

Diego Kellermann Hurtado
Alfeu de Arruda Souza

CICLO TÉRMICO MATEMÁTICO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO E INFLUÊNCIA NA MICROESTRUTURA FÍSICO-QUÍMICA



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Diego Kellermann Hurtado
Alfeu de Arruda Souza

Ciclo térmico matemático na soldagem a arco submerso e influência na microestrutura físico-química

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Hurtado, Diego Kellermann

H265C Ciclo térmico matemático na soldagem a arco submerso e influência na microestrutura físico-química

/ Diego Kellermann Hurtado. Alfeu de Arruda Souza. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2025

34 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1138

ISBN: 978-65-5367-648-0

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. soldagem 2. arco-submerso 3. ciclo-térmico I. Hurtado, Diego Kellermann II. Souza, Alfeu de Arruda III. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1138>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

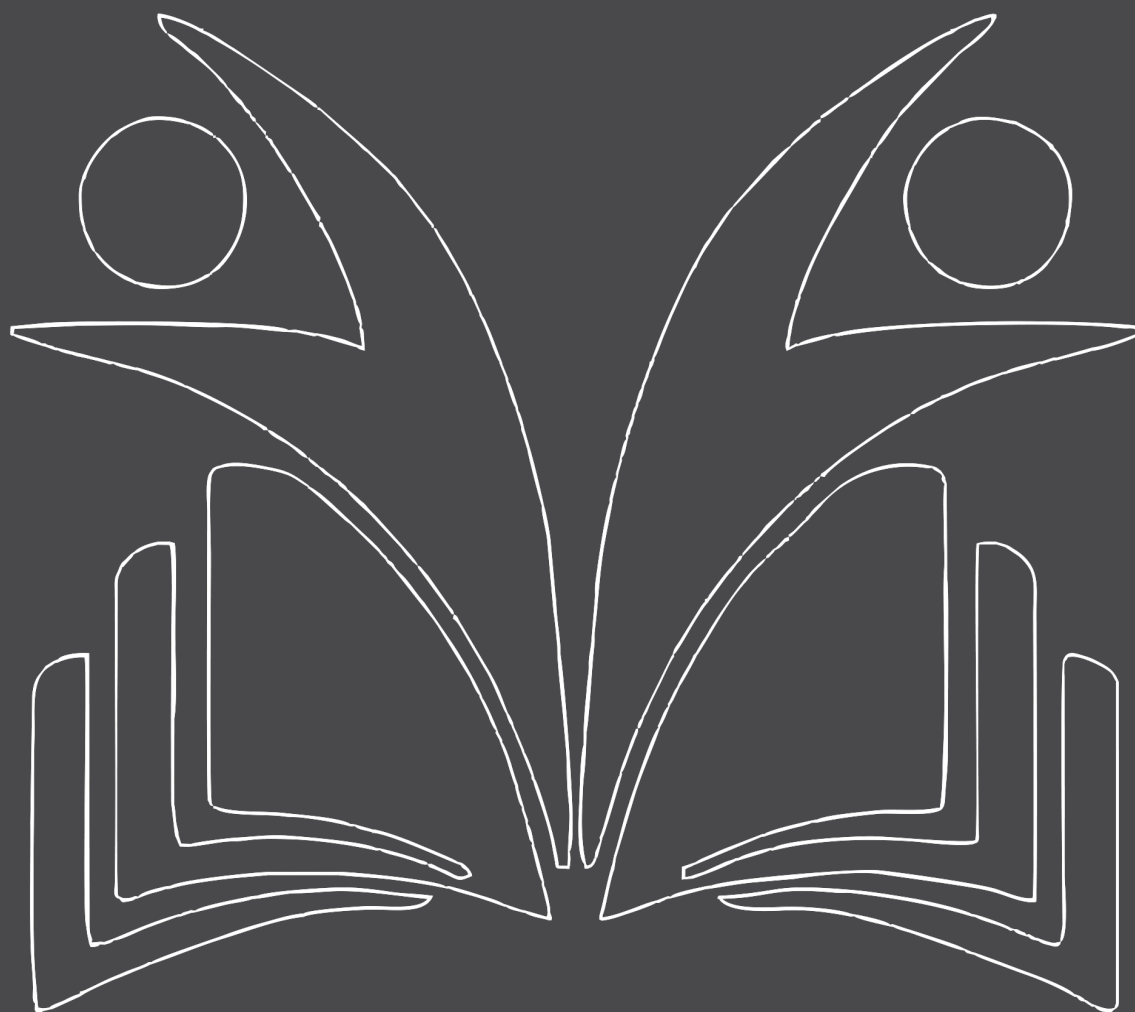
Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2025.edcl1138



Resumo: A soldagem é um processo de fabricação muito importante, pois além de ser considerada como um processo de união, muitos processos de soldagem são usados para deposição de material sobre uma superfície, objetivando recuperar peças desgastadas. Entre os vários processos de soldagem, destaca-se a soldagem a arco submerso, cujo emprego é bastante usado na soldagem de estruturas metálicas, vasos de pressão, estruturas pesadas, tubos, plantas químicas e na indústria naval. Este processo é de grande utilidade, pois apresenta elevada taxa de soldagem e deposição, soldas uniformes e de bom acabamento superficial. Neste trabalho, verificou-se a influência de resfriamento na microestrutura do cordão de solda empregando o processo a “arco submerso”. A verificação da velocidade de resfriamento da solda na faixa Δt_{35} foi medida com o emprego de termopares do tipo K, e comparada com o cálculo teórico. Os ensaios foram realizados em chapas de aço carbono ASTM A36 utilizando arame do tipo AWS EM12K de 3,2 mm e fluxo F7A2. Os resultados mostraram que existe uma pequena diferença entre as duas temperaturas, empírica e calculada, já que no cálculo teórico não é levado em consideração o isolamento pelo fluxo de proteção. Com relação a microestrutura, com menor aporte de energia, a estrutura se torna mais acicular.

Palavras-chave: Soldagem; arco submerso; ciclo térmico, microestrutura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamento básico para a soldagem a arco submerso	13
Figura 2 - Fluxo de calor tridimensional.	17
Figura 3 - Microestrutura do aço ASTM A36.	18
Figura 4 - Equipamento de solda utilizado.	19
Figura 5 - Desenho esquemático da chapa com as posições dos termopares.	21
Figura 6 - Chapa com o cordão de solda mostrando a fixação dos termopares.	22
Figura 7 - Gráfico obtido de forma empírica com o uso de termopares usando energia de 864 kJ/m.	24
Figura 8 - Gráfico obtido de forma empírica com o uso de termopares usando energia de 1170 kJ/m.	24
Figura 9 - Gráfico mostrando as curvas para soldagem de menor energia.	25
Figura 10 – Gráfico mostrando as curvas para a soldagem de maior energia.	26
Figura 11 - Microestrutura do cordão de solda para energia 1170 kJ/s.	27
Figura 12 - Microestrutura do cordão de solda para energia 864 kJ/s.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos de corrente para diferentes bitolas de eletrodos.	14
Tabela 2 - Composição química nominal do aço ASTM A36.	18
Tabela 3 - Parâmetros usado nas soldas.	19
Tabela 4 - Composição química nominal do arame eletrodo EM 12K	20
Tabela 5 - Composição química do fluxo F7A2.	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM *International Energy Agency* / Agência Internacional de Energia

AWS *American Welding Society* / Sociedade Americana de Soldagem

CCEN Corrente Elétrica com Eletrodo Negativo

CCEP Corrente Elétrica com Eletrodo Positivo

LASOMET Laboratório de Soldagem e Materiais

MAG *Metal Active Gas*/

MIG *Metal Inert Gas* /

SAW Soldagem a Arco Submerso

TIG Tungsten Inert Gas /

UFSM Universidade Federal de Santa Maria

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 CONTEXTO	9
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	9
1.3 OBJETIVOS	9
1.3.1 OBJETIVO GERAL	9
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.4 JUSTIFICATIVA.....	10
1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	10
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 SOLDAGEM	10
2.2 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO	12
2.2.1 EQUIPAMENTOS	12
2.2.2 CONSUMÍVEIS	13
2.2.2.1 ARAME-ELETRODO	13
2.2.2.2 FLUXOS	14
2.2.3 EFEITO DA CORRENTE ELÉTRICA NO ARCO SUBMERSO	15
2.2.4 EFEITO DA TENSÃO NO ARCO SUBMERSO	15
2.2.5 EFEITO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM	15
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM	15
2.3.1 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM SOLDAGEM	16
2.3.1.1 CONDUÇÃO DE CALOR EM CHAPAS GROSSAS	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 CHAPAS.....	18
3.2 EQUIPAMENTO DE SOLDA.....	19
3.3 TERMOPARES.....	20
3.4 CORPOS DE PROVA	22
3.5 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA.....	22

4 RESULTADOS E DISCUSÃO 23

4.1 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA 23

4.2 ANÁLISE MICROGRÁFICA 27

5. CONCLUSÕES 28

REFERÊNCIAS 30

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Graças ao processo de união de materiais, a indústria aumentou consideravelmente a variedade e a qualidade de seus produtos, tais como: bicicletas, automóveis, veículos ferroviários, navios, pontes, edificações, componentes eletrônicos, entre outros.

A união de materiais surgiu na antiguidade com a finalidade de construir armas para a sobrevivência humana. Porém, foi a partir da idade média que este processo foi aperfeiçoado e utilizado em larga escala, para a fabricação de armas, veículos de guerra e aviões (MACHADO, 1996).

Denomina-se solda o resultado da união de materiais. Essa união pode ser feita através da fusão dos mesmos, em contato, fusão de ambos com adição de outro material, ou por contato desses materiais, nas fases sólida ou semi-sólida.

O aperfeiçoamento desta técnica é de fundamental importância para a melhoria da qualidade das juntas soldadas, união de materiais difíceis de serem soldados e aumento da segurança em soldas de responsabilidade como: união de vasos de pressão, estruturas metálicas e tanques.

A área de atuação da soldagem são os metais e suas ligas, devido a sua vasta versatilidade e economia. Entre os principais processos convencionais de soldagem, destacam-se: soldagem com eletrodo revestido, soldagem por arco submerso, soldagem MIG/MAG, soldagem TIG, soldagem Oxiacetilênica e soldagem por ponto.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Tendo em vista a importância do processo de resfriamento da junta soldada, qual a sua influência na microestrutura do cordão de solda?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho objetiva a obtenção do ciclo térmico e a influência da taxa de resfriamento na microestrutura do cordão de solda, empregando o processo a arco submerso para chapas espessas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

É objetivo de este trabalho obter o ciclo térmico e analisar a velocidade de resfriamento do cordão de solda, com o auxílio de termopares do tipo K, e comparar com cálculos teóricos.

1.4 JUSTIFICATIVA

O grande crescimento industrial do século XXI exige da indústria alta produção, produtos com preços competitivos e alta qualidade. Para atender esses requisitos, as indústrias que operam com o processo de soldagem, devem investir em estudos que visam à melhoria deste processo. Um processo que apresenta alta produtividade e qualidade é a soldagem com arco submerso. Por este motivo, o presente trabalho visa um estudo do ciclo térmico de duas energias de soldagem e sua influência no resfriamento da região soldada por este processo.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho limita-se a verificar o ciclo térmico e a influência do resfriamento na microestrutura do cordão de solda, na faixa de Δt (500 – 300)°C, empregando o processo a arco submerso. O ensaio será feito em chapas de aço carbono ASTM A36, utilizando arame do tipo AWS EM12K de 3,2 mm de diâmetro.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é dividida em cinco partes principais: revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e conclusão.

A revisão bibliográfica aborda os conceitos fundamentais necessários para o entendimento do trabalho, tais como, soldagem, soldagem com arco submerso e transferência de calor na soldagem.

Na parte de materiais e métodos descreve a forma como foi feito o ensaio, equipamentos utilizados, materiais empregados e características destes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho abordam-se os fundamentos da soldagem e transferência de calor.

2.1 SOLDAGEM

De acordo com *American Welding Society*, AWS (1997), a soldagem é definida como sendo o processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida

por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição. Houldcroft (Apud Wainer et al. 1992) cita que os processos de soldagem devem preencher os seguintes requisitos:

- a) Proporcionar certa quantidade de energia capaz de unir dois materiais;
- b) Retirar contaminações das superfícies a serem unidas;
- c) Evitar que o ar atmosférico contamine a região durando a soldagem.

A fim de obter-se uma solda de boa qualidade, esses três requisitos, mínimos, devem ser atendidos.

Entre os processos convencionais de soldagem podemos citar:

- a) Soldagem a arco com eletrodo revestido: O arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo revestido consumível e a peça, estabelecendo, assim, a poça de fusão.
- b) Soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo consumível (MIG/MAG): O arco elétrico é formado entre a peça e um eletrodo maciço nu consumível, continuamente alimentado. A região da poça de fusão é protegida por um gás, ou mistura de gases, ativos ou inertes. Caso o gás for ativo denomina-se MAG. Se o gás for inerte, denomina-se MIG.
- c) Soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo não consumível (TIG): É gerado um arco elétrico entre a peça a ser soldada e um eletrodo não consumível de tungstênio puro ou ligado. A poça de fusão é protegida por um gás inerte (geralmente argônio).
- d) Soldagem Oxiacetilênica: Processo onde a fusão é devido ao aquecimento produzido por uma chama. Pode-ser usar ou não metal de adição. Este processo já teve grande importância industrial no passado. Atualmente, estão sendo empregados outros processos mais produtivos.
- e) Soldagem por ponto: A soldagem é feita com a passagem de corrente elétrica e com pressão. A fusão é devida ao aquecimento provocado pelo efeito joule.
- f) Soldagem por arco submerso: A soldagem é devido ao calor gerado pelo arco elétrico formado entre um eletrodo nu, alimentado continuamente e a peça a ser soldada. A poça de fusão é recoberta por uma camada de fluxo granular, que protege o metal da contaminação atmosférica.

Este último processo será usado no experimento deste trabalho. No próximo capítulo será apresentado este processo.

2.2 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Processo desenvolvido em torno de 1935, o qual revolucionou os conceitos de produtividade existentes na época, sendo largamente utilizado até hoje.

Segundo ESAB (2004), a soldagem a arco submerso (SAS), também conhecido como SAW (*submerged arc welding*), é um processo no qual o calor necessário para fundir o metal é gerado por um arco elétrico formado entre a peça de trabalho e o arame, continuamente alimentado. Estes dois últimos são recobertos por uma camada de fluxo (material mineral granulado). Desta maneira, neste processo, não há formação de arco visível, faíscas, respingos e fumos. O fluxo protege a poça da contaminação atmosférica, retira impurezas do metal fundido, através de reações químicas com o mesmo, além de adicionar elementos de liga, além disso funciona como isolante térmico. A seguir são apresentadas algumas características deste processo.

- a) É empregado intensidade de corrente de até 2000 A, proporcionando alto rendimento térmico (próximo de 100%);
- b) Alta taxa de deposição, até 20 kg/h, com um único arame;
- c) Elevada penetração, não sendo recomendado para soldar espessuras menores do que 6 mm;
- d) Materiais soldados: praticamente todos os metais ferrosos e alguns não-ferrosos, incluindo revestimentos protetores; ligas de níquel cobre;
- e) Processo pode ser automático ou semi-automático.

2.2.1 EQUIPAMENTOS

O equipamento básico para a soldagem a arco submerso consiste de: uma fonte energia, uma tocha de soldagem, um alimentador de arame, um sistema de controle, um tubo de alimentação do fluxo, cabos elétricos, e uma garra para a fixação do cabo a peça. Estes equipamentos são apresentados na Figura 1.

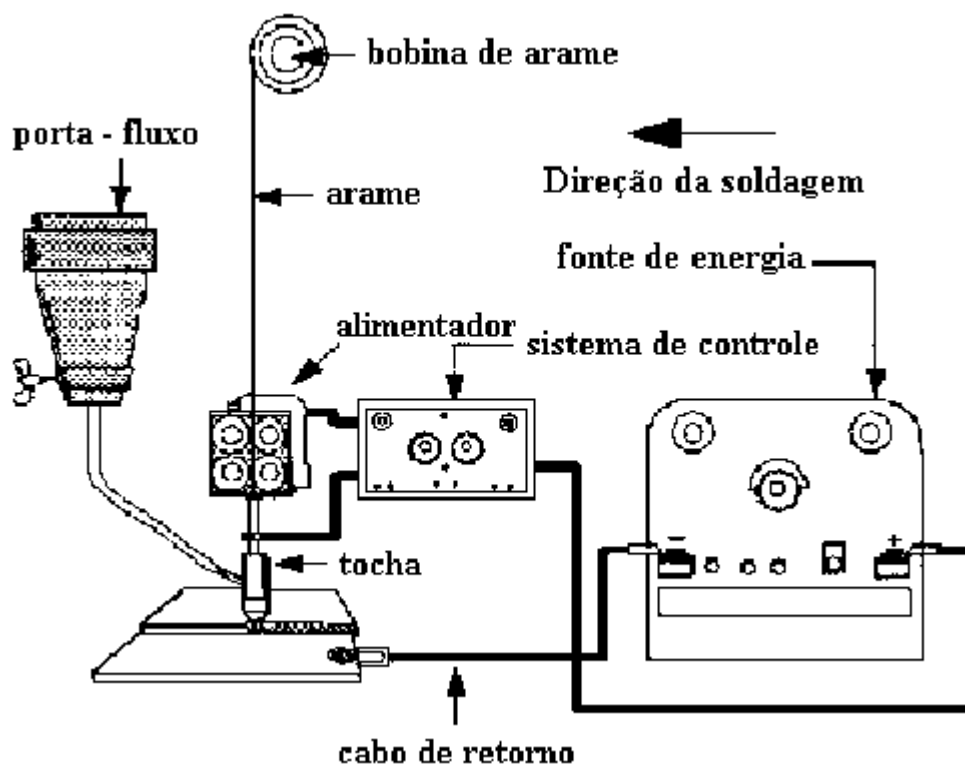


Figura 1 - Equipamento básico para a soldagem a arco submerso. Fonte: Infosolda (2001)

2.2.2 CONSUMÍVEIS

Os consumíveis no processo de soldagem a arco submerso resumem-se em: fluxo e arame eletrodo. Os bocais e bicos de contato apresentam pequeno consumo, por isso não serão abrangidos. A combinação arame-fluxo tem influência nas propriedades mecânicas e/ou na composição química requerida para o metal depositado.

2.2.2.1 ARAME-ELETRODO

É fornecido na forma de carretéis ou bobinas, geralmente com peso variando entre 10 e 200 kg, com diferentes diâmetros, variando de acordo com o tipo e a quantidade de solda a realizar. De acordo com Machado (1996), os arames fabricados em aço carbono e baixa liga são geralmente recobertos com um fino revestimento de cobre. Esse revestimento tem as seguintes funções: facilita o contato elétrico, diminui o desgaste do tubo de contato e aumenta a resistência à corrosão do arame.

O diâmetro mais recomendado para o arame é determinado pelas especificações e varia de acordo com a bitola e o material do mesmo (MACHADO, 1996). A Tabela 1 apresenta os diâmetros recomendados em função da corrente.

Tabela 1 - Intervalos de corrente para diferentes bitolas de eletrodos. Fonte: Machado (1996).

Diâmetro (mm)	Intervalo de Corrente (A)	Diâmetro (mm)	Intervalo de Corrente (A)
1,6	150-400	4,0	400-1000
2,0	200-600	4,8	500-1100
2,4	250-700	5,6	600-1200
3,2	300-900	6,4	700-1600

2.2.2.2 FLUXOS

De acordo com Vilchez (2005), os fluxos possuem várias funções no processo de soldagem a arco submerso, entre as mais importantes, podemos citar: estabilizar o arco, fornecer elementos de liga para o cordão de solda, evitar a contaminação da atmosfera no arco e no metal aquecido, evitar impurezas no cordão de solda e formar escória.

Conforme a norma AWS A5.23 (1997), os fluxos podem ser classificados, de acordo com o método de fabricação, como: fundidos, aglomerados e misturados.

Os fluxos mais usados são: aglomerados ou fundidos. Os aglomerados são constituídos, Segundo Wainer (1996), de compostos minerais moídos, como óxidos de manganês, silício, alumínio, entre outros. Além disso, é adicionado um agente aglomerando, geralmente, potássio ou silicato de sódio. Constituídos dos mesmos compostos minerais, os fluxos tem seus ingredientes fundidos em forno, resfriado, e reduzido em partículas granulares.

Quanto as suas características químicas, os fluxos podem ser classificados como: ácidos, neutros ou básicos (VILCHEZ, 2005). Esta classificação baseia-se na quantidade relativa de óxidos básicos e óxidos ácidos contidos no fluxo. De uma maneira geral, os fluxos de maior basicidade tendem a reduzir os teores de oxigênio, enxofre e fósforo no metal depositado, desta maneira, melhoram as propriedades mecânicas, especialmente, a resistência a fratura frágil.

A última especificação refere-se à capacidade de alterar a composição química do cordão de solda, sendo classificado como: ativo ou neutro. O fluxo ativo possui capacidade de transferir quantidades significativas de um ou mais elementos de liga para a poça de fusão, tendo participação efetiva no

material depositado. Por esse motivo, deve-se haver rigor no controle dos parâmetros de soldagem a fim de evitar alterações não desejáveis na composição química do material depositado.

2.2.3 EFEITO DA CORRENTE ELÉTRICA NO ARCO SUBMERSO

A corrente elétrica influencia diretamente na taxa de deposição, profundidade de penetração da poça de solda, e a quantidade de metal de base fundido. O processo opera com qualquer tipo de corrente. De acordo com Machado (1996), o uso de corrente contínua com eletrodo positivo, CCEP, é indicado para solda de grande penetração e alta velocidade. A corrente contínua com eletrodo negativo, CCEN, oferece uma taxa de deposição cerca de 1/3 maior do que com a CCEP, mas com menor penetração e aumento da tensão.

2.2.4 EFEITO DA TENSÃO NO ARCO SUBMERSO

Parâmetro responsável pela largura do cordão de solda. Mantidas as outras condições inalteradas, um aumento da tensão produz cordão mais largo e plano, aumento do consumo de fluxo, diminuição da porosidade causada por oxidação ou carepa sobre a superfície da chapa e aumenta a transferência de elementos de liga, quando se usa fluxos ligados (MACHADO, 1996). O uso de tensão elevada produzirá um cordão na forma de “chapéu” que é susceptível a trincas e dificuldade na remoção da escória.

2.2.5 EFEITO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM

Mantendo os outros parâmetros constantes, o aumento da velocidade de soldagem provoca uma redução das dimensões do cordão de solda. Uma velocidade excessivamente baixa produz cordões com muito reforço, poça de solda muito grande em torno do arco elétrico, porosidade e respingos.

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

De acordo com Vasconcelos (2009), a soldagem por fusão é responsável pelo aparecimento de ciclos térmicos que produzem profundas mudanças no material a ser soldado e são de grande importância na formação de diferentes tipos de microestrutura neste material. Essas microestruturas têm grande influência nas propriedades mecânicas do material, por isso elas vão ser analisadas posteriormente neste trabalho.

Alguns fatores devem ser considerados no estudo da transferência de calor em juntas soldadas como:

- Rendimento térmico do arco elétrico;
- Distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem;

- Velocidade de resfriamento da região soldada.

2.3.1 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM SOLDAGEM

É de fundamental importância o conhecimento dos ciclos térmicos que o material soldado é submetido, porque eles influenciam diretamente a estrutura cristalina do material e, portanto nas propriedades finais deles.

O ciclo térmico é a variação da temperatura com o tempo num dado ponto da peça que esta sendo soldada.

Segundo Suzuki (1996), os aços estão sujeitos a crescimento de grão, quando o tempo de permanência em altas temperaturas for grande, e, além disso, processo de têmpera caso a taxa de resfriamento seja elevada.

A condução de calor através de um sólido no domínio do tempo t e referido a um sistema cartesiano triortogonal (x,y,z) pode ser expresso pela equação (WAINER, 1996):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0 \quad (1)$$

Onde:

T = Variável representando a temperatura (°C)

t = Tempo (s)

x,y,z = coordenadas cartesianas triortogonais (mm)

λ_t = Condutividade térmica do material, depende da temperatura (J/m.s.K)

ρ = densidade do material (g/mm³)

q_0 = fonte ou sorvedouro de calor (J/s.mm³)

No caso específico da soldagem pode-se considerar, para efeitos práticos, a inexistência de fontes ou sorvedouros no interior do material ($q_0 = 0$), a condutividade térmica deste como sendo constante ($\lambda_t = \lambda$), substituindo na equação (1) fica:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde a expressão $\lambda/\rho = k$ é denominada difusividade térmica do material (mm²/s).

A equação (2) é conhecida como equação básica de Fourier que é utilizada para estudar os fenômenos térmicos que têm lugar durante a soldagem.

2.3.1.1 CONDUÇÃO DE CALOR EM CHAPAS GROSSAS

No caso de chapas grossas, o problema consiste em encontrar a solução da equação de Fourier para o caso tridimensional, quando uma fonte móvel de calor se desloca sobre a chapa. A Figura 2 abaixo mostra o fluxo de calor de uma chapa soldada.

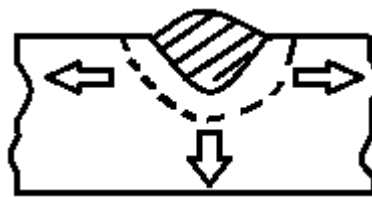


Figura 2 - Fluxo de calor tridimensional.

Resolvendo a equação diferencial (2), chega-se a equação simplificada para o caso de fluxo tridimensional.

$$T - T_0 = \frac{E}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \quad (1)$$

Onde:

y = distância da fonte de calor (mm)

E = energia de soldagem, definida como:

$$E = \frac{VI}{v} n \quad (4) \quad (1)$$

Onde:

V = tensão de soldagem (V)

I = corrente de soldagem (A)

v = velocidade de soldagem (m/s)

n = rendimento do processo (0,90 a 0,99)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A realização do ensaio foi feita no laboratório de soldagem e materiais (LASOMET) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.1 CHAPAS

Para a realização da soldagem, foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A36 de 19,05 mm de espessura, cortadas nas dimensões de 70 x 250 mm.

A Tabela 2 abaixo mostra a composição química nominal do aço estrutural ASTM A36.

Tabela 2 - Composição química nominal do aço ASTM A36. Fonte: CBCA (2010).

Elemento químico	Composição máxima (%)
C	0,26
P	0,04
S	0,05
Si	0,4

A Figura 3 mostra a microestrutura do metal de base. Trata-se de um aço carbono composto de ferrita e perlita.

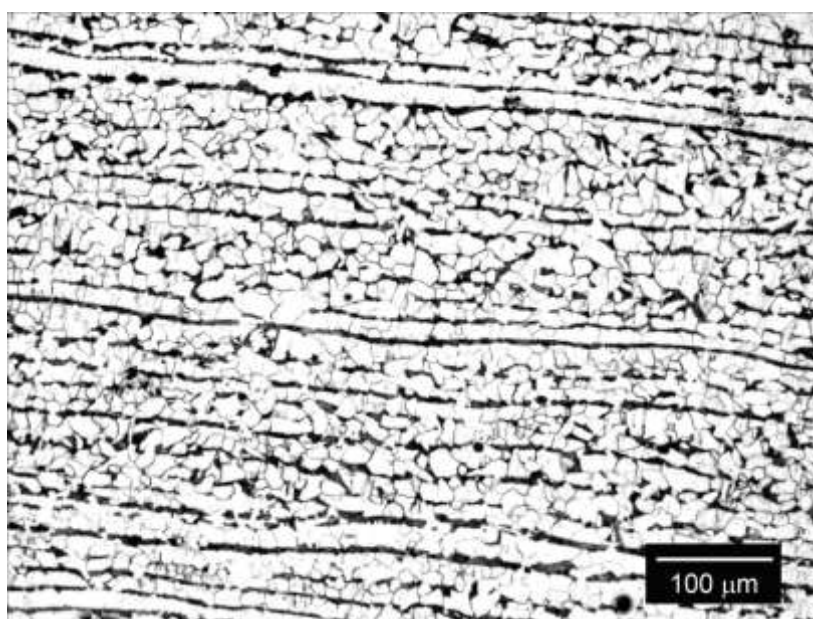


Figura 3 - Microestrutura do aço ASTM A36.

3.2 EQUIPAMENTO DE SOLDA

O equipamento de soldagem a arco submerso utilizado foi o modelo MZZK-1000A da marca KEYUE. Este equipamento foi ajustado com as seguintes características:

- Polaridade inversa (CC+);
- Altura da tocha em relação à peça: 15 mm para todos os cordões realizados;
- Velocidade constante de avanço da tocha: 60 cm/min para todas as soldas.
- Arame de solda com 3,2 mm de diâmetro.

Foi realizada a soldagem tipo cordão depositado (*bead-on-plate*) com os seguintes parâmetros, de acordo com a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Parâmetros usado nas soldas.

	Soldagem de maior energia	Soldagem de menor energia
Tensão	26	24
Corrente	500	400

A Figura 4 mostra o equipamento empregado na soldagem.



Figura 4 - Equipamento de solda utilizado.

O arame de solda utilizado e o fluxo utilizado são normalizados pela AWS A5.23 e classificados respectivamente como: EM 12K e F7A2. Eles têm influência nas propriedades mecânicas e/ou na composição química requerida para o metal depositado.

A Tabela 4 abaixo mostra a composição química nominal do arame EM 12K.

Tabela 4 - Composição química nominal do arame eletrodo EM 12K. Fonte: Norma AWSA5.23.

Elemento químico	Composição (%)
C	0,05 – 0,15
Si	0,10 – 0,35
Mn	0,80 – 1,25
Cu	0,35

O fluxo F7A2 é do tipo aglomerado, neutro semi-básico, utilizado em chapas de aço carbono e de baixa liga. Apresenta uma boa remoção de escória e ótima aparência do cordão de solda. A Tabela 4 apresenta a composição química do fluxo segundo a norma AWS A5.23.

Tabela 5 - Composição química do fluxo F7A2. Fonte: Norma AWSA5.23.

Elemento químico	Composição (%)
C	0,04
Si	0,5
Mn	1,3
Cu	0,08

3.3 TERMOPARES

Para a medição da temperatura foi usado termopares do tipo K. Este tipo de termopar é constituído por dois elementos de liga: cromel (Ni90%Cr10%) e alumel (Ni95%Mn2%Si1%Al12%), neste caso, o terminal positivo é o cromel e o negativo alumel.

Foram utilizados três termopares que foram soldados na superfície da chapa a distâncias do centro do cordão de solda de: 9,5, 14,5 e 24,5 mm para o caso de menor energia e 11, 16, 26 mm para a maior energia, colocados perpendicularmente ao cordão de solda. Esta distância foi determinada experimentalmente para que os termopares ficassem dentro e fora da ZAC.

A Figura 5 abaixo esquematicamente onde os termopares foram fixados na chapa e suas respectivas distâncias para o caso de menor energia.

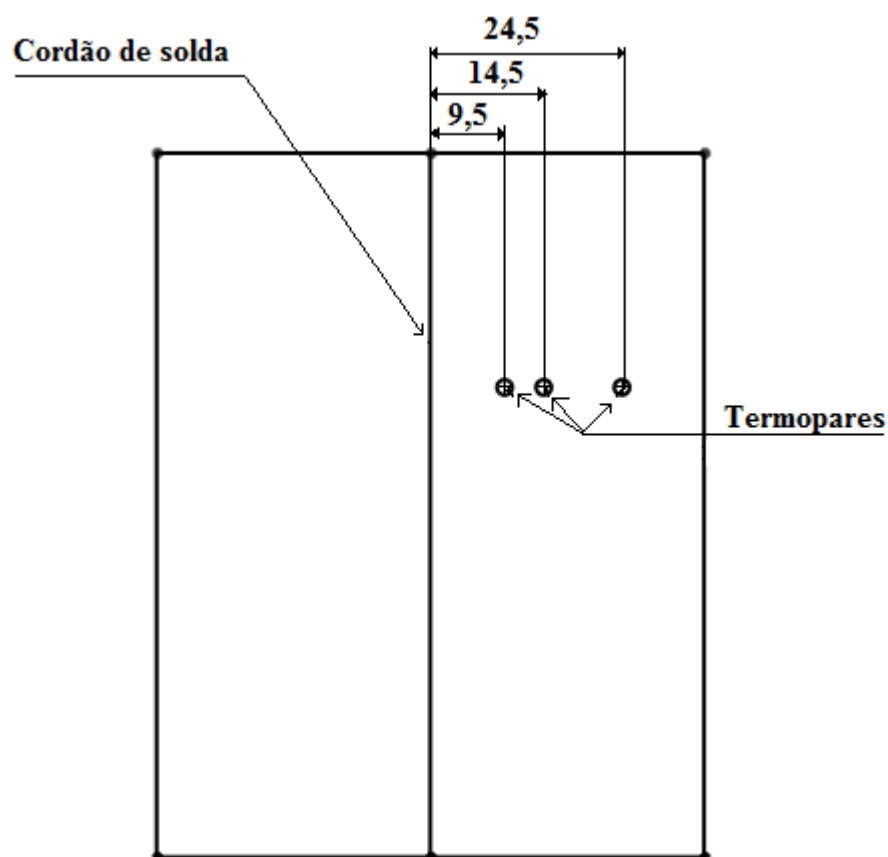


Figura 5 - Desenho esquemático da chapa com as posições dos termopares.

A Figura 5 abaixo mostra a posição dos termopares fixados na chapa, após a soldagem e limpeza do cordão de solda.

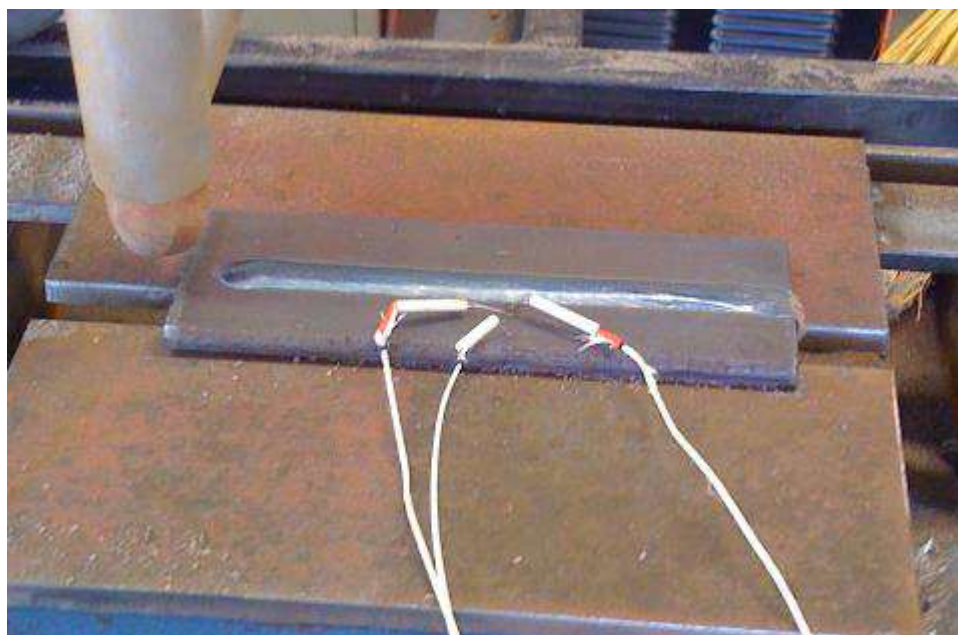


Figura 6 - Chapa com o cordão de solda mostrando a fixação dos termopares.

3.4 CORPOS DE PROVA

Para realizar a análise microestrutural as chapas foram cortadas para a obtenção dos corpos de prova, lixadas com a seguinte sequencia de lixas: 80, 120, 240, 340, 400, 1200 e 1500. Posteriormente, foram polidas em alumina 1 μm e, finalmente, para a preparação da análise as amostras foram atacadas com Nital 3% (ácido nítrico 3% em água destilada).

3.5 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

Após a soldagem de acordo com os parâmetros citados, foram plotados gráficos com a distribuição de temperatura da chapa soldada. Esses gráficos foram obtidos experimentalmente, através do *software* de aquisição de dados dos termopares, e teoricamente, com a equação 3.

$$T - T_0 = \frac{E}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \quad (3)$$

Para chapas de aço carbono, considera-se:

$$a = 9,1 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$$

$$\lambda = 41,0 \text{ (J/m.s.k)}$$

t = tempos do início até a diminuição da temperatura de 300°C.

A distância do cordão de solda foi considerada para dois casos: 9,5 e 11 mm, onde estavam inseridos os termopares.

Com os parâmetros de soldagem para o caso de menor energia, de acordo com a equação (4) temos:

$$E = \frac{VI}{v} n \quad (4)$$

Para todas as soldas foi considerado o rendimento de 0,99.

$$E = \frac{24 * 400}{0,01} * 0,99$$

$$E = 864 \text{ kJ/m}$$

Em ambos os casos, menor energia e maior energia, foram considerados intervalos de tempo de 0,1 s (eixo das abscissas) e a temperatura no eixo das ordenadas em °C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, as curvas obtidas de forma experimental para as energias de 864 e 1170 kJ/m.

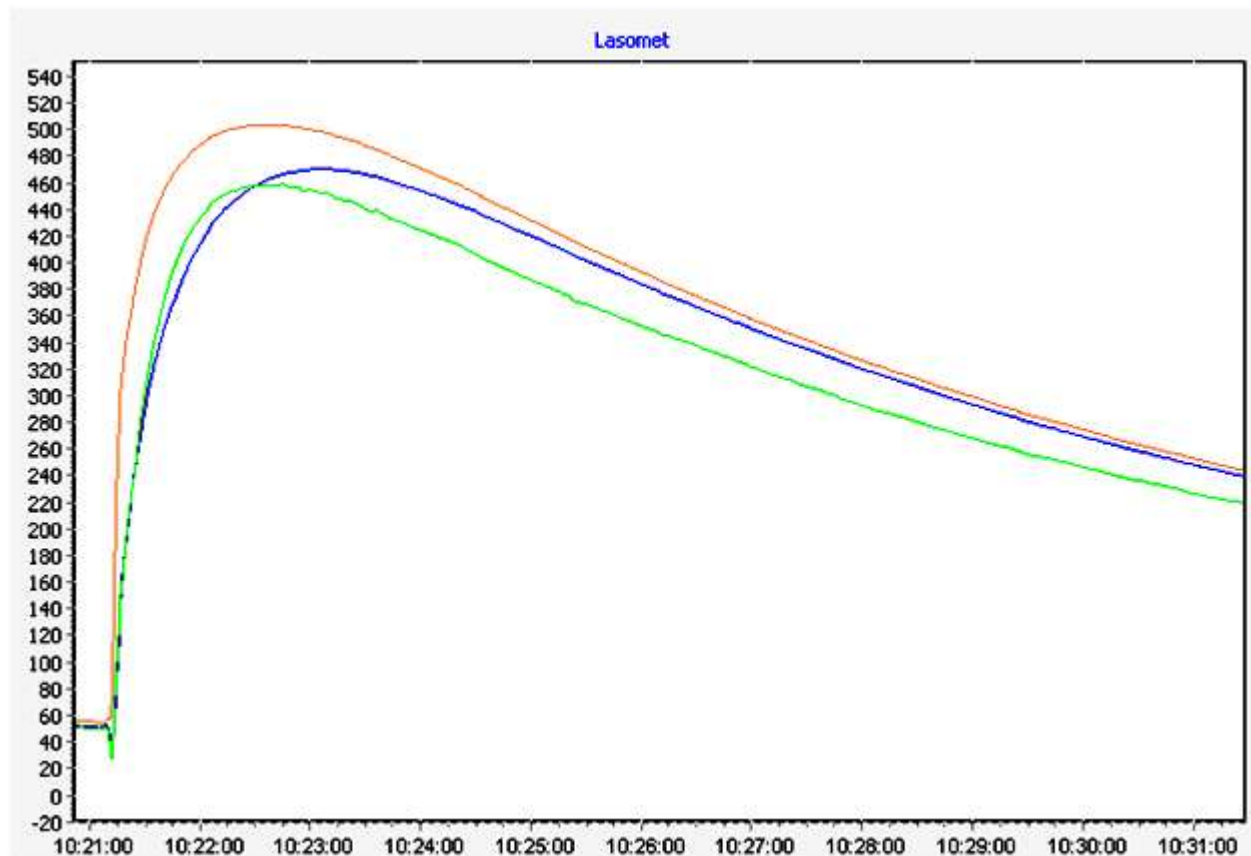


Figura 7 - Gráfico obtido de forma empírica com o uso de termopares usando energia de 864 kJ/m.

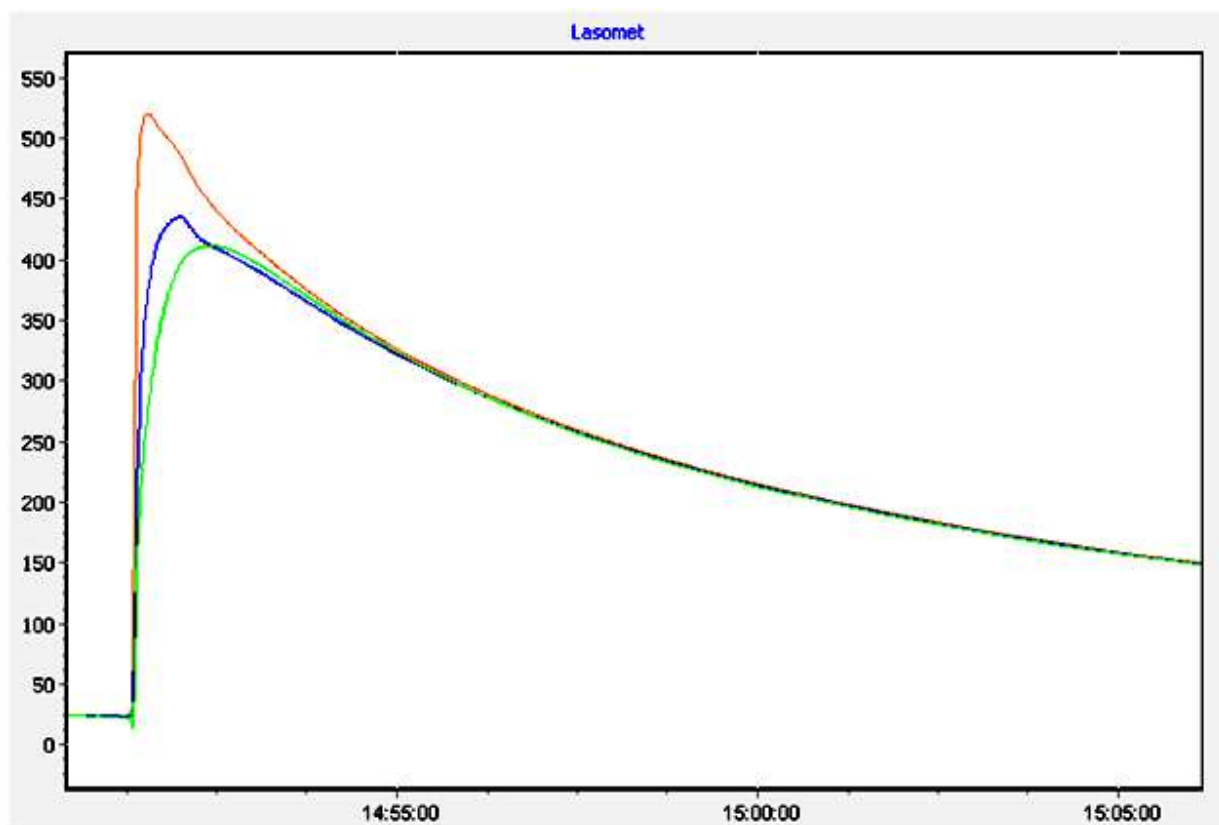


Figura 8 - Gráfico obtido de forma empírica com o uso de termopares usando energia de 1170 kJ/m.

Observa-se uma diferença entre as curvas por causa da escala regulada no software ser diferente.

A Figura 8 mostra a curva obtida na soldagem, considerando somente aquela em que o termopar foi fixado mais próximo do cordão, na zona afetada pelo calor, com menor energia, e distância do centro do cordão de solda de 9,5 mm. A curva em vermelho mostra a distribuição de temperatura experimental e a curva em preto mostra a distribuição de temperatura obtida com a equação 3.

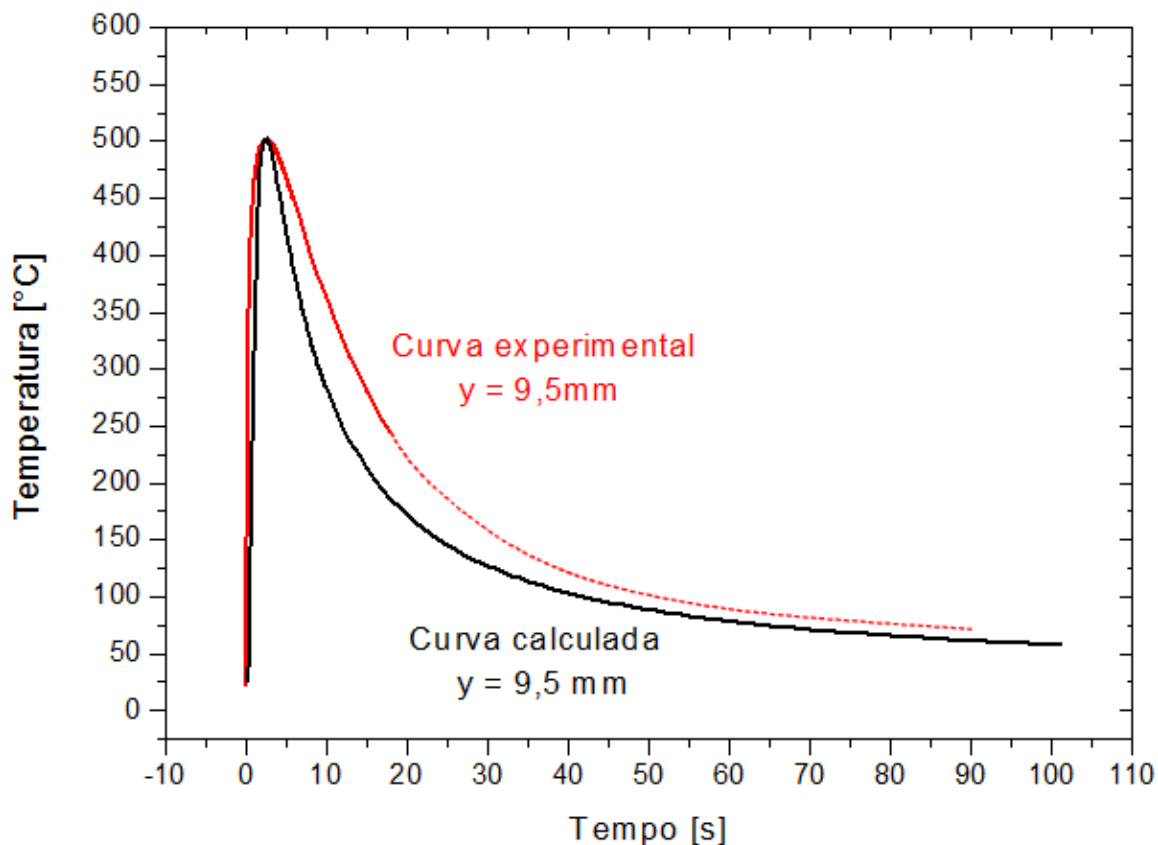


Figura 9 - Gráfico mostrando as curvas para soldagem de menor energia.

A curva experimental foi adaptada para a mesma escala empregada para o cálculo teórico. Como pode ser observada na figura, a superposição entre ambas as curvas são bastante coincidentes. Isto pode ser atribuído ao aporte menor de energia que elevou a temperatura na ZAC e proporcionou uma retirada de calor bastante rápida pela chapa, não havendo uma influência muito grande de isolamento térmico pelo fluxo de proteção.

A Figura 10 mostra as curvas obtidas com os parâmetros de maior energia, com o termopar na distância de 11 mm do centro do cordão de solda.

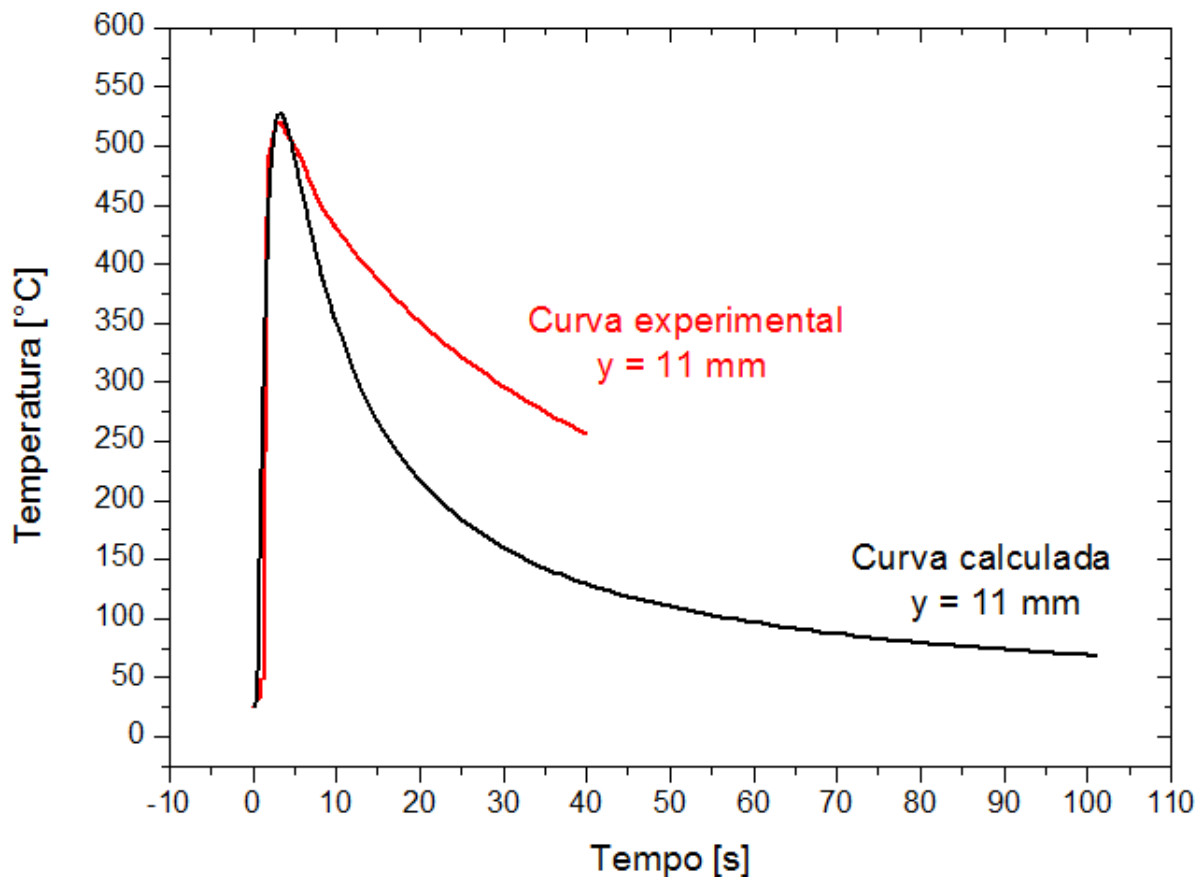


Figura 10 – Gráfico mostrando as curvas para a soldagem de maior energia.

Como pode ser visto na figura, o aquecimento entre as curvas experimental e calculada foi coincidente, mas no resfriamento, devido ao maior aquecimento, a curva experimental mostra uma diferença acentuada, o que leva a crer que o fluxo funcionou como isolante térmico.

A taxa de resfriamento foi calculada empregando a equação (4), Machado (2000).

$$-\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\pi k}{E} (Tr - To)^2 \quad (1)$$

Onde:

k = condutividade térmica (para aços carbono, 41 J/m.s.K)

Tr = Temperatura crítica desejada (neste trabalho 300°C e 500°C)

To = Temperatura ambiente (20°C)

E = Energia de soldagem

Para a energia de 864 kJ/m a 500°C, a taxa de resfriamento calculada foi de - 68,7°C/s, e para a temperatura de 300°C, - 23,3°C/s.

Para a energia de 1170 kJ/m a 500°C, a taxa de resfriamento calculada foi de - 50,7°C/s, e para a temperatura de 300°C, - 17,2°C/s.

Isto mostra a diferença no grau de resfriamento entre os aportes de menor ou menor energia. Esta diferença no resfriamento influencia diretamente na microestrutura obtida nos cordões de solda.

4.2 ANÁLISE MICROGRÁFICA

As microestruturas mostradas nas Figuras 11 e 12 correspondem aos cordões de solda efetuados com os aportes de energia utilizados nos experimentos. A Figura 11 mostra a microestrutura do aço soldado com a energia de 1170 kJ/s. Esta é composta de ferrita de contorno de grão e a presença, em menor proporção, de ferrita acicular.

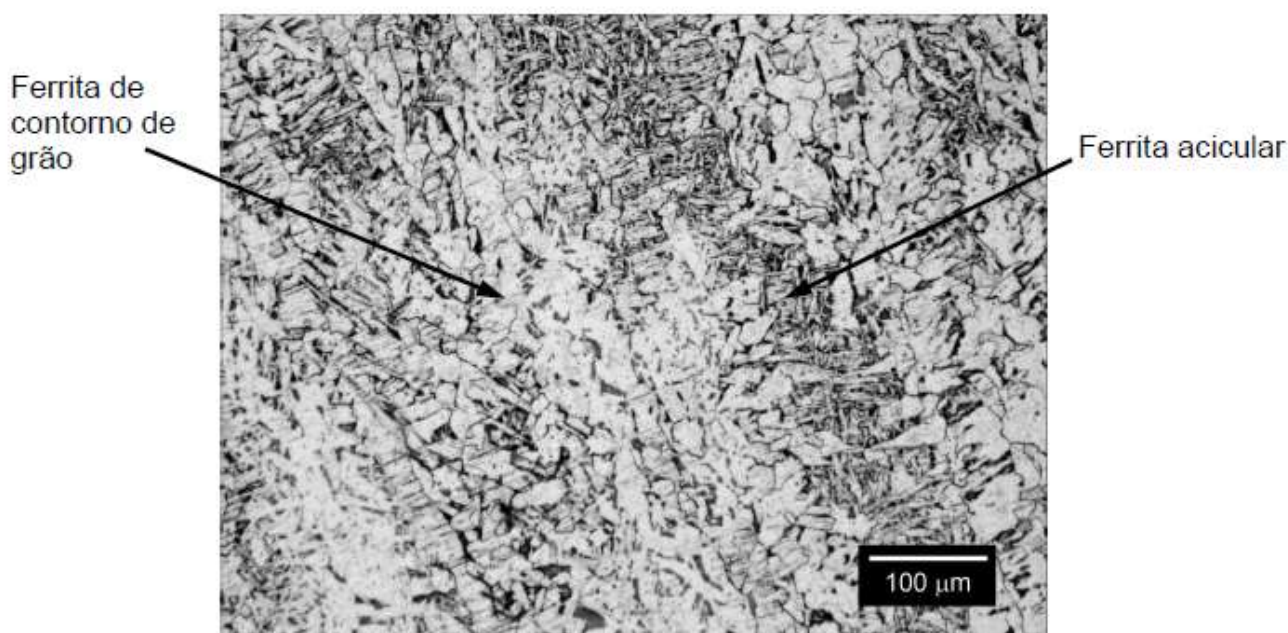


Figura 11 - Microestrutura do cordão de solda para energia 1170 kJ/s.

Na Figura 12 nota-se uma modificação da microestrutura em que ocorre o aumento da presença de ferrita acicular o que melhoraria as propriedades da solda.

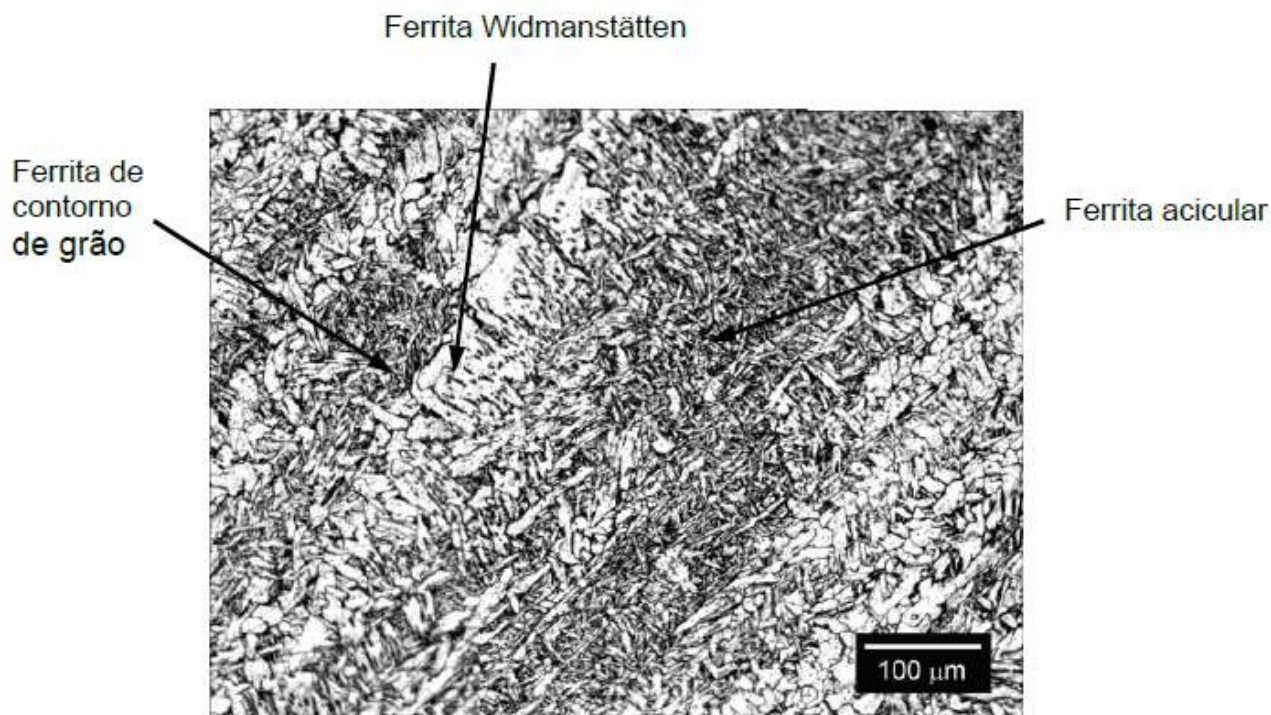


Figura 12 - Microestrutura do cordão de solda para energia 864 kJ/s.

Pelas fotomicrografias, verifica-se que quanto maior a velocidade de resfriamento nas temperaturas críticas de 300°C e 500°C, melhor o tipo de estrutura obtida no caso da soldagem do aço carbono ASTM A36.

5. CONCLUSÕES

Os gráficos obtidos experimentalmente e teoricamente do ciclo térmico apresentados neste trabalho mostram a concordância entre ambos. Durante o aquecimento da chapa devido ao calor fornecido da soldagem, as curvas experimentais e teóricas são praticamente coincidentes. Porém durante o resfriamento da chapa, verifica-se o tombamento da curva teórica mais rapidamente, significando um resfriamento mais rápido. Estes resultados são devidos ao desenvolvimento das equações teóricas que não consideraram a presença do fluxo, no caso do arco submerso, que ocasionaria a diminuição da retirada de calor da peças durante o resfriamento.

Para o caso de maior aporte de energia, o aquecimento na região da ZAC aumenta, não em temperatura, mas na quantidade, o que demora mais para resfriar. Além disso, o fluxo fica cobrindo toda a região da solda, ZAC e parte da peça sendo soldada, o que impede a retirada rápida do calor.

Em relação à microestrutura, verificou-se que as melhores propriedades foram obtidas para o caso de menor energia (864 kJ/m), pois esta apresentou uma taxa de resfriamento maior nas temperaturas

críticas de 300°C e 500°C, o que ocasionou maior formação da acicular. Desta forma, na soldagem de chapas espessas, seria melhor efetuar vários passes com menor aporte de energia do que a soldagem em poucos passes, já que a microestrutura ficaria otimizada.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. Norma A5.23. Specification For Low Alloy Steel Electrodes And Fluxes For Submerged Arc Welding. 1997.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Disponível em: <http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acos_estruturais.asp> Acesso em: 10 de agosto 2011

FORTES, C. ; ESAB. Arco Submerso. Apostila técnica. Disponível em <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901100rev0_ApostilaArcoSubmerso.pdf> Acesso em 14 de agosto 2010.

Gimenes Jr, L., Ramalho J.P. Processo de soldagem por arco submerso. INFOSOLDA, o Portal Brasileiro da Soldagem. Disponível em: < http://www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=d&i=129>. Acesso em 5 jun. 2011.

MACHADO, IVAN GUERRA. Soldagem & técnicas conexas: processos. Porto Alegre, 1996.

MACHADO, IVAN GUERRA. Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações. Porto Alegre, 2000.

SUZUKI, R. N. Solução analítica para distribuição de temperatura no processo de soldagem MIG com múltiplos passes. 1996. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Biblioteca Central, Editora da UFSM. Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses: MDT. 7 ed. rev. e atual. Santa Maria: Editora UFSM, 2010. 72p.

VASCONCELOS, R.C., MACIEL, T.M., GURGEL, J.M.A.M. Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v4.1 (2009) 01-13 ISSN 1809-8797, 2009. Disponível em: < <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/download/69/107>>. Acesso em: 14 maio 2011.

VILCHEZ, C. A. Z. Influência de ciclos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas da junta soldada do aço COS civil 300. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. Soldagem - processos e metalurgia. 5.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

Diego Kellermann Hurtado
Alfeu de Arruda Souza

CICLO TÉRMICO MATEMÁTICO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO E INFLUÊNCIA NA MICROESTRUTURA FÍSICO-QUÍMICA



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE