

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ASPECTOS TÉRMICOS NA SOLDAGEM MOLHADA¹

Vitor Eboli Lopes Paiva²
Valter Rocha dos Santos³
Mauricio de Jesus Monteiro⁴

Resumo

A soldagem molhada é uma das técnicas empregadas em reparos de partes submersas de estruturas marítimas de produção de petróleo. Um de seus maiores problemas é o controle da velocidade de resfriamento. Os modelos térmicos utilizados na soldagem atmosférica não se aplicam diretamente na soldagem molhada. O presente trabalho tem como principal objetivo modelar a transferência de calor na solda molhada determinando a distribuição das temperaturas máximas e as velocidades de resfriamento. São modelados o aporte de calor e os fenômenos de transferência de calor provocados pelo contato direto com a água. O modelo permite determinar a distribuição geométrica da temperatura na junta soldada e a velocidade de resfriamento. Obtêm-se, ainda, as isotermas e o tempo de resfriamento entre duas temperaturas escolhidas. Os valores obtidos foram comparados com alguns dados experimentais colhidos na literatura. Foi observada uma razoável concordância entre as simulações realizadas e os resultados experimentais consultados. Também foi implementado um algoritmo computacional em MATLAB® que realiza a modelagem computacional. Experimentos específicos estão previstos para a validação do modelo.

Palavras-chave: Soldagem Molhada; Transferência de calor; Modelagem computacional; Tempo de resfriamento

COMPUTER MODELLING OF THE THERMAL ASPECTS IN WET WELDING

Abstract

The wet welding is a technique used for repair of submerged parts of an offshore oil production. One of his biggest problems is to control the cooling rate. The thermal models used in the atmosphere welding can not be applied directly to wet welding. This work has as main objective is to model heat transfer in wet welding determining the distribution of maximum temperatures and cooling rates. Are modeled the heat input and heat transfer phenomena caused by direct contact with water. The model determines the geometric distribution of temperature in the weld and cooling rate. It's also determined the isotherms and cooling time between two chosen temperatures. The values obtained were compared with some experimental data taken from literature. There was a reasonable agreement between simulations and experimental results found. It was also implemented an algorithm in MATLAB® that performs the computational modeling. Specific experiments are planned to validate the model.

Key words: Wet welding; Heat transfer; Computational modeling; Cooling time.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando em Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Brasil.

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PUC-Rio, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica, PUC-Rio, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de soldagem molhada (*underwater wet welding*) tem sido aplicada a reparos de estruturas metálicas devido à sua simplicidade e facilidade de mobilização. Muito embora sua utilização no Brasil seja relativamente recente, seu estudo iniciou-se na década de 40 com desenvolvimento de eletrodos à prova d'água por Van der Willigen ⁽¹⁾. Em relação à soldagem hiperbárica seca, a soldagem molhada tem um custo muito mais baixo.

A qualidade das soldas depositadas por este processo é prejudicada pelo fato do arco elétrico estar em contato direto com o meio aquoso. As altas temperaturas atingidas durante a soldagem fazem com que a água entre em ebulição formando bolhas de vapor ao redor do arco isolando a poça fundida do meio líquido ⁽²⁾.

Os princípios gerais da metalurgia de soldagem e da microestrutura são os mesmos tanto para soldagem atmosférica quanto para a soldagem molhada. Entretanto, as diferentes propriedades térmicas da água e do ar fazem com que o mecanismo da transferência de calor entre elas seja completamente diferente entre si. A água além de ter maior capacidade térmica, troca grande quantidade de calor com a solda através do fenômeno de geração de bolhas do arco elétrico, aumentando consideravelmente a velocidade de resfriamento da solda.

A equação de Rosenthal foi a primeira a descrever a distribuição de temperatura durante o processo de soldagem atmosférica. Neste trabalho será feita a modelagem teórica de equações de troca de calor de modo descrever matematicamente o processo de soldagem molhada, também irá se calcular a distribuição de temperatura e as velocidades de resfriamento durante o a soldagem. Será considerada a transferência de calor em regime transiente, sem que as propriedades do material e do meio se alterem com a temperatura.

Considera-se que a forma predominante da troca de calor se dá através da convecção e da radiação através da ebulição da água em contato com a solda, ao contrário do que é proposto na atmosférica, onde a forma predominante é a condução pela placa.

De maneira a validar as hipóteses propostas desenvolveu-se um algoritmo em MATLAB®, capaz de calcular a distribuição geométrica da temperatura após se iniciar a soldagem molhada de uma placa e determinar suas velocidades de resfriamento para então estimar sua dureza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

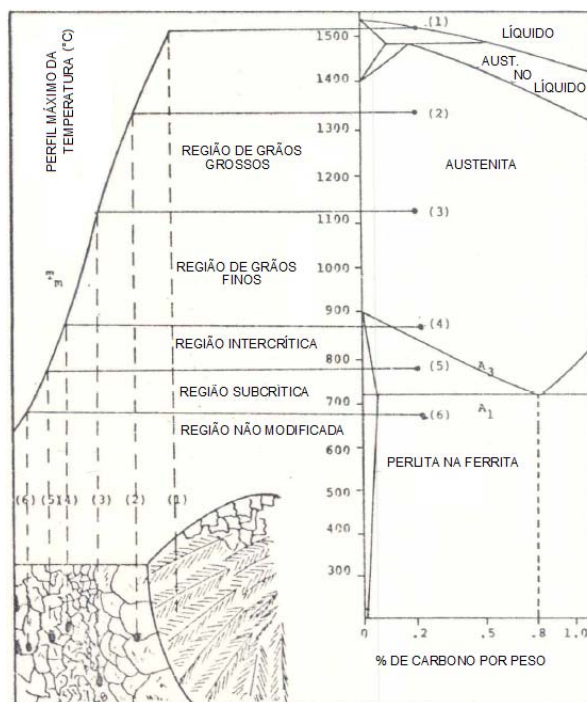
2.1 Influência dos Ciclos Térmicos na Microestrutura da Junta Soldada

A água tem efeitos importantes na qualidade das juntas produzidas na soldagem molhada, durante esse processo de soldagem o vapor d'água em contato com a solda muda o padrão usual de transferência de calor, apesar disso, os princípios conceituais da metalurgia da soldagem são os mesmos da atmosférica, acrescidos de: velocidades de resfriamento mais altas, crescimento dos contornos de grão, transformações cristalinas mais significantes na zona afetada pelo calor (ZAC) e descontinuidades provocadas principalmente pelo hidrogênio difusível.

A região que compreende o cordão de solda em geral apresenta uma microestrutura complexa, com diferentes morfologias e fases dispersas. A estrutura microscópica presente na junta soldada é uma consequência direta da composição química do metal de base e do metal de solda utilizados, assim como dos ciclos térmicos a que

eles foram submetidos. Em geral as propriedades mecânicas da junta, como resistência a tração, ductilidade, dureza, resistência a fadiga e tenacidade ao entalhe são relacionadas diretamente a microestrutura.

A zona fundida (ZF) e as regiões adjacentes ao metal de solda, ZAC, são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico diminuem à medida que se afasta do eixo central da solda. Essas temperaturas sofrem uma brusca variação devido às altas velocidades de resfriamento, podendo haver modificações estruturais em relação ao material original, como mostrado na Figura 1.



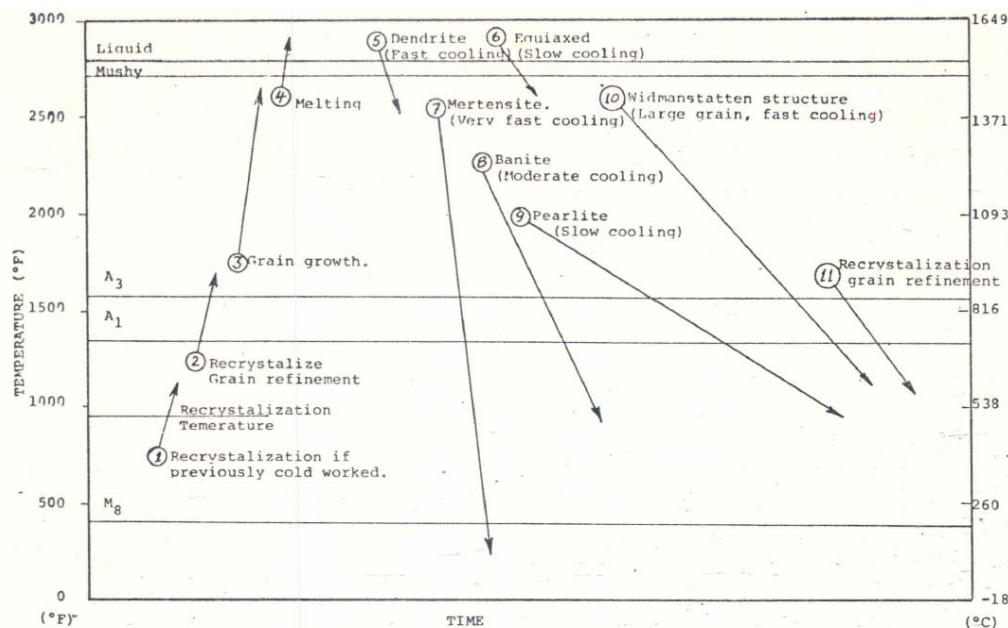
Fonte: Interpretive Report on Underwater Welding, p. 20.

Figura 1. Correlação da máxima temperatura por região na ZAC.

A zona fundida é composta por uma mistura de metal de base e metal de solda, onde o metal foi aquecido até sua temperatura de fusão. Por causa da intensa perda de calor na junta, dendritos crescem em uma direção mais do que nas demais. Portanto grãos longos e finos são resultado desse padrão de crescimento. Após o resfriamento, ocorre a solidificação resultando na formação de grãos na forma de árvore (dendritos). Os primeiros dendritos irão se nuclear na fronteira entre líquido e sólido e passam a crescer perpendicularmente a poça de fusão. Ocasionalmente o calor faz com que uma porção de metal de solda se solidifique e forme uma pequena área de grão equiaxiais no centro da ZF, isso ocorre porque a área se nucleia e solidifica quase que instantaneamente. Esses grãos crescem por igual em todas as direções. ⁽²⁾

Na ZAC a temperatura máxima é menor que a temperatura de fusão do metal, mas acima da temperatura superior crítica A. Durante a recristalização e crescimento de grão no período de resfriamento, a microestrutura se transforma de austenita para outra estrutura cristalina, onde as temperaturas máximas excederam a baixa temperatura crítica, A1. O padrão do fluxo de calor para uma película de vapor d'água na superfície do metal influencia o mecanismo de arrefecimento da junta durante a soldagem. Na região de máxima temperatura um pouco acima da baixa temperatura crítica, a temperatura não é alta o suficiente para causar completa austenitização sem crescimento de grão, causando assim o refinamento do grão.

Essa sub-região é chamada de “região recozida”. Em geral o tamanho da ZAC depende do tipo de processo de soldagem utilizado, como a perda de calor é mais intensa na soldagem molhada do que na ao ar o tamanho da ZAC irá diminuir.

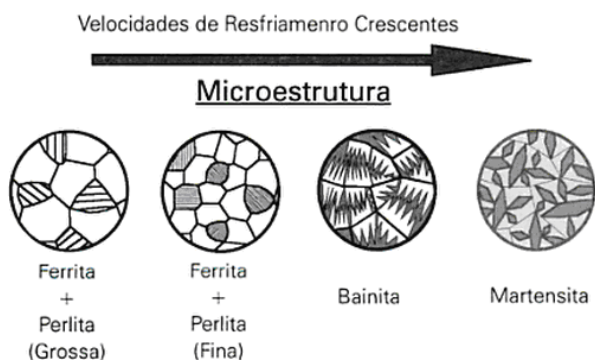


Fonte: Interpretive Report on Underwater Welding, p.28.

Figura 2. Possível transformação microestrutural durante a soldagem.

O metal de base é a área localizada depois da ZAC, que permanece inafetada pelo calor, pois as temperaturas atingidas na região não são suficientes para provocar nenhuma mudança.

As altas taxas de resfriamento desse processo de soldagem fazem com que a temperatura na qual a austenita começa a se transformar torne-se menor. Com menores temperaturas de transformação maior a dificuldade de separação dos átomos de carbono e ferro para formação da perlita, assim há a formação de uma perlita mais fina. Para temperaturas de transformação suficientemente baixas a estrutura lamelar típica da perlita não é mais formada, podendo ocorrer a formação da bainita, que proporciona alta resistência mecânica. No entanto para as altas taxas de resfriamento na ZF e adjacências, a reação eutetóide é inibida e a martensita é formada. Apresentando elevada dureza, podendo aumentar com o teor de carbono, ao mesmo tempo em que torna a junta extremamente frágil.



Fonte: Soldagem Fundamentos e Tecnologia.

Figura 3. Microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento após austenitização.

2.2 Transferência de Calor na Solda Atmosférica

Nos processos de soldagem atmosférica a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada, trabalhando-se com fontes de calor de elevada temperatura (2.000 a 20.000°C), concentradas e, com elevada intensidade. O fluxo de calor na soldagem pode ser dividido em duas etapas: fornecimento de calor a junta e dissipação desse calor pela peça. A equação de Rosenthal foi a primeira a descrever a distribuição de temperatura durante o processo de soldagem, as soluções analíticas do fluxo de calor em soldagem propostas por Rosenthal são aproximadas, tendo sido obtidas com uma série de simplificações. O modelo de Rosenthal foi modificado e estendido por diversos autores, a fim de tornar mais próximo possível da realidade. ⁽³⁾

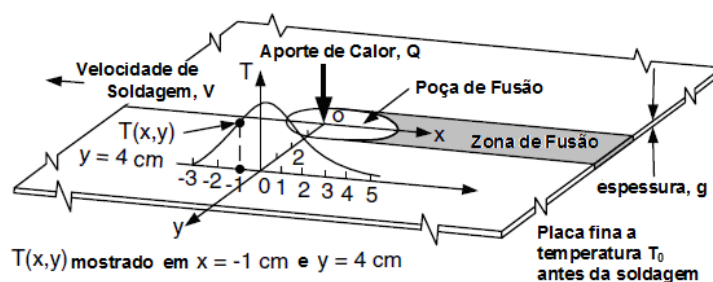
Fixado um sistema de coordenadas sobre a fonte de solda. A origem dos eixos foi estabelecida como o ponto de contato entre o eletrodo e a peça soldada e o sistema se move conforme o eletrodo produz o cordão de solda. Visto dessa maneira, com o observador sobre a fonte de solda, o processo é quase estacionário, pois tanto a poça de fusão quanto a distribuição de temperatura não se alteram com o tempo.

Para que fosse possível formular a equação que previsse a troca de calor na junta, Rosenthal assumiu que a transferência de calor se dá em estado quase estacionário (regime permanente), com uma fonte de calor pontual. O calor latente para a fusão do metal foi desprezados, assim como as propriedades foram consideradas invariantes com a temperatura e com o meio. Assume-se a hipótese de que não há perda de calor pela superfície do material e não há convecção entre a poça de fusão e o ar. ⁽⁴⁾ A equação para a difusão do calor com o aporte se movendo é ⁽⁵⁾:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} - \frac{V}{\alpha} \frac{dT}{dx} = 0 \quad [1]$$

Resolvendo para chapas de pouca espessura (espessura menor que 5 mm), onde a mesma não influência a troca de calor foi proposta a seguinte equação:

$$\frac{2\pi(T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{Vx}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) \quad [2]$$

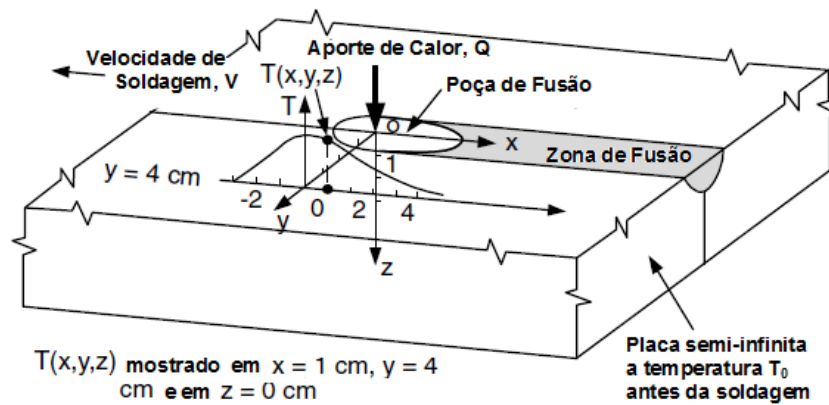


Fonte: Welding Metallurgy.

Figura 4. Fluxo de calor bidimensional durante a soldagem de uma chapa fina.

Para chapas grossas (espessura maior que 5 mm), onde a espessura tem influência na troca de calor foi proposta a seguinte equação:

$$\frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left(\frac{V(R - x)}{2\alpha}\right) \quad [3]$$



Fonte: Welding Metallurgy.

Figura 5. Fluxo de calor tridimensional durante a soldagem de uma chapa grossa.

Onde:

- T = temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- T_0 = temperatura de pré-aquecimento [$^{\circ}\text{C}$]
- k = condutividade térmica do material [J/m s K]
- g = espessura da chapa [m]
- Q = calor transferido pela fonte de solda [W]
- V = velocidade de soldagem [m/s]
- α = difusividade térmica do material [m^2/s]
- K_0 = função de Bessel modificada de ordem zero
- r = distância radial da origem para chapas, calculada com $x^2 + y^2$ [m]
- R = distância radial da origem para placas, calculada com $x^2 + y^2 + z^2$ [m]

3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE

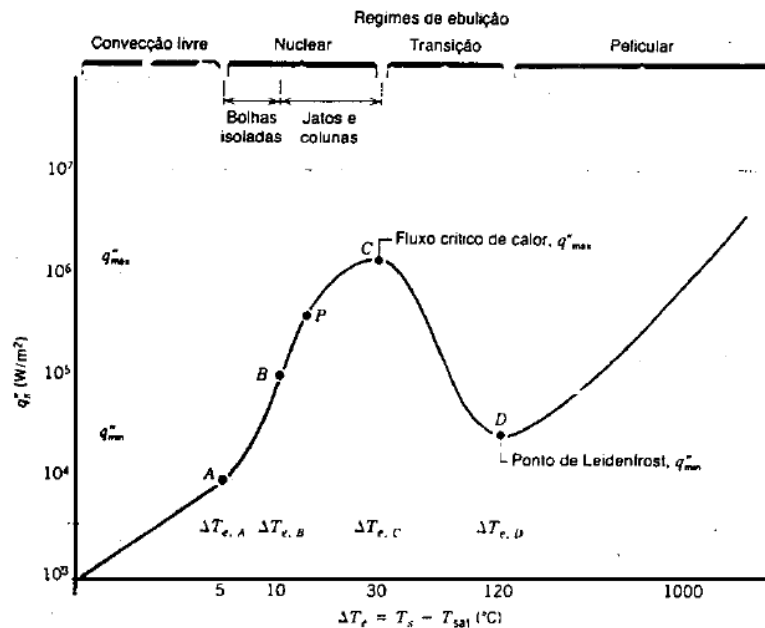
3.1 Mecanismo da Troca de Calor da Junta Soldada

As equações que governam o fluxo de calor em um sólido isotrópico são lineares, esse fato torna possível encontrar soluções analíticas que dão a distribuições de temperatura para um número de diferentes configurações e tamanhos diferentes de fonte de calor. Os modelos utilizados nas derivações deste tipo são normalmente de forma simplificada; por exemplo, presume-se que o calor seja emitido a um ponto, ou ao longo de uma linha, ou através de um plano. Fontes de calor reais têm dimensões finitas, e por esta e outras razões, as distribuições de temperatura reais obtidos na soldagem deve desviar um pouco das calculadas a partir de expressões teóricas.

Como já citado anteriormente o mecanismo da transferência de calor entre a junta soldada e o meio aquoso, na solda molhada, difere bastante da troca de calor entre a junta e o ar, na soldagem atmosférica, sendo as altas taxas de resfriamento do metal as principais diferenças. O calor que flui para fora da zona fundida determina tanto o tempo que essa região fica exposto à temperatura máxima, como também a velocidade de resfriamento da superfície até a temperatura de equilíbrio.

Durante a soldagem o metal de base se funde ao metal de solda, a temperatura a que são submetidos excede a temperatura de saturação da água líquida em contato com o metal, fazendo com que a água entre em ebulição. A superfície fica coberta por uma camada de vapor, o que é chamado de ebulição de película ⁽⁶⁾, onde o excesso de temperatura (ΔT_e) é muito maior que o excesso de temperatura no ponto

de Leidenfrost ($\Delta T_{e,D}$), como é mostrado na figura abaixo caracterizando esse fenômeno .



Fonte: Transferência de Calor e de Massa, p. 421.

Figura 6. Curva típica de ebulição de água a 1 atm: fluxo de calor q''_s em função do excesso de temperatura.

A transferência de calor da superfície para o líquido ocorre por convecção e radiação através do vapor, as gotículas de água entram em ebulição à medida que se movimentam próximo à superfície quente. Conforme a temperatura cresce o excesso de temperatura, (ΔT_e), se torna mais significativo fazendo com que a radiação de calor também exerça maior influencia aumentando assim o fluxo de calor para fora da junta. Em regiões mais próximas do aporte de calor a taxa de ebulição é mais elevada e por consequência maior a taxa de calor transferido para o meio líquido. É necessário também considerar relevante o fluxo de calor pela estrutura, no caso estudado uma chapa de aço. O resfriamento da superfície também se dá pela condução de calor através da chapa, distribuindo o calor ao longo da chapa em função do tempo.

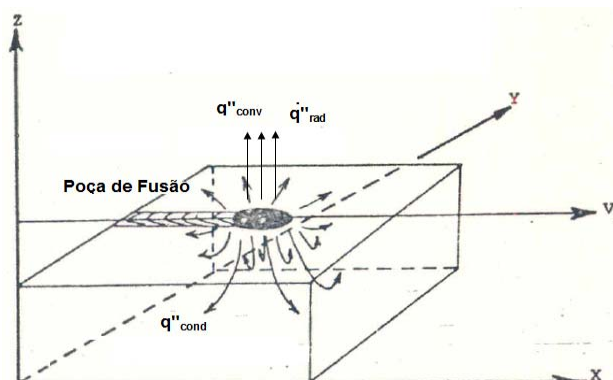


Figura 7. Fluxo de Calor durante a Soldagem Molhada, considerando condução, convecção e radiação.

Para considerar a condução em regime transiente na superfície tridimensional adotou-se o método da Capacitância Concentrada, onde a temperatura do sólido é

especialmente uniforme em qualquer instante durante o processo transiente. No entanto é necessário comprovar que o erro associado a utilização desse método é pequeno, assim o número de *Biot* deve ser menor que 0,1. Sendo *h* é o coeficiente de convecção térmico do meio, *k* é o coeficiente de condução térmica do sólido e *L_c* é o comprimento equivalente que é aproximadamente o volume do sólido dividido pela área da superfície.

$$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0,1 \quad [4]$$

Pode-se dividir o ciclo térmico do processo de soldagem molhada em duas partes distintas: o aquecimento, onde o material se encontra a temperatura ambiente semelhante a temperatura da água do meio, e é aquecido até a temperatura de fusão do metal e o resfriamento, onde a superfície já se encontra aquecida e é então resfriada de volta a temperatura ambiente. O processo de resfriamento também pode ser dividido em duas etapas, primeiramente da temperatura de fusão até a de saturação e da temperatura de saturação até a temperatura de equilíbrio do sistema. Aplicando a conservação de energia para a curva de aquecimento em qualquer instante genérico *t*, tem-se:

$$\dot{E}_{gerada} (heat_input) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad [5]$$

Masubichi⁽²⁾ definiu que a energia necessária para realizar a soldagem de baixo d'água é 25% superior a utilizada ao ar, seguindo a forma:

$$\dot{Q} = \pi \cdot W \cdot k \cdot T_m \left(1 + \frac{4 \text{ velo} \cdot W}{5 \cdot 4\alpha} \right) \quad [6]$$

Onde *W* é a largura do cordão de solda em metros, *k* a condutividade térmica do material em *W/m.K*, *T_m* é a temperatura de fusão do metal em grau Kelvin, *velo* a velocidade de soldagem em m/s e α a difusividade térmica em m²/s.

Por sua vez a largura do cordão de solda é em função da voltagem, de amperagem e da velocidade de soldagem. Quanto maiores forem a voltagem e a amperagem maior será a quantidade de material depositado, por conseguinte maior a largura do cordão e com velocidade de soldagem maiores menos material é depositado, logo menor a largura do cordão. Com *V* em volts, *I* em amperes e *velo* em m/s.

$$W = \frac{V \cdot I \cdot 5,38 \cdot 10^{-9}}{\text{velo}} \quad [7]$$

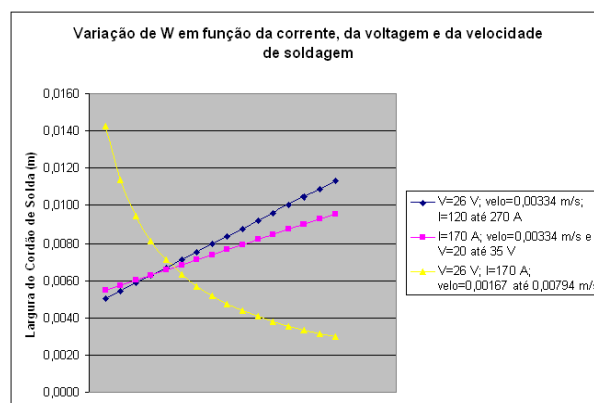


Figura 8. Variação de *W* em função da corrente, da voltagem e da velocidade de soldagem.

Fazendo $\dot{E}_{gerada}(heat_input) = \dot{Q}$ e resolvendo:

$$\frac{\dot{Q}}{\rho V c} \int_0^t dt = \int_{T_i}^T dT \therefore \frac{\dot{Q}}{\rho V c} t = T - T_i \quad [8]$$

Através da equação 8 é possível determinar a curva de aquecimento, assim como o tempo que se leva para aquecer o sólido da temperatura inicial (T_i) até a temperatura de fusão. O tempo para atingir a temperatura de fusão é extremamente pequeno devido à alta taxa de calor fornecido a peça.

Já para a curva de resfriamento, consideramos que o calor é trocado através de condução pelo sólido, convecção e radiação com o meio aquoso simultâneos. Considerando a hipótese de Capacitância Concentrada para um intervalo de temperaturas entre a temperatura de fusão do material e a temperatura de saturação do líquido, aplica-se a conservação de energia em qualquer instante de tempo, obtêm-se:

$$-(q''_{conv} + q''_{rad}) A_s = -(q''_{ebulição}) A = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad [9]$$

Nos excesso de temperatura além do ponto de Leidenfrost, uma película de vapor contínuo cobre a superfície e não há contato entre a fase líquida e a superfície. O calor latente corrigido h'_{fg} leva em conta a energia sensível necessária para manter as temperaturas no interior da camada de vapor acima da temperatura de saturação. Ele pode ser aproximado como:

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,8 C_{p,v} (T_s - T_{sat}) \quad [10]$$



Fonte: Transferência de Calor e de Massa, p422.

Figura 9. Ebulição em película.

A temperaturas elevadas de superfície, a transferência de calor por radiação através da película de vapor se torna significativa. Uma vez que a radiação atua para

umentar a espessura da película, não é razoável considerar que os processos radioativos e convectivos sejam simplesmente aditivos. ⁽⁷⁾

O coeficiente de convecção efetivo para uma placa plana é representado como:

$$\bar{h}_{conv} = 0,943 \left[\frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0,8 C_{p,v} \Delta T_e)}{\mu_v L \Delta T_e} \right]^{1/4} \quad [11]$$

Onde ρ_v e ρ_l são respectivamente as massas específicas do vapor d'água e da água, g é a aceleração da gravidade, h_{fg} é o calor latente de fusão, $C_{p,v}$ é o calor específico, μ é a viscosidade dinâmica, k_v é a condutividade térmica do vapor e L é igual a largura do cordão de solda.

O coeficiente de radiação efetivo é representado como:

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad [12]$$

Onde ε é a emissividade do sólido, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e as temperaturas estão em graus Kelvin. Para o cálculo do coeficiente total de troca de calor utiliza-se a equação transcendental da forma:

$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{conv}^{4/3} + \bar{h}_{rad}^{1/3} \quad [13],v$$

Se $\bar{h}_{conv} > \bar{h}_{rad}$, uma forma simplificada pode ser utilizada:

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4} \bar{h}_{rad} \quad [14]$$

Utilizando $q'_{ebulição} \cdot A = \bar{h} \Delta T_e \cdot A = \bar{h} (T - T_{sat}) \cdot A_s$, e substituindo na equação 9, tem-se:

$$-\bar{h} \Delta T_e \cdot A = \rho V c \frac{dT}{dt} \rightarrow -\bar{h} (T - T_{sat}) \cdot A = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad [15]$$

Resolvendo a equação anterior:

$$\frac{-\bar{h} \cdot A}{\rho V c} \int_0^t dt = \int_{T_i}^T \frac{dT}{(T - T_{sat})} \therefore \frac{-\bar{h} \cdot A}{\rho V c} t = -\ln \left(\frac{T_i - T_{sat}}{T - T_{sat}} \right) \quad [16]$$

A área "A" é definida como sendo metade do cordão de solda ao quadrado e o volume como sendo um quarto do cordão de solda ao cubo. Simplificando a equação 16 obtêm-se:

$$\frac{(T - T_{sat})}{(T_i - T_{sat})} = e^{\frac{-\bar{h} \cdot A}{\rho V c} t} \quad [17]$$

A equação 17 só é válida no intervalo de temperaturas de fusão do metal e da temperatura de saturação da água. Para temperaturas abaixo da temperatura de saturação deve-se realizar uma nova modelagem utilizando o método da Capacitância Concetrada. Os efeitos de radiação serão desprezados, logo aplicando a conservação de energia:

$$-q''_{conv} A_s = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad [18]$$

Sendo,

$$-q''_{conv} A_s = -h \cdot A_s \cdot (T - T_{\infty}) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad [19]$$

Resolvendo a igualdade a cima e aproximando o resultado obtêm-se:

$$\frac{(T - T_{\infty})}{(T_i - T_{\infty})} = e^{\frac{-h.A}{\rho V c} t} \quad [20]$$

3.2 Modelagem da Distribuição da Temperatura ao Longo de uma Superfície

A fim de estudar o comportamento da temperatura ao longo da chapa plana nas três direções propôs-se uma solução numérica através do método de diferenças finitas. Em contraste com a solução analítica, que permite determinar a temperatura em qualquer ponto de interesse do meio, a solução numérica permite apenas a determinação da temperatura em pontos discretos. Para isso devem-se selecionar esses pontos, isso é feito subdividindo-se o meio de interesse em pequenas regiões e atribuindo-se a cada uma um ponto de referência localizado no centro. Esses pontos ou nós representam uma determinada região, e sua temperatura é uma medida da temperatura média da região.

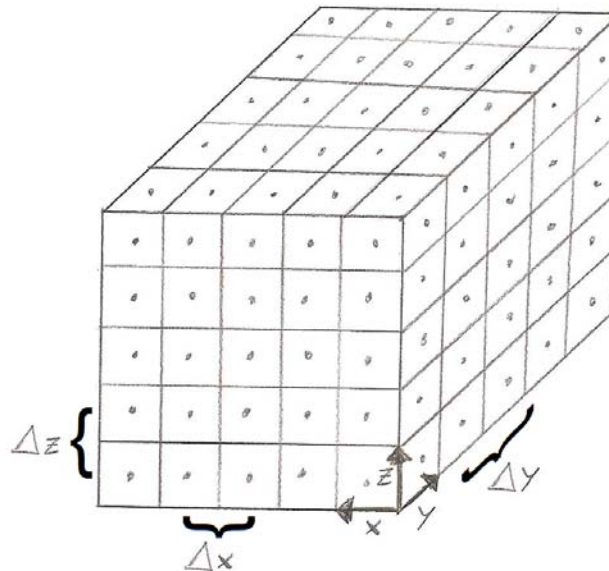


Figura 10. Malha tridimensional com as distancias (Δx , Δy , Δz) entre os nós adjacentes.

A equação de diferenças finitas para um nó também pode ser obtida aplicando a conservação de energia a um volume de controle em torno da região nodal. Considera-se que todo fluxo de calor esteja no interior do nó. Sendo assim a partir

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

das equações que governa o processo, obtêm-se a seguinte configuração para cada nó no instante em que $t=0$ segundo:

$$\left(\frac{1}{\Delta x^2}\right)T_{i+1,j,k} + \left(\frac{1}{\Delta x^2}\right)T_{i-1,j,k} + \left(\frac{1}{\Delta y^2}\right)T_{i,j+1,k} + \left(\frac{1}{\Delta y^2}\right)T_{i,j-1,k} + \left(\frac{1}{\Delta z^2}\right)T_{i,j,k+1} + \left(\frac{1}{\Delta z^2}\right)T_{i,j,k-1} - 2\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right)T_{i,j,k} = 0$$

[18]

Uma vez que a rede nodal tenha sido estabelecida e a equação de diferenças finitas escrita para cada nó, a distribuição de temperatura pode ser determinada. O problema se reduz a resolução de um sistema de equações algébricas lineares. Utilizando o método da inversão matricial, escreve-se uma matriz “A” dos coeficientes, um vetor “x” das temperaturas e “f” que é o termo independente. As equações algébricas devem se escritas na forma matricial da seguinte maneira:

$$\boxed{A \cdot x = f} \quad [19]$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix}$$

O vetor solução é expresso como:

$$\boxed{x = A^{-1} \cdot f} \quad [20]$$

4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

De maneira a facilitar a análise da troca de calor na soldagem utilizou-se um algoritmo escrito em MATLAB® para calcular a distribuição da temperatura após ser iniciada a soldagem da superfície usando o método de diferenças finitas no instante t=0 segundo.

4.1 Programa Fonte

```

%VISTA DO PLANO X X Y

clear
clc

comp=input('Entre com o comprimento da placa (m): ');
disp(' ');
larg=input('Entre com a largura da placa (m): ');
disp(' ');

%NÚMERO DE NÓS

Nx=15;
Ny=15;

Dx=comp/(Nx-1);
Dy=larg/(Ny-1);

a=(1/Dx^2);
b=1/Dy^2;
c=-2/Dx^2-2/Dy^2;

A=zeros(225,225);
f=zeros(225,1);

for i=1:1:Nx^2
    A(i,i)=c;
end

%cantos

A(1,2)=b;
A(1,16)=a;

A(15,14)=b;
A(15,30)=a;

A(211,196)=a;
A(211,212)=b;

A(225,224)=b;
A(225,210)=a;

%bordas

for i=2:1:14
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
    A(i,(i+15))=a;
end

for i=212:1:224
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
    A(i,(i-15))=a;
end

for i=16:15:196
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=30:15:210
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
end

%meio

for i=17:1:29
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=32:1:44
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=47:1:59
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=62:1:74
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=77:1:89
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=92:1:104
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=107:1:112
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

A(113,113)=1;
f(113,1)=1523;

T=inv(A)*f;

x=0:Dx:comp;
y=0:Dy:larg;

[X,Y]=meshgrid(x,y);

for j=1:Nx
    for i=1:Ny
        Tmat(i,j)=T((i-1)*Ny+);
    end
end

figure(1);
surf(X,Y,Tmat);
title('Distribuição Geométrica das Temperaturas');
xlabel('Comprimento (m)');
ylabel('Largura (m)');
zlabel('Temperatura (°C)');

figure(2);
contourf(X,Y,Tmat,0:80:1523);
title('Isotermicas das Temperaturas na Placa');
xlabel('Comprimento (m)');
ylabel('Largura (m)');
colorbar
    
```

Figura 11. Algoritmo em MATLAB® que descreva a distribuição de temperatura na superfície da chapa soldada após a deposição do metal de solda..


```

%VISTA DO PLANO Y x Z

clear
clc

disp(' ');
esp=input('Entre com a espessura da placa (m): ');
disp(' ');
larg=input('Entre com a largura da placa (m): ');
disp(' ');

Nz=15;
Ny=15;

Dz=esp/(Nz-1);
Dy=larg/(Ny-1);

a=(1/Dz^2);
b=1/Dy^2;
c=-2/Dz^2-2/Dy^2;

A=zeros(225,225);
f=zeros(225,1);

for i=1:1:Nz^2
    A(i,i)=c;
end

%cantos

A(1,2)=b;
A(1,16)=a;

A(15,14)=b;
A(15,30)=a;

A(211,196)=a;
A(211,212)=b;

A(225,224)=b;
A(225,210)=a;

%bordas

for i=2:1:14
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
    A(i,(i+15))=a;
end

for i=16:15:196
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=30:15:210
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
end

%meio

for i=17:1:29
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=32:1:44
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=47:1:59
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=62:1:74
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=77:1:89
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=92:1:104
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=107:1:119
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=122:1:134
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=137:1:149
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=152:1:164
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=167:1:179
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=182:1:194
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

for i=197:1:209
    A(i,(i-15))=a;
    A(i,(i+15))=a;
    A(i,(i-1))=b;
    A(i,(i+1))=b;
end

A(212,212)=1;
f(212,1)=137;

A(213,213)=1;
f(213,1)=216;

A(214,214)=1;
f(214,1)=310;

A(215,215)=1;
f(215,1)=430;

A(216,216)=1;
f(216,1)=600;

A(217,217)=1;
f(217,1)=888;

A(218,218)=1;
f(218,1)=1523;

A(219,219)=1;
f(219,1)=888;

A(220,220)=1;
f(220,1)=600;

A(221,221)=1;
f(221,1)=430;

A(222,222)=1;
f(222,1)=310;

A(223,223)=1;
f(223,1)=216;

A(224,224)=1;
f(224,1)=137;

T=inv(A)*f;

z=0:Dz:esp;
y=0:Dy:larg;

[Z,Y]=meshgrid(z,y);

for j=1:Nz
    for i=1:Ny
        Tmat(i,j)=T((i-1)*Ny+j);
    end
end

figure(1);
contourf(Z,Y,Tmat,0:80:1523);
title('Isotérmicas das Temperaturas na Placa');
xlabel('Largura (m)');
ylabel('Espessura (m)');
colorbar
    
```

Figura 12. Algoritmo em MATLAB® que descreva a distribuição de temperatura ao longo da espessura da chapa soldada após a deposição do metal de solda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a modelagem da transferência de calor proposta nesse trabalho simularam-se as curvas de aquecimento e resfriamento para dada situação específica, onde os parâmetros estão descritos abaixo.

Tabela 1. Parâmetros de Simulação

W (m)	k (W/m.K)	T _m (°C)	velo (m/s)	α (m ² /s)	V (V)
0,007	52,9	1523	3,34.10 ⁻³	1,384.10 ⁻⁵	26

Tabela 2. Parâmetros de Simulação

I (A)	k _v (W/m.K) ³	ρ _v (kg/m ³)	ρ _l (kg/m ³)	G (m/s ²)	h _{fg} (J/kg)
170	0,0331	4,808	957,9	9,8	2,257.10 ⁶

Tabela 3. Parâmetros de Simulação

C _{p,v} (J/kg.K)	ΔTe (°C)	μ _v (N.s/m ²)	L (m)	ε	σ (Wm ² K ⁴)
2,56.10 ³	1423	14,85.10 ⁻⁶	0,007	0,9	5,6697.10 ⁻⁸

Tabela 4. Parâmetros de Simulação

T _{sat} (°C)	T _∞ (°C)	ρ (kg/m ³)	v (m ³)	A (m ²)	C (J/kg.K)
100	20	7860	3,5937.10 ⁻⁸	0,000049	486

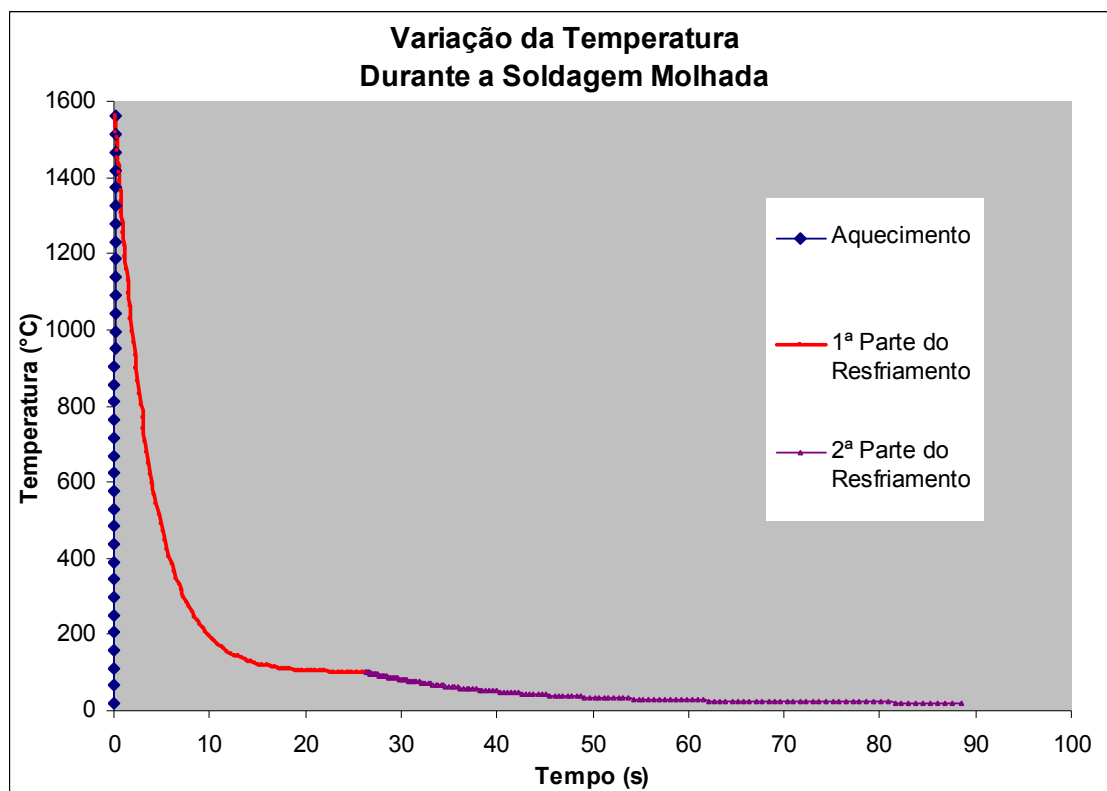


Figura 13. Ciclo térmico na soldagem Molhada com as curvas de aquecimento e resfriamento.

Analisando a dinâmica do ciclo térmico do processo de soldagem molhada percebe-se que a temperatura varia linearmente da temperatura ambiente até a temperatura de fusão do aço em apenas 0,17 segundos, o calor fornecido pelo aporte de calor é

da ordem de 3 kJ por segundo, o que faz com que o tempo de aquecimento bem rápido.

Já no resfriamento do processo o coeficiente convectivo da ebulição foi de aproximadamente de 779 W/m²K. A temperatura decai exponencialmente, devido à intensa troca de calor com o vapor d'água, até a temperatura de saturação da água em aproximadamente 26,1 segundos, quando passa a decair exponencialmente de forma menos intensa (2^a parte de resfriamento) até retornar a temperatura de equilíbrio.

O tempo de variação entre as temperaturas de 800°C a 500°C é de sumo interesse, pois a ele estão associadas às transformações microestruturais que o metal sofrer. O valor de Δt_{8-5} é responsável pela temperatura de início de transformação da austenita, e quanto maior for a taxa de resfriamento neste intervalo de temperatura, menor será a temperatura de início da transformação e maior será a suscetibilidade à formação de trincas a frio. Para a simulação anterior Δt_{8-5} foi de 2,01 segundo, que é considerado extremamente pequeno se comparado a solda atmosférica com as mesmas características.

Com o aumento da energia de soldagem maior é a quantidade de material depositado na superfície, embora a área e o volume aumentem devido ao aumento do cordão de solda facilitando a troca de calor, não é o que ocorre realmente. Embora a capacidade de troca de calor seja aumentada maior é o calor que foi fornecido pelo aporte, portanto mais tempo se leva para trocá-lo com o meio.

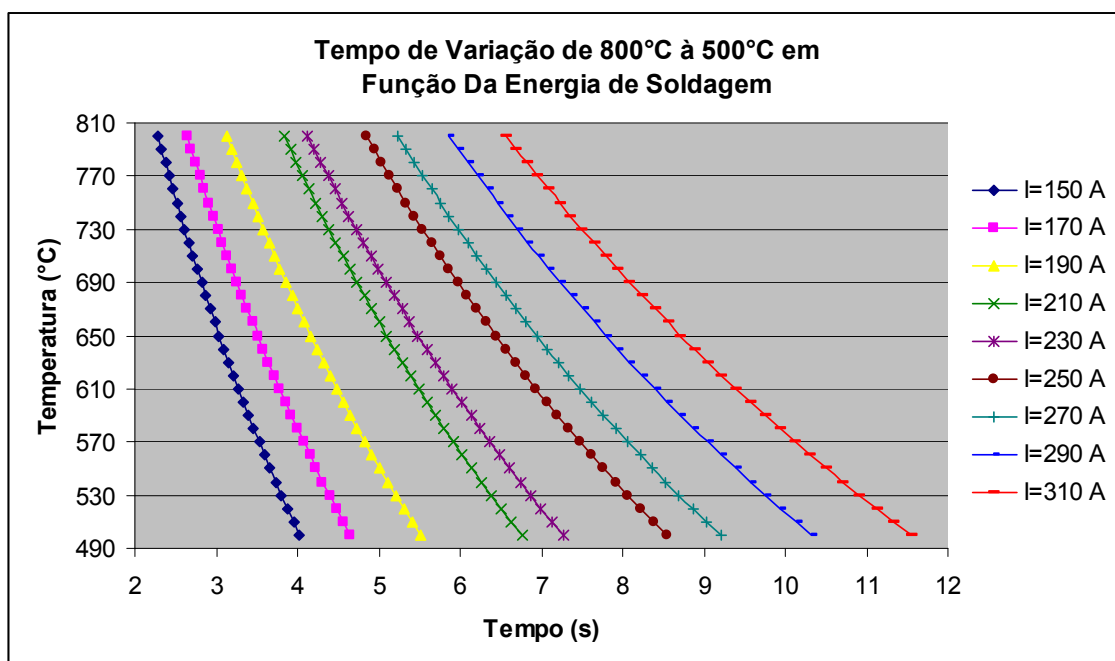


Figura 14. Curvas de resfriamento de 800°C até 500°C para diferentes energias de soldagem.

Após a deposição do metal de solda (final da curva de aquecimento e início da curva de resfriamento) a junta soldada está sobre o efeito da convecção, da radiação e também da condução. A convecção e a radiação retiram calor da superfície para o meio, enquanto a condução distribui o calor ao longo do sólido (no caso uma chapa de aço). Usando o algoritmo em MATLAB® foi possível determinar a distribuição da temperatura no sólido.

Esse algoritmo simula que o aporte de calor se encontra no centro da superfície de contato com a água e mede a distribuição de temperatura logo após cessar a transferência de calor da fonte térmica para a chapa.

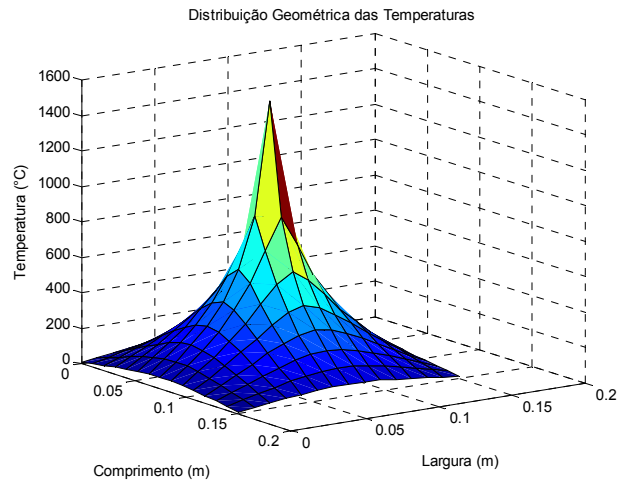


Figura 15. Distribuição Geométrica da Temperatura pela Superfície da chapa.

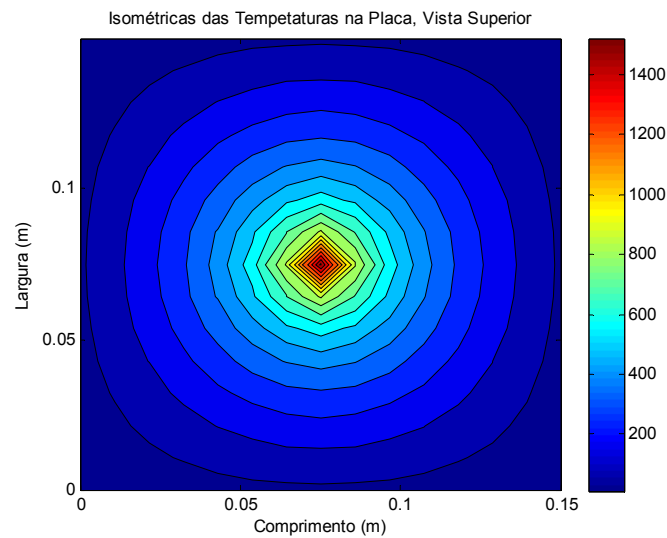


Figura 16. Vista Superior da Distribuição de temperatura pela Superfície da chapa.

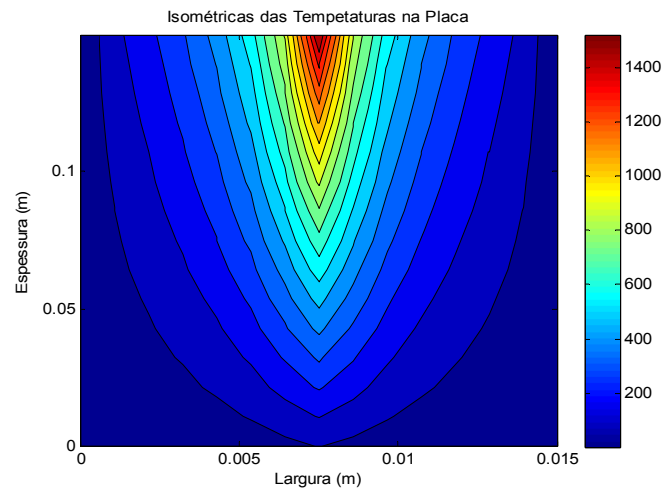


Figura 17. Vista Lateral da Distribuição de Temperatura com a posição x no centro da Chapa.

Como a fonte térmica não se move pela superfície da chapa a temperatura de distribui uniformemente em todas as direções. O tamanho da ZAC irá depender não só das condições de soldagem, mas também da espessura utilizada, como vê-se na figura abaixo, para duas chapas nas mesmas condições de soldagem, mas com espessuras diferentes (a da esquerda com 1 cm e da direita com 5 cm).

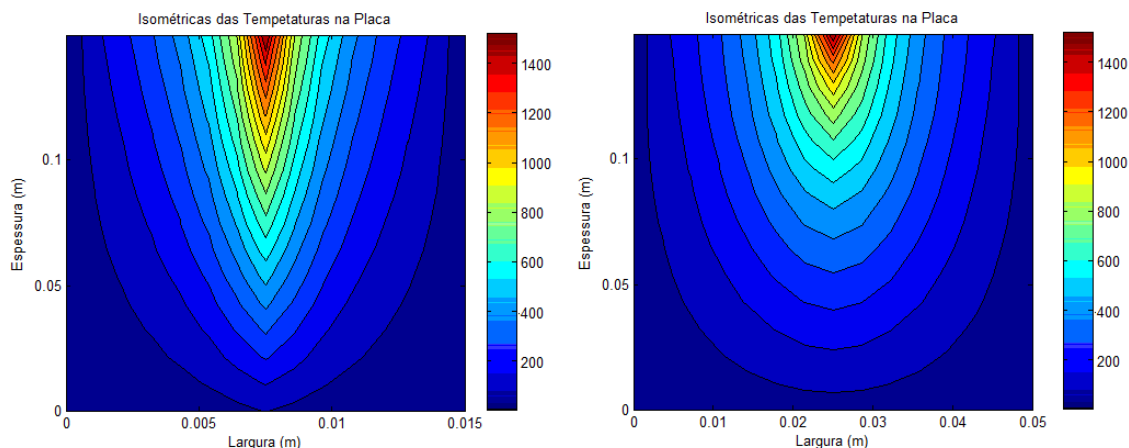


Figura 18. Vista Lateral da Distribuição de Temperatura de 2 Chapas com Espessuras Diferentes.

A fim de validar a modelagem numérica do processo de soldagem molhada comparou-se a dureza medida experimentalmente de um aço genérico, soldado com amperagem igual a 170A, voltagem igual a 26 V e velocidade de soldagem igual a 20 cm/min, com a dureza calculada pelo programa “Analisador de ZAC” da Soldasoft utilizando os Δt_{8-5} fornecidos pelo modelo numérico. A composição química do aço é mostrada abaixo:

Tabela 5. Composição Química do Aço Utilizado

Elemento	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	Ti	V	Al	Nb	C.E.
%	0,213	0,216	0,019	0,009	1,050	0,014	0,011	0,006	0,011	0	0	0,038	0	0,393

Tabela 6. Medições de Dureza do Aço após a Soldagem Molhada

Dureza	Experimental	Teórico
	437	447
421		
463		
409		
410		
447		
431		
430		
461		
419		
426		
467		
Média (HV)	435,1	447
Desvio Padrão	20,2	0

Embora a média dos valores teóricos apresente um erro em comparação a média experimental, a maior dureza medida experimentalmente é igual a dureza calculada teoricamente. Variando a energia do aporte de calor maior será o tempo entre 800°C e 500°C, fazendo que a dureza diminua a medida que a energia aumenta.

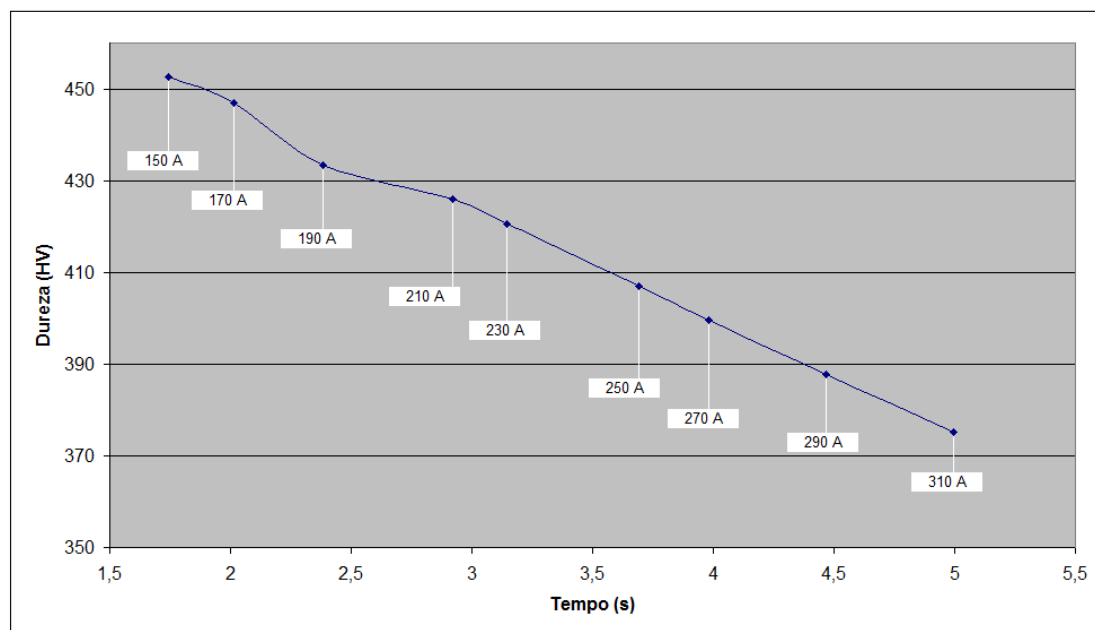


Figura 19. Variação da Dureza em Função de Diferentes Energias de Soldagem.

6 CONCLUSÃO

Embora a soldagem molhada tenha um vasto campo de atuação devido a sua simplicidade e facilidade de mobilização, entretanto sua utilização tem sido restrita. Isso se deve a baixa qualidade das soldas produzidas uma vez que o arco elétrico está em contato direto com o vapor d'água, o que garante altas velocidades de resfriamento e por conseqüência uma microestrutura suscetível ao aparecimento de trincas por hidrogênio.

Este trabalho teve como objetivo modelar o mecanismo de transferência de calor entre uma junta produzida pela soldagem molhada e o meio aquoso em que ela está imersa. Através de um conjunto de equações e diversas hipóteses testadas foi possível modelar o ciclo térmico a que a junta foi submetida durante o processo de soldagem. Assim como também foi possível calcular os tempos de resfriamento e como a temperatura se comporta ao longo do sólido.

Embora os resultados tenham sido extremamente satisfatórios, houve um pequeno desvio padrão entre os dados obtidos experimentalmente e os calculados através do modelo numérico. Essa disparidade se deve em parte a erros de arredondamento bem como ao fato de alguns fatores que influenciam no comportamento térmico da solda como as dimensões do aporte de calor e a influência da velocidade de escoamento da água não terem sido consideradas.

Em futuros trabalhos serão consideradas tais hipóteses, bem como a diminuição dos erros experimentais e de arredondamento. A aplicação desse modelo não é restrito às estruturas planas podendo ser aplicado a qualquer geometria.

Agradecimentos

Os autores agradecem o professor Márcio da Silveira Carvalho do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - Rio pelo auxílio prestado no desenvolvimento do algoritmo de MATLAB® e ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pelos dados experimentais cedidos.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, E. A., An Investigation of Fusion Controlled Metallurgical Bonding in Marine Environment, Tese de Doutorado, Universidade da Califórnia em Berkeley, 1971.
- 2 TSAI, C.; MASUBUCHI K., Interpretative Report on Underwater Welding, MIT, 1979.
- 3 MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. & SANTOS, D. B., Introdução à Metalurgia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, DEM, março 2011.
- 4 KOU, S., Welding Metallurgy. 2^a ed. 2003.
- 5 LANCASTER, J. F., Metallurgy of Welding. 6^aed. Abington Publishing, 1999.
- 6 INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., Transferência de Calor e de Massa, 5^aed., LTC, 2003.
- 7 BROMLEY, L. A., Heat transfer in Stable Film Boiling, Che. Eng. Prog., 1950.