

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DO CICLO TÉRMICO NA ZONA AFETADA PELO CALOR PRODUZIDA PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM MAG**

por

Paulo Vítor Zamin

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

Porto Alegre, dezembro de 2010

**ESTUDO DO CICLO TÉRMICO NA ZONA AFETADA PELO CALOR PRODUZIDA PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM MAG**

por

Paulo Vítor Zamin

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

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

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Ivan Guerra Machado

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 03 de dezembro de 2010.

ZAMIN, P. V. **Estudo do Ciclo Térmico na Zona Afetada Pelo Calor Produzida pelo Processo de Soldagem MAG**. 2010. 19p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para aquisição do ciclo térmico e sua utilização para prever a microestrutura presente na zona afetada pelo calor (ZAC) através de diagramas de resfriamento contínuo. O trabalho foi elaborado para uma solda realizada pelo processo MAG, e a aquisição de dados através de termopares. Os dados experimentais foram comparados com os resultados teóricos tanto para o ciclo térmico, quando para a previsão de microestrutura.

PALAVRAS-CHAVE: *soldagem, ciclos térmicos, zona afetada pelo calor.*

ZAMIN, P. V. **Study of the Thermal Cycle in the Heat Affected Zone Produced by MAG Welding Process**. 2010. 19p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

This paper presents a methodology for acquisition of thermal cycle and its use to predict the microstructure present in the heat affected zone (HAZ) through continuous cooling diagrams. The paper was prepared for a welding process performed by MAG, and data acquisition using thermocouples. The experimental data were compared with the theoretical results for both the thermal cycle, while for the prediction of microstructure.

KEYWORDS: *welding, thermal cycles, heat affected zone.*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Processos de soldagem	1
3.1.1. Soldagem MAG	1
3.1.2. Variáveis de procedimento	2
3.2. Calor nos processos de soldagem	2
3.3. Ciclo Térmico	2
3.3.1. Modos de resfriamento	4
3.4. Modelos matemáticos	5
3.4.1. Energia produzida pela fonte	5
3.4.2. Principais Modelos Utilizados na Soldagem	5
3.4.3. Extração Bidimensional do Calor (2 D)	6
3.4.4. Extração Tridimensional do Calor (3 D)	6
3.4.5. Extração de Calor em Regime Intermediário (2,5 D)	6
3.5. Tratamentos Térmicos	7
3.5.1. Aquecimento	7
3.5.2. Resfriamento	7
3.5.3. Temperatura de aquecimento	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	8
4.1. Soldagem	8
4.2. Aquisição de Dados	9
4.3. Metalografias	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos mais importantes dentre os processos industriais de fabricação, também utilizado para reparos em peças danificadas, revestimentos com características especiais e corte.

Entretanto é importante salientar que durante os processos de soldagem nos aços ao carbono, a zona afetada pelo calor (ZAC) sofre aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, alterando as propriedades mecânicas e estruturais já existentes. Portanto, esta região deverá ser resfriada de modo que se evite a formação de microconstituíntes frágeis, minimizando-se, assim, as alterações das propriedades mecânicas originais. A transformação de fase ocorrida durante o resfriamento conduzirá a uma estrutura ferrítica com regiões de martensita, ou a uma bainita grosseira, dependendo da taxa de resfriamento e do tipo de aço.

Os ciclos térmicos podem ser determinados teoricamente, utilizando expressões matemáticas baseadas em equações de fluxos de calor, contudo a avaliação teórica de ciclos térmicos na ZAC pode conduzir a resultados razoáveis, já a determinação experimental leva a resultados mais realísticos.

Isso permite, em conjunto com as curvas de resfriamento contínuo ou curvas CCT uma previsão da microestrutura presente na ZAC.

2. OBJETIVOS

A ideia deste trabalho é apresentar uma metodologia para aquisição e análise das temperaturas na ZAC durante o processo de soldagem, possibilitando a determinação de uma curva de temperatura em função do tempo, permitindo assim a comparação de dados experimentais com dados baseados em equações matemáticas.

Utilizar esta curva de temperatura em função do tempo em conjunto de um diagrama de resfriamento contínuo para prever o tipo de microestrutura formada durante o processo de soldagem e comparar com a microestrutura real obtida através de micrografias.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processos de soldagem

Na maioria dos processos de soldagem o calor é um elemento essencial à execução de uniões soldadas, mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência nas transformações metalúrgicas. Esses efeitos são consequências dos ciclos térmicos e das temperaturas a que a ZAC é submetida.

Os processos de soldagem podem ser classificados tanto pelo tipo de fonte de energia que podem ser mecânica, química, elétrica e radiante, quanto pela natureza da união. As uniões são classificadas de diversas formas, sendo que a grande maioria são realizadas com a fusão do material submetido à soldagem (Wainer et al., 1992).

Todo processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos:

- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Proporcionar algum grau de controle da microestrutura, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

3.1.1. Soldagem MAG

Na soldagem *MAG*, o arame-eletrodo é continuamente alimentado, o qual produz o arco elétrico com a peça, formando assim a poça de fusão. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação da atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases. (Wainer et al. 1992; Machado, 1996; Paranhos e Souza, 1999).

3.1.2. Variáveis de procedimento

O controle do processo e, conseqüentemente, da produtividade e da qualidade da junta é determinado, em grande parte, pelas variáveis de procedimento. As variáveis pré-selecionadas são aquelas escolhidas antes da realização da solda e são de difícil alteração após seu início. As variáveis ajustáveis são aquelas que podem ser alteradas durante a soldagem, como tensão, corrente e velocidade. (Machado, 1996; Wainer et al., 1992).

3.2. Calor nos processos de soldagem

A energia utilizada nos processos de soldagem provoca notáveis alterações nos metais base e de solda, sendo que esta energia influencia os seguintes aspectos da junta soldada (Machado, 2000).

- Macroestrutura de solidificação do metal de solda;
- Transformações microestruturais;
- Propriedades mecânico/metalúrgicas;
- Descontinuidades;
- Tensões residuais;
- Deformações.

Durante a soldagem, a ZAC sofre aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, alterando as propriedades mecânicas e estruturais do metal base. Portanto, esta região deverá ser resfriada de modo que se evite a formação de fases frágeis, minimizando-se, assim, as alterações das propriedades originais. A transformação de fase ocorrida durante o resfriamento conduzirá a uma estrutura ferrítica com regiões de martensita, ou a uma bainita grosseira, caso a taxa de resfriamento seja lenta, o que prejudicará a resistência desta região (Reis Sobrinho e Alcântara, 2007). Este efeito foi observado por Rêgo, 2005, levando a conclusão que o ciclo térmico na ZAC influencia diretamente a estrutura e, conseqüentemente, as propriedades finais da junta, de modo que a microestrutura formada depende dos seguintes fatores:

- Temperatura máxima do ciclo térmico;
- Taxa de resfriamento;
- Composição química do material soldado.

Do ponto de vista de fluxo de calor, a região crítica de uma junta soldada é a poça de fusão. O fluxo de massa presente nesta região é suficiente para que um fluxo de calor por convecção seja estabelecido. Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na poça de fusão, os modelos que visam descrevê-lo são bastante elaborados. Já para o estudo da ZAC, são geralmente utilizados modelos mais simples (Londoño, 2001).

3.3. Ciclo Térmico

O ciclo térmico é estabelecido pelo comportamento de temperatura ao longo do tempo durante a execução da soldagem. Este ciclo é afetado pelas propriedades do material soldado e pelas configurações do processo.

Em um processo a arco elétrico, o ciclo térmico consiste de um aquecimento muito rápido (centenas de graus por segundo), seguido por um resfriamento relativamente rápido (dezenas de graus por segundo) até atingir a temperatura ambiente (Poorhaydari et al., 2005).

Considerando um cordão de solda sendo realizado por algum processo ao arco elétrico, conforme ilustrado na **Fig. 3.1**. Os eixos XYZ mutuamente perpendiculares; a fonte desloca-se com velocidade v no sentido OX, percorrendo a distância $v \times t$ no tempo t e o ponto (P) na posição (x,y,z) é representado pelo vetor \vec{r} , com módulo $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

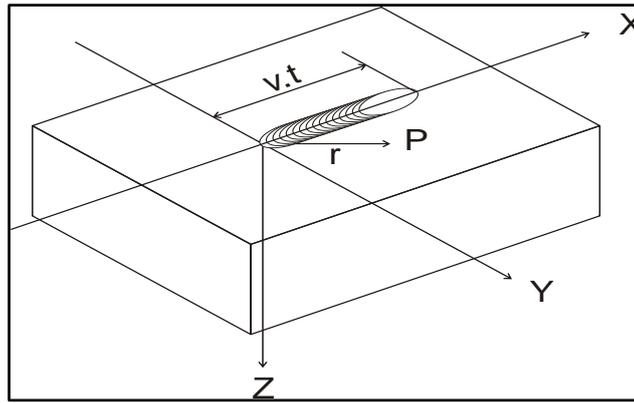


Figura 3.1 – Soldagem sendo realizada sobre a superfície de um corpo (Machado, 2000).

Nesta situação a aquisição do ciclo térmico pode ser realizada utilizando termopares posicionados dentro da poça de fusão ou sobre o metal base. No primeiro caso o termopar deve ser capaz de operar em temperaturas no mínimo 200°C acima do ponto de fusão do metal de solda. Para aços, o termopar Pt/Pt-10% Rh tipo S é recomendado. A aquisição em pontos situados no metal base pode ser realizada com termopares tipo Ni-Cr/Ni-Al tipo K, posicionado em furos ou na superfície da peça. (Machado, 2000).

Durante a aquisição do ciclo térmico, Reis Sobrinho e Alcântara, 2007 encontraram valores de temperatura acima de 1450°C próximo à poça de fusão, ultrapassando assim o limite de utilização do termopar tipo S. Foi então utilizado o tipo B Pt-Rh 6%/Pt-Rh 30%, que opera até 1700°C.

Sendo assim, o tipo de termopar deve ser corretamente escolhido de acordo com a posição que será realizada a aquisição da temperatura, isto devido ao elevado gradiente de temperatura próximo à poça de fusão.

Nos exemplos apresentados a seguir, empregou-se para o cálculo dos ciclos térmicos, a teoria devido a Rosenthal (será apresentada a seguir), considerando pontos situados na posição (x,y,x) dada em milímetros.

A **Fig. 3.2** representa o ciclo térmico e taxa de resfriamento (3D) calculados para o ponto (7,7,7), com potência de 20 kW e velocidade de 10 mm/s sobre aço ao carbono.

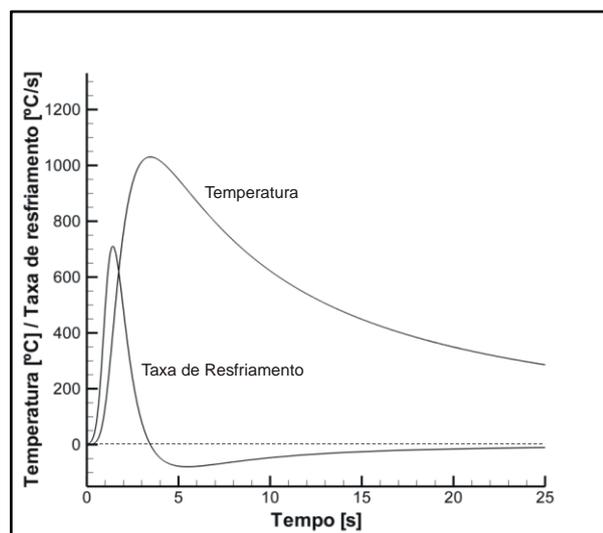


Figura 3.2 – Ciclo térmico e taxa de resfriamento.

Este gráfico permite a verificação de diversas características importantes, tais como: taxas máximas de aquecimento e resfriamento, temperatura máxima (temperatura de pico), o tempo de resfriamento entre 800 °C e 500 °C, e entre 800 °C e 300 °C, sendo nestes intervalos

que ocorrem as mais importantes transformações de fase nos aços ao carbono, além desta região da curva apresentar-se quase linear (Machado, 2000).

3.3.1. Modos de resfriamento

De acordo com a penetração que o cordão de solda atinge, em juntas de topo pode-se ter a extração de calor de três modos diferentes, conforme a **Fig. 3.3** (Londoño, 2001; Machado, 2000).

O cordão de solda apresenta penetração completa, o calor é essencialmente extraído em duas direções e as isoterma são aproximadamente paralelas à linha de fusão, sendo este regime de extração denominado bidimensional (2D);

A penetração é incompleta, com a superfície inferior sofrendo aquecimento, o regime de extração de calor é denominado intermediário (2,5D);

Quando a superfície inferior não é aquecida, o regime é dito tridimensional (3D).

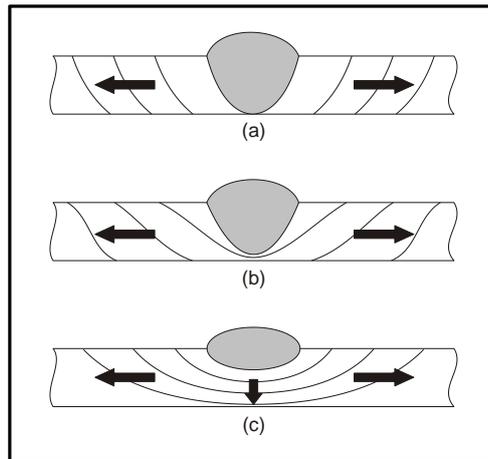


Figura 3.3 – Representação dos modos de extração de calor: (a) 2D; (b) 2,5D; (c) 3D (Machado, 2000).

A **Fig. 3.4** representa os ciclos térmicos calculados para diferentes espessuras de chapa, ocasionando diferentes modos de resfriamento, no ponto (0,10,0) com potência de 20 kW e velocidade de 10 mm/s sobre aço carbono.

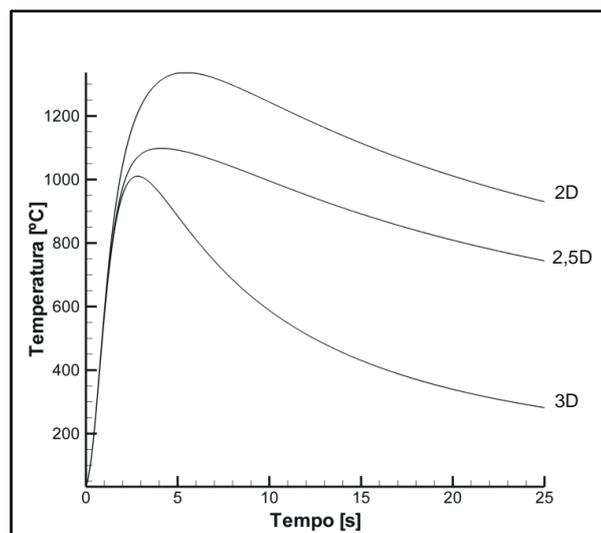


Figura 3.4 – Ciclos térmicos para diferentes regimes de extração de calor.

3.4. Modelos matemáticos

3.4.1. Energia produzida pela fonte

No caso particular da soldagem ao arco elétrico, considera-se que o calor necessário para formar o cordão é produzido por uma fonte ideal com potência q . Entretanto, nem toda a energia gerada pelo arco elétrico é transmitida para o metal base. Uma parte é dissipada para o meio por radiação e convecção, por este motivo, define-se a eficiência térmica do processo de soldagem, η , (Giraldo, 2001; Londoño, 2001; Machado, 2000).

$$q = \eta UI \quad (3.1)$$

onde U (volts) a tensão, I (ampères) a intensidade de corrente e η é o rendimento térmico do processo naquelas específicas condições.

Desta forma, sendo v a velocidade soldagem (mm/s), a quantidade de energia fornecida ao cordão de solda por unidade de comprimento, ou simplesmente “energia de soldagem” (J/mm) é dada por:

$$E = \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} \quad (3.2)$$

3.4.2. Principais Modelos Utilizados na Soldagem

A grande maioria dos modelos físicos de soldagem consistem em uma fonte de calor que se desloca em linha reta com velocidade constante como ilustra a **Fig. 3.1**. No início e no final do processo tem-se um regime transiente. Em algum momento após o início e antes do final, a distribuição de temperaturas é estacionária em relação ao sistema de coordenadas móvel (Londoño 2001).

Apesar de baseados na mesma teoria de condução do calor nos sólidos, os principais modelos foram desenvolvidos com as seguintes simplificações: (Londoño, 2001; Machado, 2000).

- O material base é homogêneo e isotrópico em todas as temperaturas e não ocorrem transformações microestruturais;
- Não existem fontes nem sumidouros de calor no interior do material;
- As propriedades físicas do material base são constantes;
- A fonte de energia é idealizada como um ponto para o caso de extração tridimensional, ou como uma linha com comprimento igual a espessura da peça quando a extração ocorre de forma bidimensional;
- Na soldagem ao arco elétrico, o efeito Joule ($R \cdot I^2$) é desconsiderado.

Como a fonte de calor encontra-se em movimento na direção OX , como representado na **Fig. 3.1**, será estabelecido um sistema de coordenadas (w, Y, Z) deslocando-se sobre o mesmo eixo, assim tem-se.

$$w = x - vt \quad (3.3)$$

Com isso, a equação diferencial de fluxo de calor expressa em coordenadas cartesianas com origem no centro da fonte móvel é dada por:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta w^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = -\frac{v}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta w} \quad (3.4)$$

Rosenthal propôs soluções para esta equação, entre elas destacam-se as dadas para fluxo bidimensional, tridimensional e intermediário de calor, para uma solda de topo, onde são desprezadas as perdas por convecção e radiação. Estas soluções permitem com uma boa aproximação as condições de fluxo de calor na soldagem.

3.4.3. Extração Bidimensional do Calor (2 D)

A resolução da **Eq. 3.4** para soldagem de chapas finas é feita considerando que a temperatura é constante na direção Z. Esta situação ocorre em soldas com penetração completa conforme ilustrado na **Fig. 3.3(a)**.

A fonte de calor é idealizada como uma linha vertical com potência q e comprimento igual ao da espessura da chapa, deslocando-se em X, considerando-se o sistema móvel de coordenadas (w, Y, Z).

Para facilitar a resolução, é feita a substituição $\alpha = 1/(2\lambda)$, onde α é a difusividade térmica do metal base.

Logo, a temperatura de um ponto que se encontra na posição $r = (w^2 + y^2)^{1/2}$ pode ser aproximada por:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{q}{2\pi g k} e^{(-\lambda v r)} \cdot K_0(\lambda v r) \quad (3.5)$$

onde k é a condutividade térmica do material base, g a espessura e K_0 a função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero com argumento $\lambda v r$. Para argumentos relativamente grandes, (> 10) a mesma pode ser aproximada pela seguinte relação:

$$K_0 \cong \left(\frac{\pi\alpha}{v r}\right)^{1/2} \cdot e^{(-\lambda v r)} \quad (3.6)$$

3.4.4. Extração Tridimensional do Calor (3 D)

Quando a soldagem é realizada em uma chapa de maior espessura, tal que possa ser considerada infinita na direção Z, a fonte de calor é considerada pontual **Fig. 3.3(c)**. A temperatura de um ponto que se encontra na posição $R = (w^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ pode ser aproximada resolvendo a **Eq. 3.4**, resultando em:

$$\Delta T = \frac{q}{2k\pi R} \cdot \exp[-\lambda v(R + w)] \quad (3.7)$$

3.4.5. Extração de Calor em Regime Intermediário (2.5D)

Existem situações nas quais o fluxo térmico é um meio termo entre 2D e 3D. Aliás, tais casos são usuais na prática de soldagem, sendo encontrados em juntas com penetração parcial ou passes imediatamente seguintes àquele de raiz, conforme a **Fig. 3.3(b)**.

$$\Delta T = \frac{q}{2k\pi} \cdot \exp(-\lambda v r) \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\exp(-\lambda v r_n)}{r_n} \quad (3.8)$$

onde n é um inteiro e $r_n^2 = w^2 + y^2 + (2ng + z)^2$.

Quanto a espessura da chapa, uma aproximação grosseira pode ser feita considerando a chapa como “fina” quando $\lambda v g < 1,0$, neste caso a fonte deve ser tratada como linha. Enquanto uma chapa com $\lambda v g > 10$ é considerada “espessa” (Machado 2000).

Já Londoño, 2001 propôs que em chapas com espessura menor que 12 mm a fonte deve ser tratada como linear, com espessura maior que 25 mm como pontual.

Todavia é importante salientar que critérios deste tipo são muito vagos, visto que outros fatores afetam a penetração da solda e conseqüentemente o modelo de fonte utilizado.

3.5. Tratamentos Térmicos

O tratamento térmico representa um ciclo tempo temperatura, de modo que, basicamente, os fatores a considerar são os seguintes: aquecimento, tempo de permanência à temperatura e resfriamento (Chiaverini, 1996).

Este ciclo de temperatura ocorre de maneira semelhante durante os processos de soldagem, como visto no item 3.3, conseqüentemente as alterações microestruturais ocorridas na ZAC serão semelhantes às ocorridas nos tratamentos térmicos.

3.5.1. Aquecimento

Considerando que a modificação das propriedades mecânicas do material é o objetivo fundamental do tratamento térmico, verifica-se que isto só é possível mediante uma alteração da sua estrutura. Nestas condições, a liga considerada deve ser aquecida a uma temperatura que possibilite tal modificação. No caso dos aços essa temperatura é de 723°C, chamada de temperatura crítica, na qual inicia a transformação de ferrita ($Fe\alpha$) em austenita ($Fe\gamma$) (Chiaverini, 1996).

3.5.2. Resfriamento

Durante o resfriamento, para que a estrutura volte ao seu estado, é necessária a mudança do reticulado cristalino, bem como o movimento dos átomos por difusão através da austenita sólida; tais modificações levam tempo. Em conseqüência se for aumentada a taxa de resfriamento, não haverá tempo suficiente para uma completa movimentação atômica acarretando no surgimento de diferentes constituintes (Chiaverini, 1996).

Uma representação esquemática do diagrama de transformação para resfriamento contínuo pode ser observada na **Fig. 3.5**, bem como diferentes taxas de resfriamento.

As curvas I e F determinam respectivamente o início e o fim da transformação da austenita em perlita.

A curva A representa uma taxa de resfriamento baixa, formando perlita de granulação grosseira. As curvas B e C com maior taxa de resfriamento também formam perlita, entretanto a granulação é mais fina e de maior dureza.

Aumentando ainda mais a taxa de resfriamento (curva D) verifica-se que ocorre o início da transformação, entretanto a curva de resfriamento não toca a curva de fim de transformação, de modo que a transformação em perlita apenas se inicia, interrompendo-se em seguida e, ao atingir a reta M_i , a austenita restante passa a martensita, cuja transformação termina na reta M_f . Com resfriamento muito rápido (curva E), verifica-se que a curva de resfriamento não toca a curva de transformação, de modo que não ocorre a formação de perlita, mas simplesmente a passagem para martensita.

O objetivo destas variações é visualizar como as tais parâmetros afetam o resfriamento da junta, e conseqüentemente as microestruturas resultante, bem como a extensão da ZAC.

Tabela 4.1 – Variáveis utilizadas

Experimento	1	2	3	4	5
Tensão [V]	32,2	32,2	32,2	32,2	32,2
Corrente [A]	200	200	200	200	200
Velocidade [mm/s]	7,7	5,7	9,7	7,7	7,7
Energia [J/mm]	790	1067	627	790	790
Pré aquecimento [°C]	0	0	0	100	200

O posicionamento dos termopares foi feito da seguinte forma: em uma chapa foi traçado uma linha de referência sobre a qual será realizada a soldagem. Como a largura do cordão de solda já havia sido determinada em experimentos anteriores, foi possível, marcar o posicionamento dos termopares em diferentes distâncias da borda de fusão. Com esse posicionamento é possível avaliar o ciclo térmico em diferentes distâncias da poça de fusão.

4.2. Aquisição de Dados

A aquisição da temperatura foi feita utilizando termopares tipo K, que foram posicionados em furos com 3 mm de profundidade nas posições previamente estabelecidas. Os termopares foram conectados a um sistema constituído de um amplificador, um conversor analógico/digital e um computador. Os dados foram obtidos em milivolts (mV), sendo posteriormente convertidos em temperatura.

4.3. Metalografias

As chapas foram transversalmente cortadas, possibilitando assim a análise do cordão de solda e do material base. A superfície a ser analisada foi preparada utilizando lixas de granulometrias cada vez mais finas, e finalmente polida em um disco de feltro com uma pequena quantidade de alumina. As micrografias foram realizadas utilizando microscópio óptico e ataque reativo de nital 2% (solução de álcool com ácido nítrico).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão representados os ciclos térmicos obtidos bem como um comparativo entre o real e o teórico.

A **Fig. 5.1 (a)** ilustra os dados obtidos pelos termopares posicionados a 1 mm, 3 mm e 5mm da borda de fusão. Na posição de 1 mm a temperatura de pico foi de 1040°C e o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C ($\Delta t_{8/5}$) foi de 12,1 s.

O modelo matemático é representado na **Fig. 5.1 (b)** para os mesmos parâmetros e posicionamentos. A temperatura máxima apresentada foi de 1260°C e $\Delta t_{8/5} = 23$ s.

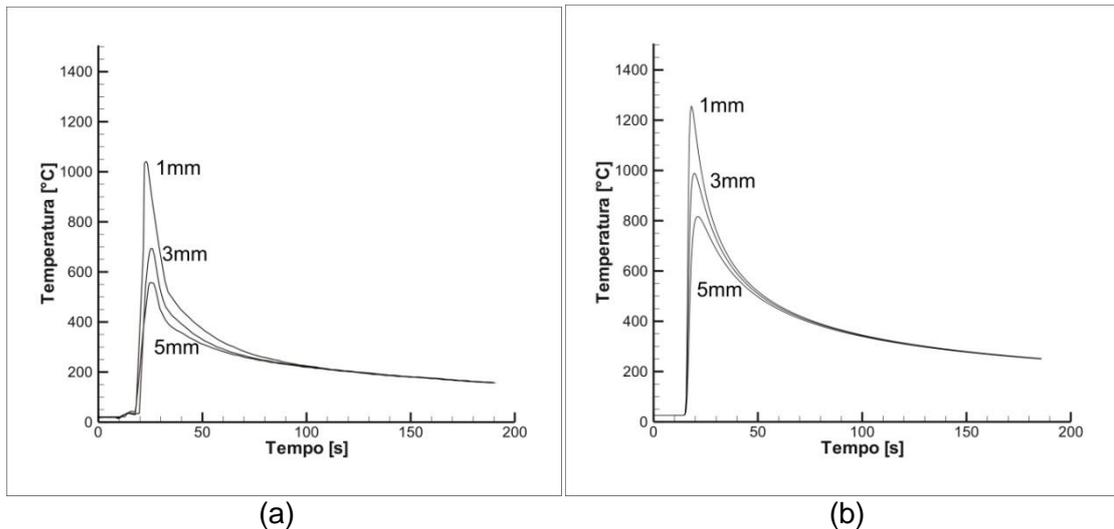


Figura 5.1 – Ciclos térmicos medidos em diferentes distâncias da borda de fusão. (a) real e (b) calculado.

Comparando os modelos de extração de calor com os dados obtidos foi possível perceber que o que mais se aproxima do experimento é o modelo em regime intermediário como era esperado, pois a chapa não é suficientemente grossa para estabelecer um regime 3D, nem fina o bastante para regime 2D. Sendo assim, utilizando **Eq. 3.8**, pode-se comparar a curva teórica com a curva real.

Existe uma diferença entre as duas curvas que se acentua conforme a temperatura aumenta. Isso ocorre pelas simplificações citadas no item 3.4.2 e, de fato, as perdas de calor por radiação e convecção não computadas na teoria aumentam de acordo com a temperatura, e as propriedades do material sofrem mudanças significativas com a temperatura.

Uma possível correção seria considerar o efeito da temperatura sobre as propriedades, sendo que o material em questão na temperatura ambiente possui condutividade térmica de 41 W/m.K e calor específico de 434 J/kg.K; na temperatura de 730 °C a condutividade térmica cai para 27,6 W/m.K e o calor específico aumenta para 1090 J/kg.K.

Fazendo uma aproximação grosseira pelo valor médio das propriedades, é possível verificar uma melhora significativa, principalmente região da curva de maior temperatura, como ilustra a **Fig. 5.2**, que mostra o ciclo real e os ciclos calculados com propriedades na temperatura ambiente e na temperatura média.

O ciclo calculado normalmente resultou em uma temperatura de pico de 1508°C, enquanto o calculado com as propriedades na temperatura média apresentou uma temperatura máxima de 940°C, próximo do valor de 820°C obtido experimentalmente.

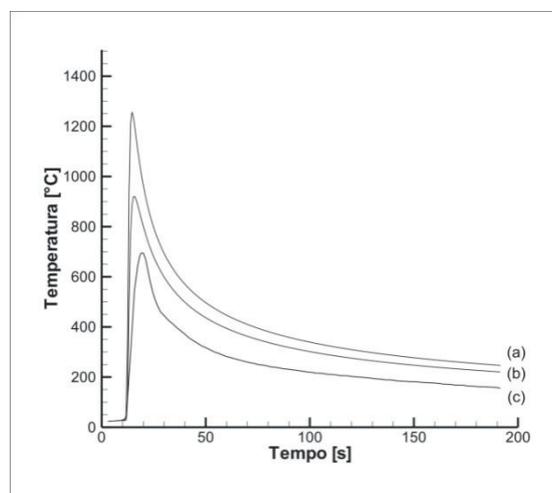


Figura 5.2 – Comparativo entre ciclos: medido (c), calculado com correção (b), calculado sem correção (a).

Na **Fig. 5.3 (a)** é possível visualizar como o pré-aquecimento afeta o ciclo térmico, o gráfico apresenta três ciclos com energia de 790 J/mm medidos a **3 mm** da borda de fusão com pré-aquecimentos de 473 K (200 °C), 373 K (100 °C) e na temperatura ambiente.

Modificando os parâmetros de soldagem a energia de soldagem sofre alterações, implicando diretamente na modificação do ciclo térmico obtido, como pode ser visto na **Fig. 5.3 (b)** que apresenta os ciclos térmicos com 1067 J/mm, 790 J/mm e 627 J/mm, na mesma posição de **3 mm**.

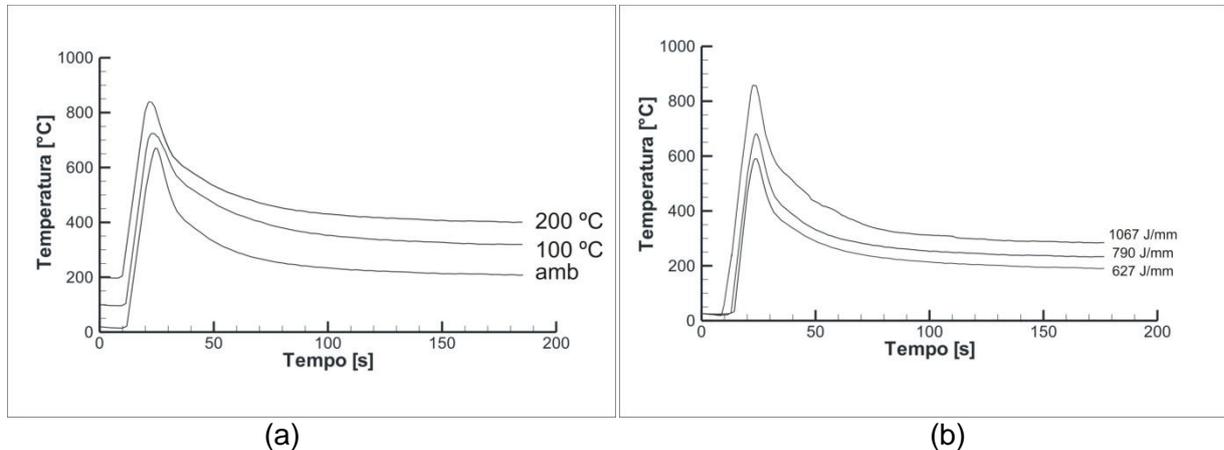


Figura 5.3 – Comparativo entre parâmetros: pré-aquecimentos (a), energias de soldagem (b).

A **Fig. 5.4** representa as diferentes regiões no experimento com energia de 760 J/mm sem pré-aquecimento.

Metal de solda (1).

Região de crescimento de grão (2): temperaturas elevadas o suficientes para haver dissolução de precipitados dentro do campo austenítico. Em aços com baixo carbono equivalente, a ferrita (fase clara), que cobre os contornos de grão é figura predominante, mas alto teores de carbono equivalente tende a reduzi-la.

Região de refino de grão (entre 2 e 3): a redução da temperatura de pico nesta zona implica que durante a transformação ferrita – austenita no aquecimento, a austenita não tem tempo de se desenvolver apropriadamente e o tamanho de grão continua muito pequeno. A transformação de austenita para ferrita no resfriamento, portanto, tende a produzir uma granulação fina de ferrita-perlita, dependendo da energia de soldagem e da velocidade de resfriamento.

Região parcialmente transformada (3): Região onde ocorre austenitização parcial. Na faixa de temperatura entre 750°C – 900°C, a perlita no metal de base rapidamente austenitiza devido ao abaixamento da temperatura de transformação, a austenita fica enriquecida em carbono e manganês. Por esta razão, a transformação austenita-ferrita no resfriamento pode levar a várias possíveis estruturas, dependendo da taxa de resfriamento.

Metal base (4): região inalterada.

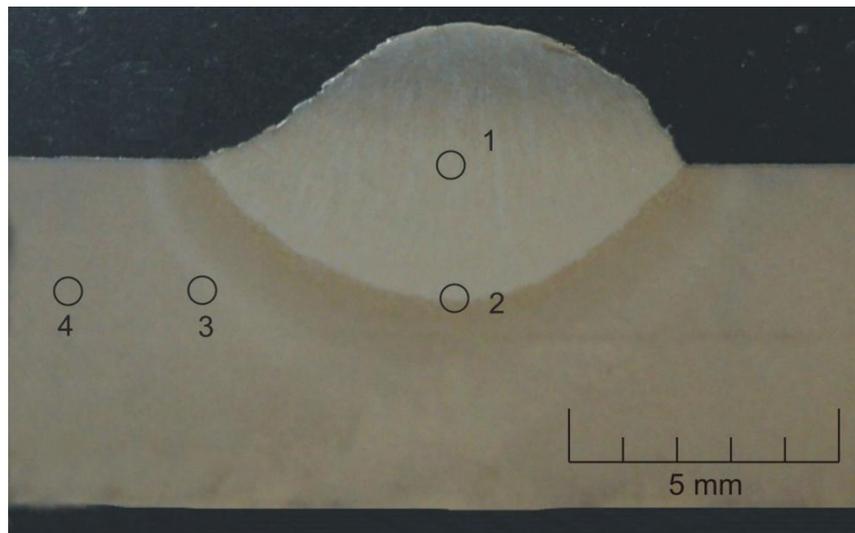


Figura 5.4 – Macrografia e suas diferentes regiões do experimento de referência.

As micrografias presentes nas **Fig. 5.5** representam as regiões indicadas na **Fig. 5.4**.

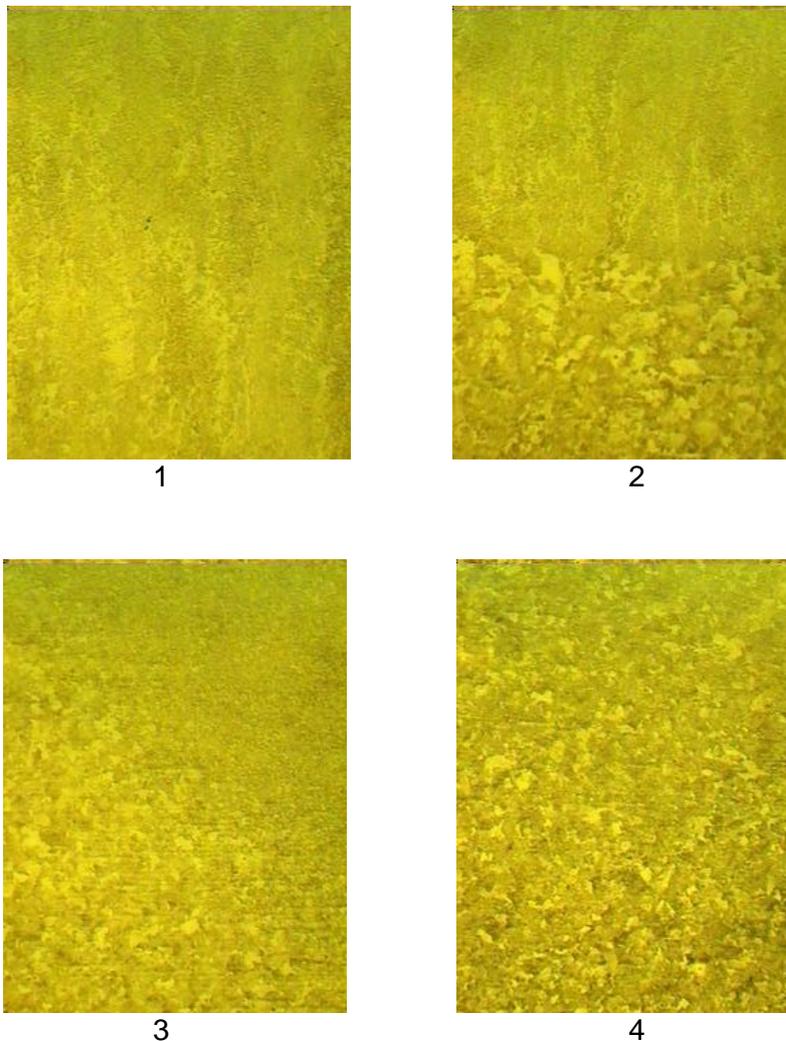


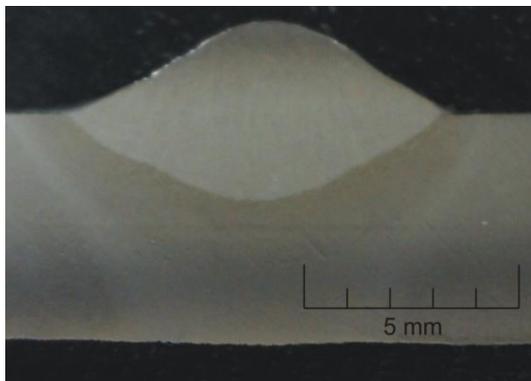
Figura 5.5 – Microestruturas de diferentes regiões da ZAC. Ataque reativo de Nital 2% ampliado 50x.

Através das medidas de dureza é possível confirmar tais variações microestruturais, a tabela 5.1 apresenta os valores de dureza obtidos para os diferentes experimentos nas posições descritas na **Fig. 5.5**.

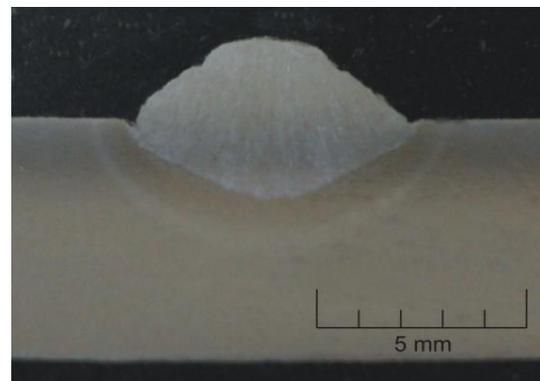
Tabela 5.1 – Dureza [HRB]

Experimento	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4
1	96,0	99,0	101,4	84,3
2	97,8	97,3	99,1	86,5
3	96,0	101,3	104,3	87,1
4	95,4	94,3	102,8	86,4
5	93,7	94,5	98,9	84,0

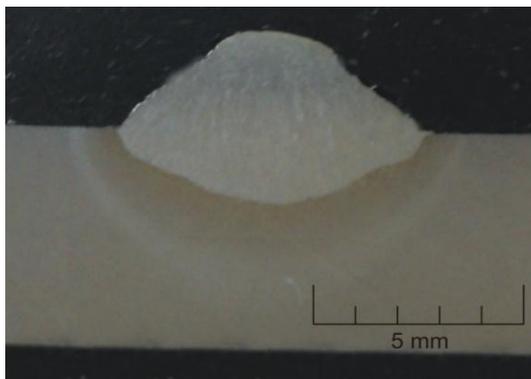
Os demais experimentos são apresentados na **Fig. 5.6**, cada experimento associado com seus parâmetros descritos na **Tab. 4.1**, onde E representa a energia de soldagem e T_0 é a temperatura de pré-aquecimento.



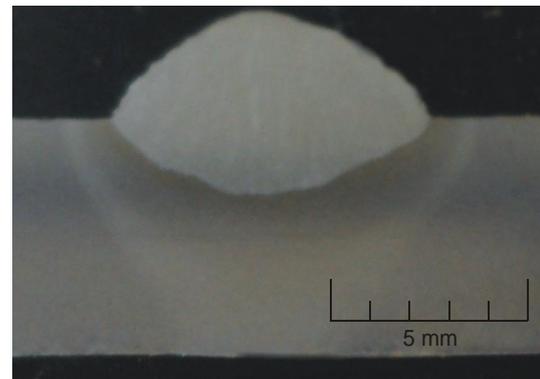
2) $E = 1067 \text{ J/mm}$



3) $E = 627 \text{ J/mm}$



4) $E = 760 \text{ J/mm}; T_0 = 373 \text{ K}$



5) $E = 760 \text{ J/mm}; T_0 = 473 \text{ K}$

Figura 5.6 – Macrografia dos diferentes experimentos.

A microestrutura formada em todos os experimentos foi a mesma, perlita grosseira na interface com o metal fundido e o refino gradual até o final da ZAC, cada tal com suas dadas proporções.

Utilizando o diagrama de resfriamento contínuo de um aço ao carbono com 0,45% de carbono, **Fig. 5.7**, e posicionando sobre ele curva de resfriamento é possível determinar a microestrutura resultante.

Ao cruzar a primeira curva inicia a transformação da austenita em ferrita (região A+F), cruzando a curva **ip**, a formação de perlita se inicia e ao cruzar a curva **fp** finaliza a transformação da perlita, indicando que toda a austenita transformou-se e os constituintes finais são ferrita e perlita. Como foi explicado no item 3.4.2, a curva (a) apresenta microestrutura de granulação mais fina e que a curva (b), conseqüentemente maior dureza.

A curva (a) representa o resfriamento medido na distância de 3 mm para o experimento 3, que apresentou de maior taxa de resfriamento. A curva (b) representa o resfriamento medido na distância de 3 mm para o experimento 5, que apresentou a menor taxa de resfriamento.

Embora todos pareçam semelhantes ao microscópico, as medidas de dureza revelam um grão mais refinado no experimento 3, que apresentou dureza máxima de 104,3 HRB, do que no experimento 5, que apresentou dureza máxima de 98,9 HRB.

Isto pode ser atribuído às diferentes condições de soldagem que resultam em diferentes taxas de resfriamento. A menor energia de soldagem no experimento 3 (curva (a)) resultou na maior taxa de resfriamento, enquanto o pré-aquecimento mais elevado no experimento 5 (curva (b)) resultou na menor taxa de resfriamento.

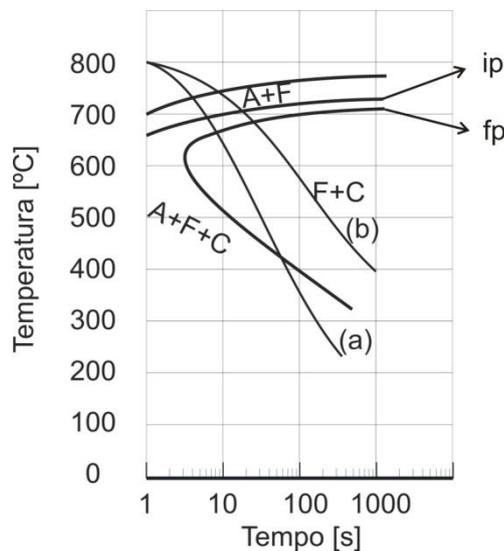


Figura 5.7 – Sobreposição das curvas de resfriamento experimentais sobre o diagrama CCT de um aço SAE 1045.

6. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho foi possível realizar as comparações propostas com resultados razoáveis entre dados obtidos na teoria e na prática.

A comparação do ciclo térmico experimental com o teórico demonstrou a diferença que ocorre devido às simplificações propostas por Rosenthal, e como essa diferença se acentua com o aumento da temperatura. Realizando uma correção das propriedades do material pela ação da temperatura, foi possível observar que em elevadas temperaturas este é o fator que mais afeta a diferença entre o ciclo térmico experimental e o teórico.

Diferentes condições de soldagem podem levar a diferentes modos de resfriamento resultando em microestruturas diferentes. Neste trabalho tal efeito foi muito sutil, pois as variações dos parâmetros de soldagem não foram significativas. Mas utilizando esta metodologia para um aço com maior temperabilidade efeitos mais significativos poderão ser visualizados.

A utilização dos diagramas de resfriamento contínuo mostrou-se uma ferramenta muito útil a partir do momento que a curva de resfriamento é conhecida, possibilitando o conhecimento do tipo de microestrutura presente na ZAC. Tal fato foi confirmado através da micrografia realizada que apresentou as microestruturas previstas através dos diagramas de resfriamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chiaverini, V.; **“Aços e Ferros Fundidos – Característicos Gerais e Tratamentos Térmicos”**, ABM, 7ª edição, 1996.

Figueiredo, K. M.; **“Aplicação de ensaio Charpy instrumentado no estudo da tenacidade à fratura dinâmica nas soldas a arco submerso em aços para caldeiras”**, São Carlos, 2004, 150p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; **“Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”**, LTC, 5ª edição, 2003.

Londoño, A. J. R.; **“Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na ZAC de soldagem multipasses de aços inoxidáveis duplex”**. São Paulo, 2001, Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo.

Machado, I.G.; **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre, 1996.

Machado, I.G.; **“Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicação”**, Imprensa Livre, 2000.

Modenesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B.; **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**, Belo Horizonte, 2006.

Paranhos, R.; Souza, A. C.; **“Soldagem a Arco Submerso”**, Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI, 1999. 77 p.: il. (Coleção soldagem 2000; 2).

Poorhaydari K.; Patchett, B. M.; Ivey D. G.; **“Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness”**, Welding Journal, 84(10): 149s-155s, october 2005.

Rêgo, R. U.; **“Estudo do Ciclo Térmico da Soldagem de Topo do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 409”**, Belo Horizonte, novembro de 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Reis Sobrinho, J. F.; Alcântara, N. G.; **“Análise dos Ciclos Térmicos Obtidos da Zona Afetada Termicamente da Junta Soldada de um Aço de Alta Resistência”**, João Pessoa, 2007, II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica.

Vander Voort, G. F.; **“Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels”**, Materials Park, Ohio: ASM International, 766 p., 1991.

Wainer E.; Branit S. D.; Mello, F. D. H; **“Soldagem: Processos e Metalurgia”**, Edgar Blücher, 1992.