”) / dimensão “a”			

Conclui-se que com base nos resultados da tabela 4.1.3 que o aumento no valor do aporte térmico resulta num acréscimo do Δt_{8-5} e redução da taxa média de resfriamento. O impacto sobre o Δt_{8-5-CF} e T'_{CF} para o modelo de chapa fina foi maior porque neste caso a equação 31 aplica a operação de exponenciação sobre o valor do aporte térmico.

4.2 INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

Analisando-se qualitativamente as equações aplicadas para a cálculo da distribuição de temperatura (equações 8 e 11), espera-se que a temperatura para um determinado ponto, aumente com o aumento do aporte térmico. Para avaliar a influência do aporte térmico a distribuição de temperatura, serão aplicados os valores adotados no item 4.1 sobre a equação 8 (modelo de chapa grossa). A figura 4.2.1 apresenta o algoritmo (neste caso foram mantidas as demais variáveis).

A figura 4.2.2 apresenta a distribuição de temperatura calculada com os dois níveis de aporte térmico. Conforme previsto, as temperaturas para o mesmo ponto foram maiores com o aumento do aporte térmico, isso pode ser observado pelo deslocamento das linhas isotermas em relação ao ponto central (fonte de calor).

```

C:\matlabR12\bin\CGGERAL2013.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1  % Print SENACAO DA DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA SUPERFICIE
2  % CHAPA GROSSA ROSENTHAL
3
4  %DECLARACAO DAS VARIAVEIS
5  % T0= 25 °C TEMPERATURA INICIAL
6  % H= POTENCIA TRANSMITIDA _ FUNCAO REND X TENSAO X CORRENTE
7  % LAMBDA = 0,040 TAB 2.4.1
8  % R= DISTANCIA DO PONTO
9  % v= VELOCIDADE DE SOLDAGEM
10 % ALFA = 8 TAB. 2.4.1
11
12 %DEFINICAO DAS VARIAVEIS
13 clear all
14 T0=25;
15 H1= 150;
16 H2= 195;
17 LAMBDA=0.040;
18 ALFA=8;
19 vs=10;
20
21 % CALCULO DA TEMPERATURA PARA O PLANO XY
22 [m,n]=meshgrid(-3:0.01:6);
23 z=0;
24 R = sqrt( (m).^2 + (n).^2 + (z)^2 );
25 TS1 = (H1/2/ pi /LAMBDA ./R) .*exp((-vs/2*ALFA)*(R-m))+ T0;
26 TS2 = (H2/2/ pi /LAMBDA ./R) .*exp((-vs/2*ALFA)*(R-m))+ T0;
27
28 figure(1)
29 contour(m,n,TS1,0:100:1539)
30 title('Temperatura na superficie da placa')
31 axis([-1 3 -1 1])
32 xlabel('x(cm)')
33 ylabel('y(cm)')
34 colorbar
35
36 figure(2)
37 contour(m,n,TS2,0:100:1539)
38 title('Temperatura na superficie da placa')
39 axis([-1 3 -1 1])
40 xlabel('x(cm)')
41 ylabel('y(cm)')
42 colorbar
43

```

Figura 4.2.1 Algoritmo para cálculo da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa com dois níveis de aporte térmico

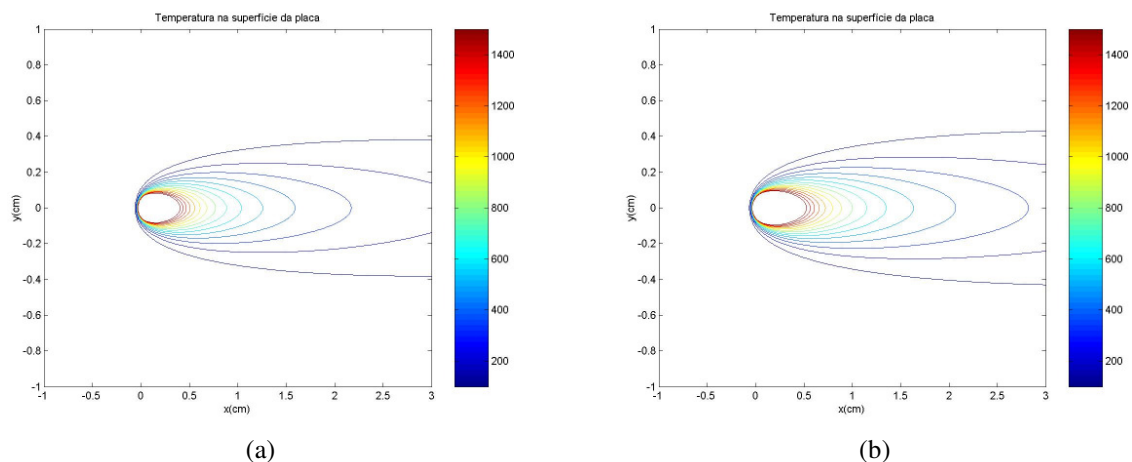


Figura 4.2.2 Representação da distribuição de temperatura para o modelo de chapa grossa; (a) aporte térmico de 150 Jmm^{-1} ; (b) aporte térmico de 195 Jmm^{-1}

4.3 INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO SOBRE O CICLO TÉRMICO

Usando-se a analogia com as análises anteriores, espera-se que um aumento no aporte térmico aumente a temperatura de pico atingida por um determinado ponto e diminua a taxa média de resfriamento. Para comprovar esta hipótese, foi aplicada uma leve alteração ao algoritmo usado no capítulo 3.4 para contemplar os dois níveis de aporte térmico.

A figura 4.3.1 apresenta o ciclo térmico resultante da simulação. Conforme previsto, a simulação apresentou uma nítida diferença na temperatura de pico e uma leve diferença na taxa de resfriamento (que pode ser mais facilmente verificada no intervalo entre 500 e 300 °C).

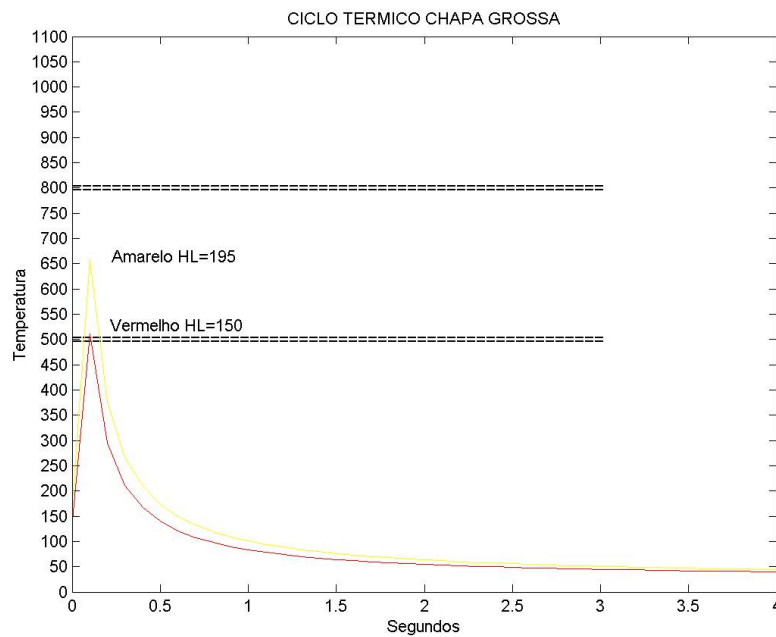


Figura 4.3.1 Representação do ciclo térmico para um ponto fixo aplicando-se o modelo de chapa grossa com dois níveis de aporte térmico

4.4 VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DA TAXA MÉDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA LARGURA REAL DA ZTA

Utilizando-se de dados reais, buscar-se-á neste capítulo, validar o cálculo da taxa média de resfriamento na ZTA utilizando-se as equações propostas no capítulo 2.5. Para isso serão usados alguns resultados de Poorhaydari (2005). A tabela 4.4.1 apresentará algumas características do material e processo de soldagem, importantes para os cálculos envolvidos e a tabela 4.4.2 apresentará os valores reais da taxa de resfriamento e Δt_{8-5} . Após apresentados os valores dos cálculos, eles serão comparados com os valores reais medidos.

Tabela 4.4.1 – Dados reais para cálculo da taxa média de resfriamento e Δt_{8-5}

Material	Espessura (mm)	λ (W mm ⁻¹ °C ⁻¹)	ρc (J mm ⁻³ °C ⁻¹)	T _s (°C)	A ₁ (°C)	T ₀ (°C)	H _L (Jmm ⁻¹)
Aço carbono	8	0,054	0,006	1500	695	25	500

λ - condutividade térmica - ρ, c - capacidade térmica volumétrica - T_s temperatura solidus - A₁ menor valor da temperatura critica para transformação - T₀ temperatura ambiente - H_L aporte térmico

Tabela 4.4.2 – Valores reais medidos no experimento

Largura da ZTA (mm)	Δt_{8-5} (s)	Taxa média de resfriamento na ZTA
1.86	1,8 ± 0,1	171 ± 6,2

Para calcular os itens necessários ao cálculo final da taxa média de resfriamento, foi desenvolvido algoritmo descrito no apêndice A4. Foram determinadas as larguras teóricas para os modelos de chapa grossa e fina, e o valor real da ZTA, para o cálculo do fator F.

Em seguida, foi calculado o Δt_{8-5} para ambos os modelos e aplicado o fator de correção para determinação do seu valor final. Com este valor foi calculada a taxa média de resfriamento na ZTA. A tabela 4.4.3 apresenta os valores finais encontrados.

Tabela 4.4.3 – Valores calculados pela simulação numérica

Δt_{8-5} (s)	Taxa média de resfriamento na ZTA (°Cs ⁻¹)
1,70	176,66

Verifica-se através da comparação entre os dados reais presentes na tabela 4.4.2 e os calculados através da simulação numérica presentes na tabela 4.4.3, que o método é válido e pode ser aplicado para a estimativa da taxa média de resfriamento na ZTA. Entretanto, o estudante deverá ter muita atenção às unidades das propriedades físicas dos materiais, pois durante os cálculos aplicados nesta comprovação os valores da condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica estavam na unidade do metro ao invés de milímetro e isso provocou erros de arredondamento no cálculo da largura da ZTA o que gerou um erro no cálculo de F.

5 CONCLUSÕES

A aplicação de um software como o MATLAB tornou a aprendizagem dos conceitos relacionados ao estudo do fluxo de calor no processo de soldagem a arco elétrico, mais interativa e ilustrativa, mostrando-se como uma ferramenta bastante eficaz para o aprendizado.

E a estimativa da taxa média de resfriamento na ZTA conforme a metodologia apresentada pode ser de grande valia nos estudo de casos reais de soldagem em que esta variável é importante para o estudo das transformações metalúrgicas que ocorrem nesta área.

REFERÊNCIAS

ADAMS JR., C. M. Cooling rates and peak temperature in fusion welding. **Welding Journal**, 1958.

GRONG, Oystein. **Metallurgical modeling of welding**. Londres: The Institute of Materials, 1994.

KASUYA, T.; YURIOKA, N. Prediction of welding thermal history by comprehensive solution. **Welding Journal**, 1993.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy**: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem fundamentos e tecnologia**: 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto. **Introdução a metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

POORHAYDARI, K.; PATCHETT, B. M.; IVEY, G. Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness. **Welding Journal**, out. 2005.

ROSENTHAL, D.: Weld J., 1941.

ROSENTHAL, D.: Trans. ASME, 1946.

SANTOS JUNIOR, Milton Correia dos. **Influência da transferência metálica por curto-circuito e CMT na geometria do cordão e características da ZTA do Dual Phase DP 600**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba.

TANIGUCHI, Célio. Transferência de calor na soldagem. In: WAINER, BRANDI E MELLO. **Soldagem Processos e Metalurgia**: 4ª reimpressão; São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2004.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sergio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de – **Soldagem Processos e Metalurgia**: 4ª reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2004.

ZHANG, W.; ELMER, J. W.; DEBROY, T. Modeling and real time mapping of phases during GTA welding of 1005 steel. **Material Science and Engineering A**, 2002.

APÊNDICE

A.1 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO MODELO DE CHAPA GROSSA

```

% APLICATIVO PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA
% MODELO DE CHAPA GROSSA ROSENTHAL

% DECLARACAO DAS VARIAVEIS
% T0= 25 °C TEMPERATURA INICIAL
% H= POTENCIA TRANSMITIDA _ FUNCAO REND X TENSAO X CORRENTE
% LAMBDA = 0,040 TAB 2.4.1
% R= DISTANCIA DO PONTO
% v= VELOCIDADE DE SOLDAGEM
% ALFA = 8 TAB. 2.4.1

% DEFINICAO DAS VARIAVEIS
clear all
T0=25;
H=0.8*17.1*108.2;
LAMBDA=0.040;
ALFA=8;
v=10;
np=500;
dt=0.1;
xzero=0;

% REPRESENTAÇÃO PARA O EIXO XZ
Z=0;
Z1=0.4;
Z2=0.8;
Z3=1.2;
Z4=1.6;
Y=0;

for a=1:np;
    tempo(a) = dt*(a-1);
    X = xzero+v*tempo(a);
    R = sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z)^2);
    R1= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z1)^2);
    R2= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z2)^2);
    R3= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z3)^2);
    R4= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z4)^2);
    TS(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*R))*exp((-v/2*ALFA)*(R-X));
    T04(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*R1))*exp((-v/2*ALFA)*(R1-X));
    T08(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*R2))*exp((-v/2*ALFA)*(R2-X));
    T12(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*R3))*exp((-v/2*ALFA)*(R3-X));
    T16(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*R4))*exp((-v/2*ALFA)*(R4-X));
end

figure(1)
plot(X,TS,'r')
hold on
title('CICLO TERMICO CHAPA GROSSA')
xlabel('Segundos')

```

```
ylabel('Temperatura')
set(gca,'ytick',0:100:1539)
axis([0 4 0 1539])
text(0,800,'=====')
text(0,500,'=====')
semilogx(tempo,TS,'r')
semilogx(tempo,T04,'y')
semilogx(tempo,T08,'c')
semilogx(tempo,T12,'b')
semilogx(tempo,T16,'k')
gtext('Vermelho Z=0')
gtext('Amarelo Z=0.4')
gtext('Azul Claro Z=0.8')
gtext('Azul Z=1.2')
gtext('Preto Z=1.6')
hold off
```

A.2 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO MODELO DE CHAPA FINA

```

% APLICATIVO PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA
% MODELO DE CHAPA FINA ROSENTHAL

% DECLARACAO DAS VARIAVEIS
% T0= 25 °C TEMPERATURA INICIAL
% H= POTENCIA TRANSMITIDA _ FUNCAO REND X TENSAO X CORRENTE
% LAMBDA = 0,040 TAB 2.4.1
% R= DISTANCIA DO PONTO
% v= VELOCIDADE DE SOLDAGEM
% ALFA = 8 TAB. 2.4.1

% DEFINICAO DAS VARIAVEIS
clear all
T0=25;
H=0.8*17.1*108.2;
LAMBDA=0.040;
ALFA=8;
v=10;
np=1000;
dt=0.1;
xzero=0;
D=1.6;

% REPRESENTAÇÃO PARA O EIXO XZ
Z=0;
Z1=0.4;
Z2=0.8;
Z3=1.2;
Z4=1.6;
Y=0;

for a=1:np;
    tempo(a) = dt*(a-1);
    X = xzero+v*tempo(a);
    R = sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z)^2);
    R1= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z1)^2);
    R2= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z2)^2);
    R3= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z3)^2);
    R4= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z4)^2);
    TS(a) =T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R/(2*ALFA));
    T04(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R1/(2*ALFA));
    T08(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R2/(2*ALFA));
    T12(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R3/(2*ALFA));
    T16(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R4/(2*ALFA));
end

figure(1)
plot(X,TS,'r')
hold on
title('CICLO TERMICO CHAPA FINA')
xlabel('Segundos')
ylabel('Temperatura')
set(gca,'ytick',0:100:1539)
axis([0 1 0 1539])
text(0,800,'=====')

```

```
text(0,500,'=====')
semilogx(tempo,TS,'r')
semilogx(tempo,T04,'y')
semilogx(tempo,T08,'c')
semilogx(tempo,T12,'b')
semilogx(tempo,T16,'k')
gtext('Vermelho Z=0')
gtext('Amarelo Z=0.4')
gtext('Azul Claro Z=0.8')
gtext('Azul Z=1.2')
gtext('Preto Z=1.6')
hold off
```

A.3 ALGORITMO PARA CÁLCULO DO CICLO TÉRMICO CORRIGIDO PELO FATOR F

```

% APLICATIVO PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA
% MODELO DE CHAPA INTERMEDIARIA CORRIGIDO PELO FATOR F

% DECLARACAO DAS VARIAVEIS
% T0= 25 °C TEMPERATURA INICIAL
% H= POTENCIA TRANSMITIDA _ FUNCAO REND X TENSAO X CORRENTE
% LAMBDA = 0,040 TAB 2.4.1
% R= DISTANCIA DO PONTO
% v= VELOCIDADE DE SOLDAGEM
% ALFA = 8 TAB. 2.4.1

% DEFINICAO DAS VARIAVEIS
clear all
T0=25;
H=0.8*17.1*108.2;
LAMBDA=0.040;
ALFA=8;
v=10;
np=1000;
dt=0.1;
xzero=0;
D=1.6;
F=0.7890;

% REPRESENTAÇÃO PARA O EIXO XZ
Z=0;
Z1=0.4;
Z2=0.8;
Z3=1.2;
Z4=1.6;
Y=0;
for a=1:np;
    tempo(a) = dt*(a-1);
    X = xzero+v*tempo(a);
    R = sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z)^2);
    R1= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z1)^2);
    R2= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z2)^2);
    R3= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z3)^2);
    R4= sqrt((X)^2+(Y)^2+(Z4)^2);
    TSCG(a) =T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R/(2*ALFA));
    T04CG(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R1/(2*ALFA));
    T08CG(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R2/(2*ALFA));
    T12CG(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R3/(2*ALFA));
    T16CG(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R4/(2*ALFA));
    TSCF(a) =T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R/(2*ALFA));
    T04CF(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R1/(2*ALFA));
    T08CF(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R2/(2*ALFA));
    T12CF(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R3/(2*ALFA));
    T16CF(a)=T0+(H/(2*pi*LAMBDA*D))*exp((-v*X)/(2*ALFA))*besselk(0,v*R4/(2*ALFA));
    TS=TSCG+F*(TSCF-TSCG);
    T04=T04CG+F*(T04CF-T04CG);
    T08=T08CG+F*(T08CF-T08CG);
    T12=T12CG+F*(T12CF-T12CG);
    T16=T16CG+F*(T16CF-T16CG);
end

```

```

figure(1)
plot(X,TS,'r')
hold on
title('CICLO TERMICO CORRIGIDO COM FATOR F')
xlabel('Segundos')
ylabel('Temperatura')
set(gca,'ytick',0:100:1539)
axis([0 1 0 1539])
text(0,800,'=====')
text(0,500,'=====')
semilogx(tempo,TS,'r')
semilogx(tempo,T04,'y')
semilogx(tempo,T08,'c')
semilogx(tempo,T12,'b')
semilogx(tempo,T16,'k')
gtext('Vermelho Z=0')
gtext('Amarelo Z=0.4')
gtext('Azul Claro Z=0.8')
gtext('Azul Z=1.2')
gtext('Preto Z=1.6')
hold off

```

A.4 ALGORITMO PARA VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DA TAXA MÉDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA

```

% ALGORITMO PARA VALIDAR O CALCULO DA TAXA MEDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA
% NESTE ALGORITMO APLICA-SE O MODELO PROPOSTO POR POORHAYDARI (2005)
% ESTIMATION OD COOLING RATE IN THE WELDING OF PLATES WITH INTERMEDIATE
THICKNESS

% O ALGORITMO DESENVOLVIDO ABAIXO CALCULA AS GRANDEZAS CONFORME SAO
APLICADAS NOS
% CALCULOS POSTERIORES

% DESCRICAO DE VARIAVEIS
% A1 - TEMPERATURA CORRESPONDENTE A 727 °C PARA O ACO AO CARBONO
% Ts - TEMPERATURA CORRESPONTE A 1530 °C PARA O ACO AO CARBONO
% T0 = 25 °C TEMPERATURA INICIAL
% CAPACIDADE TERMICA VOLUMETRICA = 0.006
% lambda = 0.054;
% D = ESPESSURA DA CHAPA (NESTE CASO 8 mm)
% Wr= LARGURA REAL DA LARGURA DA ZTA NA DIRECAO DE INTERESSE
% Wcg = LARGURA TEORICA PARA O MODELO CHAPA GROSSA
% Wcf = LARGURA TEORICA PARA O MODELO CHAPA FINA
% Wr= MEDIDA REAL OBTIDA DO CORPO DE PROVA

clear all

% DETERMINAÇÃO A LARGURA DA ZTA PARA O MODELO CHAPA GROSSA
% DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
A1=695;
Ts=1500;
T0=25;
HL=500;
D=8;
CP=0.006;
% DETERMINAÇÃO DE C1
k1=sqrt(A1-T0);
k2=sqrt(Ts-T0);
b1=1/k1;
b2=1/k2;
b3=2/(pi*exp(1)*CP);
C1=sqrt(b3)*(b1-b2);
% CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA GROSSA
Wcg=C1*sqrt(HL)

% DETERMINAÇÃO A LARGURA DA ZTA PARA O MODELO CHAPA FINA
% DETERMINAÇÃO DE C2
k3=(2*D*CP)*(Ts-T0)*(A1-T0);
b4=2/(pi*exp(1));
C2=sqrt(b4)*((Ts-A1)/k3);
% CALCULO DA LARGURA DA ZTA PARA CHAPA FINA
Wcf=C2*HL

% CALCULO DO FATOR F DE CORRELACAO
% DEFINIÇÃO DAS VARIAVEIS
Wr=1.86;
F=(Wr-Wcg)/(Wcf-Wcg)

```

```

% PROGRAMA PARA DETERMINAR O TEMPO DE RESFRIAMENTO ENTRE 800 e 500
% PARA O MODELO CHAPA GROSSA
% DEFINICAO DAS VARIAVEIS
lambda=0.054;
teta1=1/((1/475) - (1/775));
% CALCULO delta85CG
delta85CG=HL/(2*pi*lambda*teta1)

% PROGRAMA PARA DETERMINAR O TEMPO DE RESFRIAMENTO ENTRE 800 e 500
% PARA O MODELO CHAPA FINA
% DEFINICAO DAS VARIAVEIS
D=8;
teta2=1/(1/(500-T0)^2 - 1/(800-T0)^2);
% CALCULO d8CCF PARA OS QUATRO HLs
delta85CF=(HL^2)/(4*pi*lambda*CP*D^2*teta2)

% PROGRAMA PARA DETERMINAR O TAXA DE RESFRIAMENTO NA ZTA
% CALCULO DO TEMPO ENTRE 800 e 500 CORRIGIDO POR F
D85=delta85CG+F*(delta85CF-delta85CG)

% CALCULO DA TAXA MEDIA DE RESFRIAMENTO NA ZTA
TRESF=300/D85

```