

MÉTODO ALTERNATIVO PARA O CÁLCULO DA TAXA DE DEPOSIÇÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO COM ELETRODO CONSUMÍVEL *

Sergio Cordero Calvimontes¹

Rafaella Martins Ribeiro²

Antônio José Oliveira Cabral³

Resumo

Através de um método de generalização dos processos de soldagem por fusão que usam eletrodos consumíveis, baseado numa desagregação tecnológica, se aplica um modelo matemático computacional para estudar o comportamento do perfil de temperatura frente as diferentes configurações específicas de cada processo, objetivando inferir a taxa de deposição e velocidade de compensação de material. Gera-se um método potencialmente significativo para aplicações práticas.

Palavras-chave: Modelo matemático; Soldagem por fusão; Taxa de deposição.

ALTERNATIVE METHOD FOR CALCULATING THE CONSUMABLE-ELECTRODE FUSION WELDING DEPOSITION RATE

Abstract

Using a generalizing method applied on consumable-electrode fusion welding processes, based on a technological disaggregation, a computerized mathematical model is applied to study the temperature profile behavior on the different specific configurations of each process, in order to infer the deposition rate and material compensation velocity. A potentially significant method is generated to be used in practical applications.

Keywords: Mathematical modeling; Fusion Welding; Deposition Rate.

¹ Engenharia Mecatrônica, Doutorando, Laboratório de Propriedades Mecânicas, PEMM, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

² Engenheira Metalúrgica, Doutora, Professora do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

³ Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado III, Laboratório de Concepção, Departamento de Engenharia Mecânica - EEIMVR, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um processo de soldagem pode ser definido genericamente como um método de união, reconstrução ou recobrimento (sem levar em conta a possibilidade de corte) que permite mudanças físicas, químicas e metalúrgicas, em um sistema predefinido, aproveitando um aporte de energia [1]. As variáveis deste método estão regidas por dois critérios de controle: custo e qualidade [2]. No presente trabalho são consideradas só duas fontes de energia utilizadas em processos de soldagem que envolvem fusão: energia mecânica e elétrica. A Figura 1 ilustra este processo:

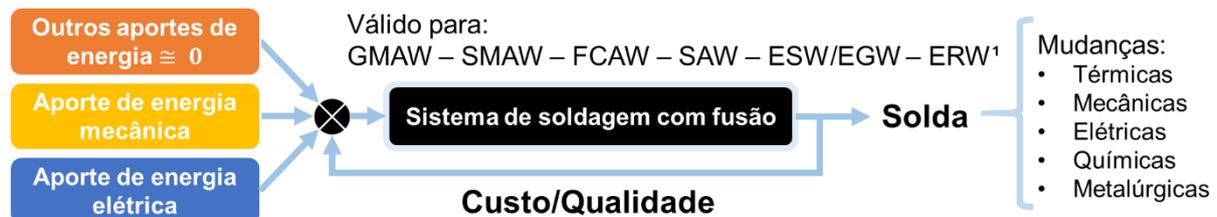


Figura 1. Generalização conceitual de alguns processos de soldagem por fusão.

O objetivo do presente trabalho é inferir a quantidade de energia mecânica requerida para uma predeterminada quantidade de energia elétrica, segundo um sistema de soldagem predefinido [3]. Entre todas as variáveis que o aporte de energia mecânica envolve, a taxa de compensação de material fundido (\dot{c}) é a que melhor define a produtividade do processo [1], podendo ser utilizada na prática, como variável independente [2]. O valor de \dot{c} é a somatória da taxa de material perdido (\dot{p}) (seja por respingos ou outros fatores) e a taxa de deposição (\dot{m}), sendo esta última a variável de maior interesse [1]. A Figura 2 ilustra alguns detalhes do método a ser aplicado:

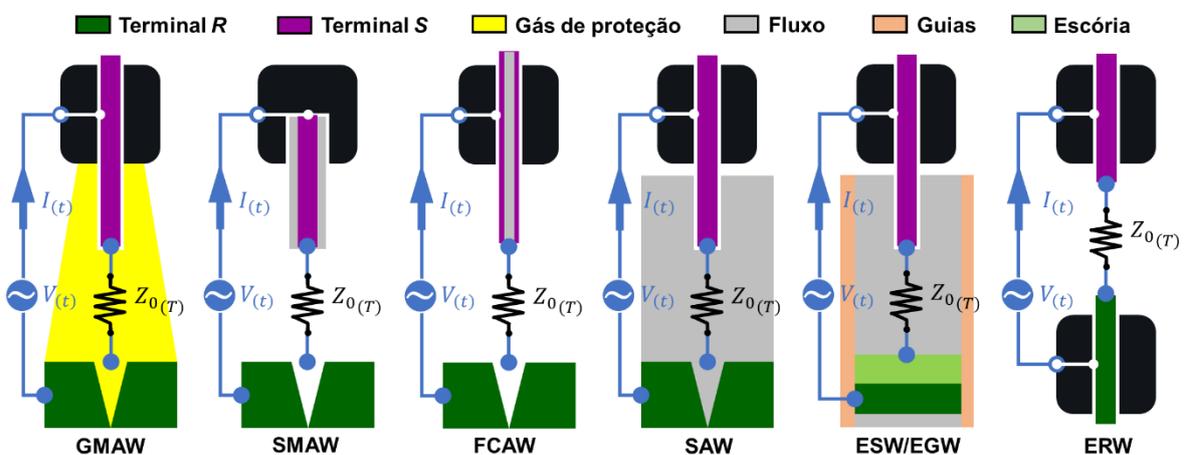


Figura 2. Comparação do circuito elétrico equivalente dos processos de soldagem por fusão.

Segundo a nomenclatura de literatura vinculada, é possível chamar os terminais *R* e *S* da Figura 2 como eletrodos, porém é mais comum chamar o terminal *R* como peça de trabalho [2]. No caso de ESW/EGW, o terminal *R* vem a ser o metal fundido sendo depositado que une as peças de trabalho (as guias normalmente não fazem parte do circuito), note-se também que a escória vem a ser parte do circuito como uma extensão do terminal *R*. Os eletrodos no ERW não são consumíveis logo, os

¹ O termo “taxa de deposição” (\dot{m}) não é aplicável para este processo; o termo “velocidade de compensação” (\dot{v}) descreve melhor o processo.

materiais a soldar devem ser considerados como eletrodos consumíveis. A generalização dos processos da Figura 2 é apresentada na Figura 3:

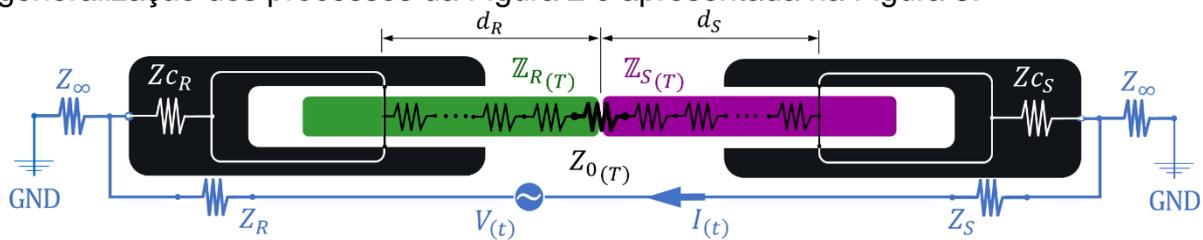


Figura 3. Circuito elétrico simplificado generalizado dos processos de soldagem por fusão.

O circuito simplificado da Figura 3 foi estudado em pesquisas anteriores [3-5]: Pode-se distinguir a impedância de interface (Z_0), os arranjos de impedâncias R e S (Z_R e Z_S , respectivamente), as impedâncias de contato (Z_{cR} e Z_{cS}), impedâncias de isolamento (Z_∞), impedâncias dos condutores (Z_R e Z_S), a diferença de potencial ($V(t)$) nos terminais da fonte elétrica de energia, a corrente elétrica do sistema ($I(t)$) que pode ser alternada ou contínua dependendo do processo, e os comprimentos ativos de eletrodo (d_R e d_S). Vale ressaltar que no processo ERW, d_R e d_S são vinculados ao nome “material” e não ao nome “eletrodo” sem eliminar a validade do modelo.

A impedância de interface, independentemente do processo de soldagem, possui natureza instável porque modela um contato elétrico através de arcos elétricos (pode ser um ou mais de um, com contato mecânico ou não) [3]. O valor numérico de Z_0 é dependente das variantes dos processos ilustrados na Figura 2, estando sujeito à presença (ou ausência) de gás protetor, fluxo ou escória. É necessário ressaltar que o modelo da Figura 3 representa um caso unidimensional, e que para casos bi ou tridimensionais somente é necessário mudar os arranjos de impedâncias [3-6].

Conforme a Figura 2, os terminais (ou eletrodos) são consumíveis, sendo necessária uma compensação do material fundido, que é obtido com o deslocamento relativo de aproximação entre ambos os terminais. A variação deste deslocamento no tempo pode ser definida como a velocidade de aproximação ou compensação (v), o qual é muito útil na modelagem de processos [1-3]. Conhecendo a densidade do material (ρ), e a seção transversal (A), pode-se calcular \dot{m} segundo a Equação 1:

$$\eta = \frac{\dot{m}}{\dot{c}} = \frac{\dot{m}}{\dot{m} + \dot{p}} \leftrightarrow \dot{m} = (\rho Av)_R + (\rho Av)_S \leftarrow v = v_R + v_S \quad (1)$$

Observa-se que a velocidade de compensação do material R (v_R) é praticamente nula nos processos GMAW, SMAW, FCAW, e SAW pois o material fica na poça de fusão e este não deve ser compensado logo, o deslocamento do terminal S (eletrodo) é a variável independente que define a compensação ou seja, a velocidade do terminal S (v_S) é a velocidade relativa entre peça e eletrodo (v) que permite o cálculo de \dot{m} . Nos processos de alimentação de arame continuada (GMAW, FCAW, SAW e ESW/EGW) a velocidade de alimentação do arame, também conhecida como velocidade de avanço do eletrodo, é equivalente à velocidade de compensação do terminal S . A eficiência da deposição está definida por η , sendo que, para uma deposição 100% eficiente, é necessário que $\dot{p} = 0$.

A Figura 4 apresenta a evolução do perfil de temperatura no sistema da Figura 3:

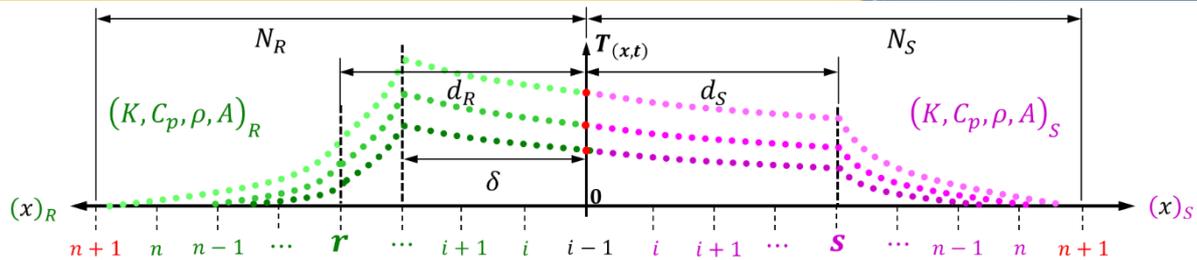


Figura 4. Conceitualização do perfil de temperatura na soldagem de materiais dissimilares.

Considerando o exposto anteriormente, o cálculo do valor numérico de \dot{m} pode ser implementado utilizando um modelo matemático computacional do sistema ilustrado na Figura 2. A Figura 4 mostra a discretização espacial e temporal do sistema, para um caso unidimensional, onde cada uma das diferenças finitas possui características resistivas [3]. Note-se que, segundo um referencial coincidente com a interface da solda, os comprimentos ativos de eletrodo podem ser pontualizados nas diferenças finitas na posição r e s como ressalta a Figura 4. A impedância de interface atua como uma condição de contorno na posição 0 , e que vincula dois perfis térmicos diferentes, com comportamentos e magnitudes diferentes, cada um regido pelas propriedades de cada material. Desta forma, o problema pode ser abordado computacionalmente como descrito em anteriores trabalhos vinculados ao presente trabalho [3-4-6] e avulsos [5-7-8].

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

O método alternativo para o cálculo de \dot{m} consiste em inferir v da geometria de um perfil de temperatura calculado. A temperatura, dependente do tempo e da posição, possui uma distribuição característica que pode ser ilustrada na Figura 5, onde pode-se perceber três perfis de aquecimento e resfriamento esquemáticos, para diferente força motriz (*Driving Force*, DF), e um dos materiais do sistema da Figura 3.

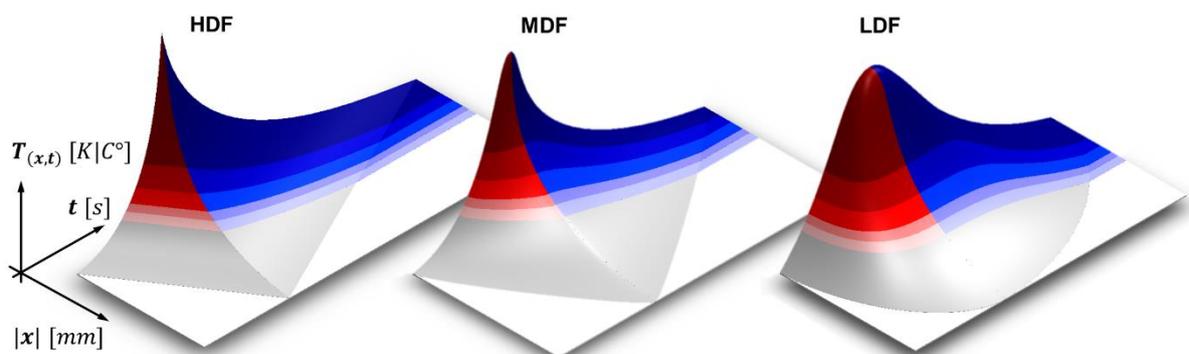


Figura 5. Esquemática do perfil de aquecimento (vermelho) e resfriamento (azul) em um sistema unidimensional para uma alta (H), média (M) e baixa (L) força motriz (DF).

A força motriz depende das condições iniciais, de contorno, do aporte de calor e das propriedades térmicas do material. O perfil LDF apresentado na Figura 5 é muito usado na literatura vinculada com processos SMAW, GMAW, FCAW e SAW [3]. O perfil MDF é usado mais amplamente em processos que não tem necessariamente energia elétrica como fonte principal de energia como o LBW ou o EBW onde o aporte de calor é muito concentrado (energia radiante aplicada diretamente na peça). No presente trabalho usa-se o perfil HDF porque representa um caso extremo onde as funções aparentes (funções solução utilizando um método de separação de variáveis) $T = f(x)$ e $T = g(t)$ possuem uma correlação constante.

Considerando um aquecimento conforme a Figura 5, é necessário um intervalo de tempo para que um ponto material próximo à interface e dentro do domínio $|x|$ perceba o aumento de temperatura pela condução de calor. Depois de um tempo adicional, este ponto terá suficiente energia térmica para iniciar a mudança nas propriedades microestruturais, formando a região afetada pelo calor.

Desta mesma forma, depois de outros intervalos de tempo, o ponto material entra no estado de fusão [9]. Este raciocínio é exemplificado na Figura 6 para um perfil HDF.

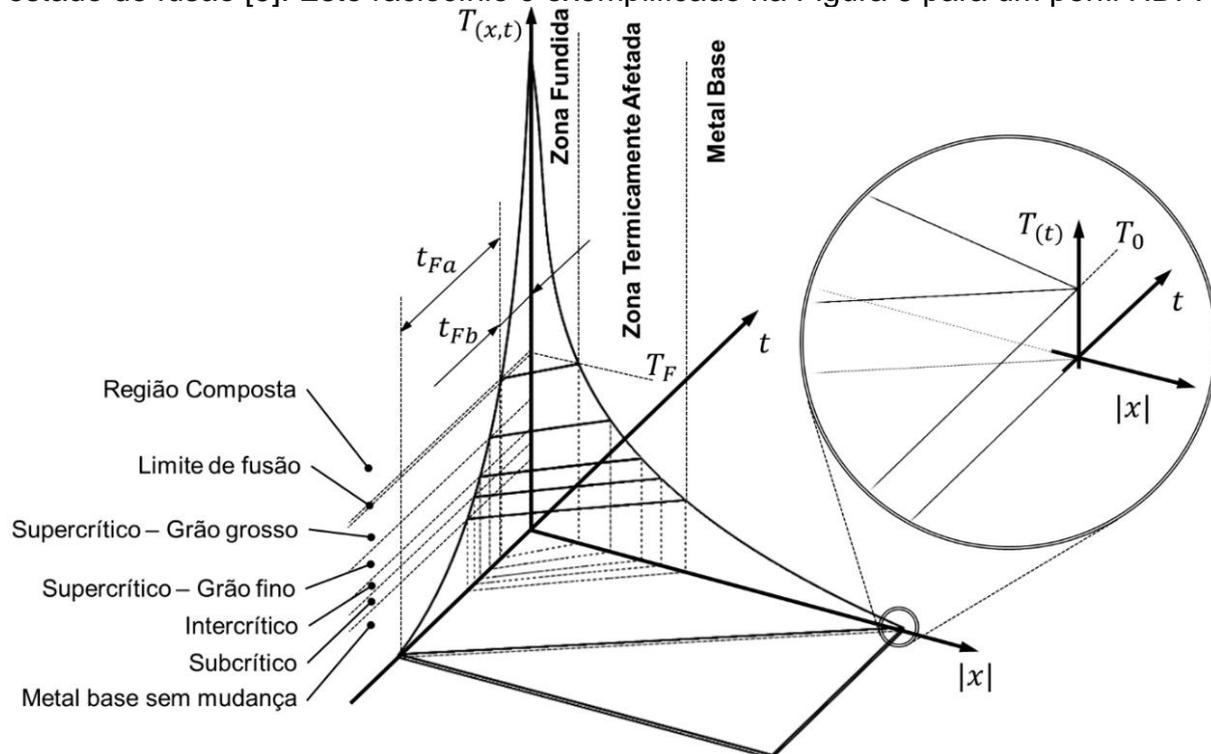


Figura 6. Regiões afetadas pelo calor no perfil de aquecimento HDF unidimensional.

Na Figura 6 mostra-se o instante de tempo onde os pontos na interface começam a fundir (t_{Fa}), tempo curto para a maioria dos processos. O tempo no qual os pontos na interface permanecem na fase líquida é definido como o tempo de compensação (t_{Fb}), necessário para compensar o material depositado (no caso dos processos GMAW, SMAW, FCAW, SAW e ESW/EGW) ou o material perdido (no caso do processo ERW, especialmente se tiver centelhamento). A Figura 7 ilustra como a velocidade de compensação pode ser inferida através da geometria do perfil de temperatura:

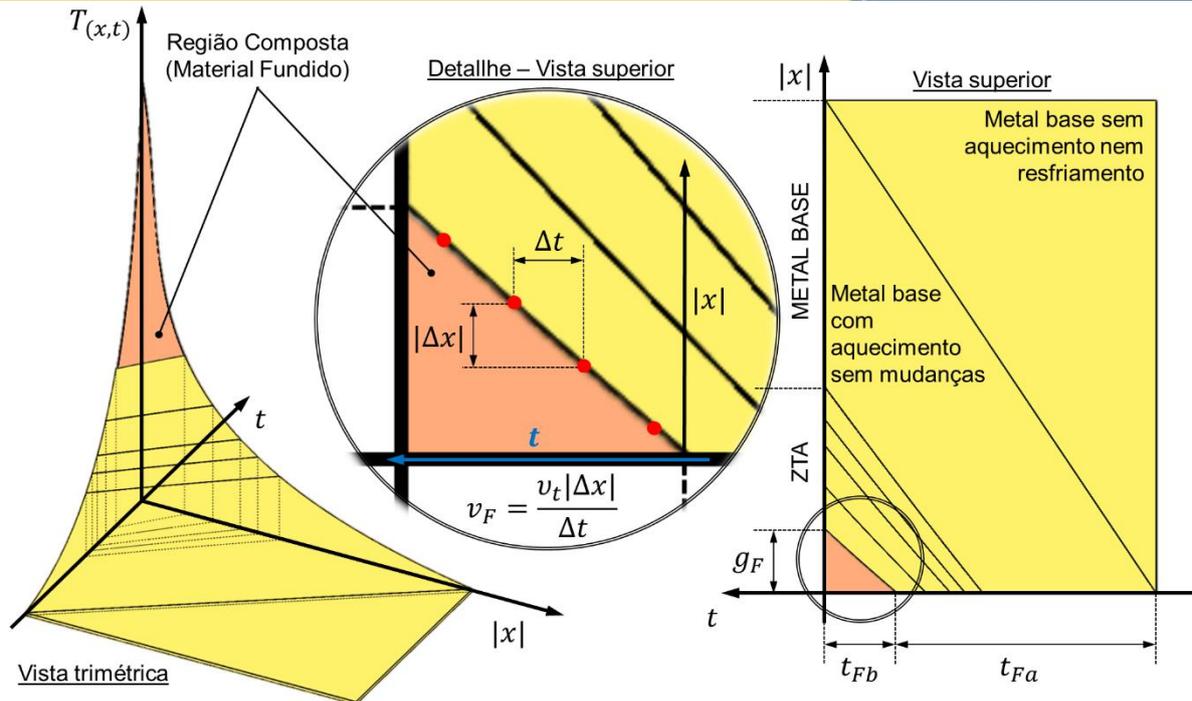


Figura 7. Discretização da velocidade de compensação/deposição (v) através da geometria do perfil de aquecimento HDF unidimensional.

Se os tempos t_{Fa} e t_{Fb} podem ser representados como uma sucessão conhecida e constante de Δt (o passo temporal no modelo matemático), então existe uma função acumulativa que depende do tempo (v_t) capaz de quantificar uma sucessão conhecida não necessariamente constante de Δx (o passo espacial no modelo matemático). Assim, conforme ilustra a Figura 7, a velocidade de compensação é discretizada.

A função acumulativa calcula um número natural, existindo uma função acumulativa diferente para cada material ($(v_t)_R$ e $(v_t)_S$) pelo fato de cada material alcançar a temperatura de fusão (T_F - Figura 6) em tempos diferentes. Note-se que a velocidade de compensação ($v = f(v_t)$) não pode ser negativa (os eletrodos não se afastam) e que, depois do tempo t_{Fa} , a função acumulativa é sempre maior ou igual a zero.

Computacionalmente, é possível definir uma condicionante que armazene em uma variável a quantidade de diferenças finitas que atingiram a T_F . A velocidade de compensação pode ser calculada segundo a Equação 2 [3]:

$$v = \left(\frac{d}{dt}g_F\right)_R + \left(\frac{d}{dt}g_F\right)_S \cong v_{t \times 1} = \left(\frac{v_t \Delta x}{\Delta t}\right)_R + \left(\frac{v_t \Delta x}{\Delta t}\right)_S = \frac{\Delta x}{\Delta t} [(v_t)_R + (v_t)_S] \quad (2)$$

Onde $v_{t \times 1}$ é o vetor velocidade de compensação, que armazena valores de v para cada passo Δt . A aplicação deste raciocínio, no modelo matemático desenvolvido em anteriores trabalhos, pode ser resumida nos seguintes três passos: ($T_{(t)} = T_0 \ll T_F$)

$$\#1: \quad T_{(t+\Delta t)_{i_{n \times 1}}} \cong \Delta t \left(I_{n \times n} \cdot D_{(t)_{i_{n \times 1}}} \right)_{n \times n}^{-1} \left(g_{(t)_i} - p_{(t)_i} + TL_i + TNL_i \right)_{n \times 1} + T_{(t)_{i_{n \times 1}}} \quad (3)$$

$$\#2: \quad t := t + \Delta t \begin{cases} 0 \geq t > t_{Fa} & \rightarrow T_{(t)_{i_{n \times 1}}} < T_F \quad \forall n \\ t_{Fa} \geq t \geq t_{Fa} + \Delta t & \rightarrow T_{(t)_{i_{n \times 1}}} \geq T_F \quad \forall n \geq 1 \\ t_{Fa} > t \geq t_{Fa} + t_{Fb} & \rightarrow T_{(t)_{i_{n \times 1}}} > T_F \quad n = v_t \end{cases} \quad (4)$$

$$\#3: \quad v_t = n \rightarrow v_{t \times 1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \sum [v_t]_{R|S} \leftarrow v_{t \times 1} = 0 \quad \forall t < \min [(t_{Fa})_R, (t_{Fa})_S] \quad (5)$$

Os passos 1 e 2 devem ser resolvidos para cada material R e S independentemente. A Equação 3 é a forma pronta para implementação [3], onde i é o índice de diferença finita com domínio: $(i - 1)[i, i + 1, \dots, n - 1, n](n + 1)$, como mostra na Figura 4, e n é quantidade de diferenças finitas (n_R e n_S , para cada material). O termo D é o produto do calor específico vezes a densidade, discretizadas e vetorizadas (ρCp), e TN e TNL são os Termos Lineares e Termos Não Lineares, respetivamente [3-6]. O termo I é a matriz identidade que diagonaliza D ; o símbolo “.” denota produto escalar. O termo T é a temperatura a calcular ($t + \Delta t$) baseada numa temperatura anterior (t). As impedâncias da Figura 3 estão inseridas no termo de geração de calor g , e a impedância de interface atua como condição de contorno transitória em $i = 0$. O termo p representa as perdas de calor por unidade de volume, que são modeladas como perdas por convecção [4]. A precisão de $T_{(t+\Delta t)}$ é maior se $\Delta x \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$.

A Figura 8 ilustra graficamente a adaptação da Figura 4 nos processos cuja velocidade de compensação é aplicada predominantemente no terminal/eletrodo S .

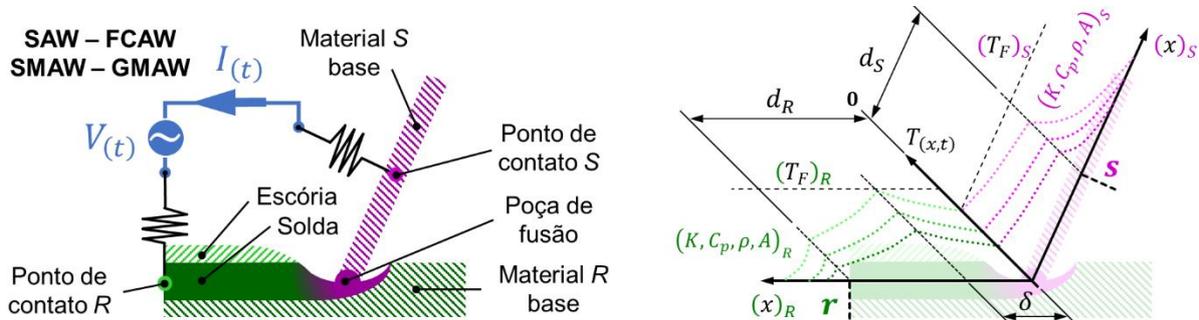


Figura 8. Adaptação do modelo ERW nos processos SAW, FCAW, SMAW e GMAW.

Aplica-se a simulação computacional no processo ERW objetivando generalizar o problema, porque no teste da velocidade de compensação no material R , a resposta do programa para os processos de soldagem SAW, FCAW, SMAW e GMAW careceria de sentido prático. Os valores iniciais, condições de contorno e outros dados de entrada para o modelo computacional são resumidos nas Tabelas 1 e 2 [3-6]:

Tabela 1. Temperatura de fusão e valores iniciais das variáveis dependentes da temperatura

Material	Temperatura de fusão $T_F [K]$ $T_0 = 900 [K]$	Densidade $\rho_0 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$	Calor Específico $Cp_0 \left[\frac{J}{Kg K} \right]$	Condutividade Térmica $K_0 \left[\frac{W}{m K} \right]$	Resistividade elétrica $\Omega_0 [\Omega m]$	Área $2L \times 2M$ $[mm^2]$
R	980	7700.0	470.0	47.0	1.7E-7	4800
S	930	7500.0	450.0	45.0	1.5E-7	4800

Tabela 2. Modelo matemático das variáveis dependentes da temperatura

Variável	Função: $f(T_{(x,t)})$	a_R	a_S	b_R	b_S	Eq.
Densidade:	$\rho_{(T)} = \rho_0 - a(T - T_0)^b$	2.7E-3	2.5E-3	2.0	2.0	(6)
Calor Específico:	$Cp_{(T)} = Cp_0 + a e^{bT}$	17	15	1E-3	1E-3	(7)
Condutividade térmica:	$K_{(T)} = a(T - T_0)^b + K_0$	7E-5	5E-5	2.0	2.0	(8)
Resistividade elétrica:	$\Omega_{(T)} = \Omega_0 + a e^{bT}$	1E-5	1E-5	1.7E-3	1.5E-3	(9)
Perdas de calor por convecção:	$p_{(T)} = a \frac{L + M}{2LM} (T - T_\infty)^b$	3.7E-5	3.5E-5	2.0	2.0	(10)

A temperatura de pré aquecimento T_0 é a referência dos valores iniciais. Temperatura ambiente T_∞ é 25.0 [C°]

A geometria dos materiais, na Tabela 1, é referente a uma chapa de 4 mm de espessura e 1200 mm de largura. Este formato minimiza o efeito pelicular da frequência de rede e também as perdas bi ou tri-térmicas de calor por condução [8]. Para evitar conflitos com os sinais dos termos de fluxo de calor, na hora de fazer um balanço para aplicar condições de contorno na interface, por convenção se define o material com maior temperatura de fusão sempre à esquerda (material *R*) [3].

2.2 Resultados

Uma primeira simulação, descrita na Figura 9, mostra o comportamento do perfil de temperatura em uma soldagem *Flash-Butt* (na etapa de centelhamento) utilizando 25 kA em 48 s de simulação. O comprimento ativo do material é definido em 40 cm (valor comumente usado em equipamentos de soldagem ERW-FB) em um domínio de 1 m para cada material *R* e *S*. Na Figura 10 se realiza uma simulação semelhante utilizando 20 kA e o objetivo é apresentar quatro possíveis tipos de perfil resultantes.

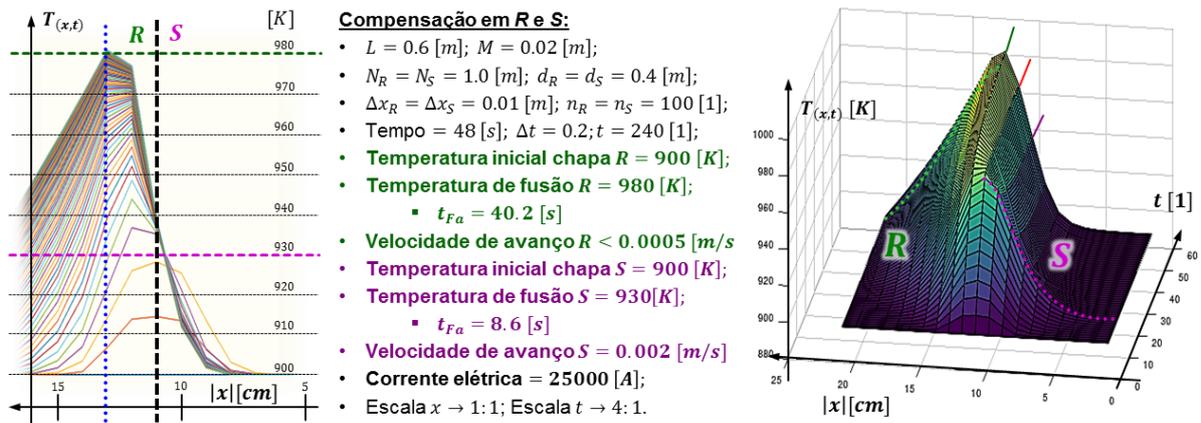
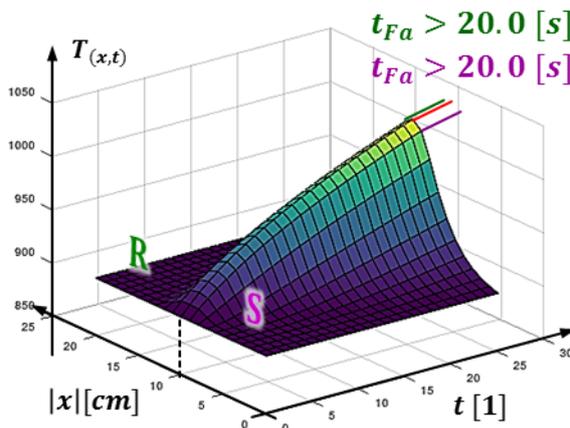
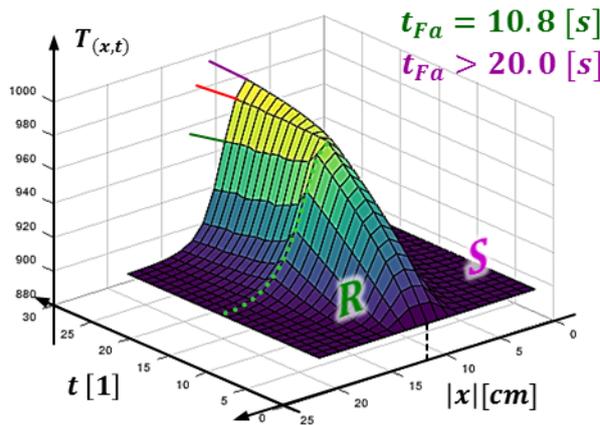


Figura 9. Perfil de temperatura característico na simulação do processo *Flash-Butt*.



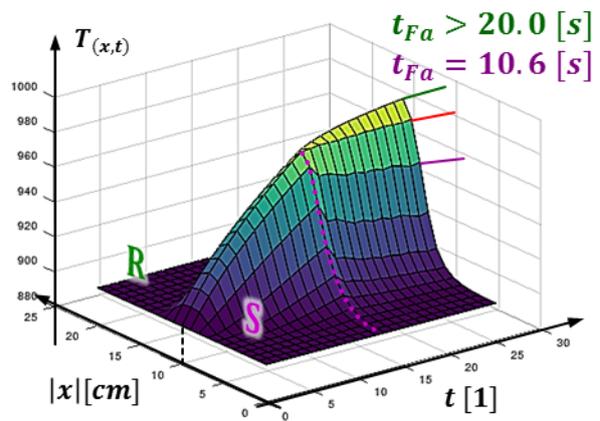
1.- Sem velocidade de compensação:

- $L = 0.6 [m]$; $M = 0.02 [m]$;
- $N_R = N_S = 1.0 [m]$; $d_R = d_S = 0.4 [m]$;
- $\Delta x_R = \Delta x_S = 0.01 [m]$; $n_R = n_S = 100 [1]$;
- Tempo = 20.0 [s]; $\Delta t = 0.2$; $t = 100.0 [1]$;
- Temperatura inicial chapa *R* = 900 [K];
- Temperatura inicial chapa *S* = 900 [K];
- Temperatura de fusão *R* = $\infty [K]$;
- Temperatura de fusão *S* = $\infty [K]$;
- Corrente elétrica $I(t) = 20 [kA]$;
- Escala $x \rightarrow 1:1$; Escala $t \rightarrow 4:1$.



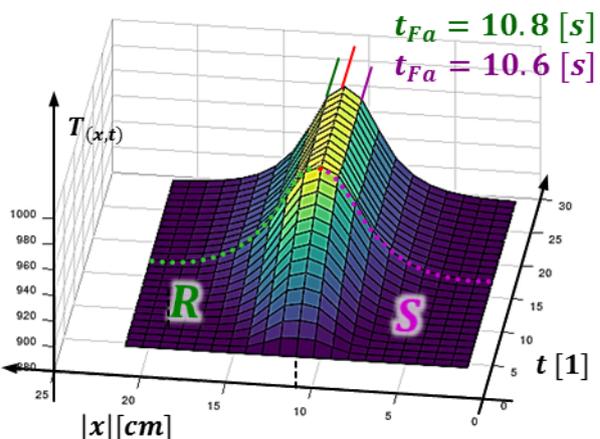
2.- Compensação no material R:

- $L = 0.6 [m]$; $M = 0.02 [m]$;
- $N_R = N_S = 1.0 [m]$; $d_R = d_S = 0.4 [m]$;
- $\Delta x_R = \Delta x_S = 0.01 [m]$; $n_R = n_S = 100 [1]$;
- Tempo = 20.0 [s]; $\Delta t = 0.2$; $t = 100.0 [1]$;
- Temperatura inicial chapa R = 900 [K];
- Temperatura inicial chapa S = 900 [K];
- **Temperatura de fusão R = 980 [K];**
- **Temperatura de fusão S = ∞ [K];**
- Corrente elétrica $I(t) = 20 [kA]$;
- Escala $x \rightarrow 1:1$; Escala $t \rightarrow 4:1$.



3.- Compensação no material S:

- $L = 0.6 [m]$; $M = 0.02 [m]$;
- $N_R = N_S = 1.0 [m]$; $d_R = d_S = 0.4 [m]$;
- $\Delta x_R = \Delta x_S = 0.01 [m]$; $n_R = n_S = 100 [1]$;
- Tempo = 20.0 [s]; $\Delta t = 0.2$; $t = 100.0 [1]$;
- Temperatura inicial chapa R = 900 [K];
- Temperatura inicial chapa S = 900 [K];
- **Temperatura de fusão R = ∞ [K];**
- **Temperatura de fusão S = 978 [K];**
- Corrente elétrica $I(t) = 20 [kA]$;
- Escala $x \rightarrow 1:1$; Escala $t \rightarrow 4:1$.



4.- Compensação em R e S:

- $L = 0.6 [m]$; $M = 0.02 [m]$;
- $N_R = N_S = 1.0 [m]$; $d_R = d_S = 0.4 [m]$;
- $\Delta x_R = \Delta x_S = 0.01 [m]$; $n_R = n_S = 100 [1]$;
- Tempo = 20.0 [s]; $\Delta t = 0.2$; $t = 100.0 [1]$;
- Temperatura inicial chapa R = 900 [K];
- Temperatura inicial chapa S = 900 [K];
- **Temperatura de fusão R = 980 [K];**
- **Temperatura de fusão S = 978 [K];**
- Corrente elétrica $I(t) = 20 [kA]$;
- Escala $x \rightarrow 1:1$; Escala $t \rightarrow 4:1$.

Figura 10. Quatro perfis de temperatura como resultados possíveis independentes do processo. A segunda etapa da simulação, descrita nas Figuras 11 e 12, em uma soldagem SMAW (metodologia equivalente para processos GMAW, FCAW e SAW) utilizando 1 kA em 48 s de simulação, mudando a proporção da geometria das peças a serem soldadas, usa-se uma seção circular. O comprimento ativo do material é definido também em 40 cm em um domínio de 1 m para cada material R e S.

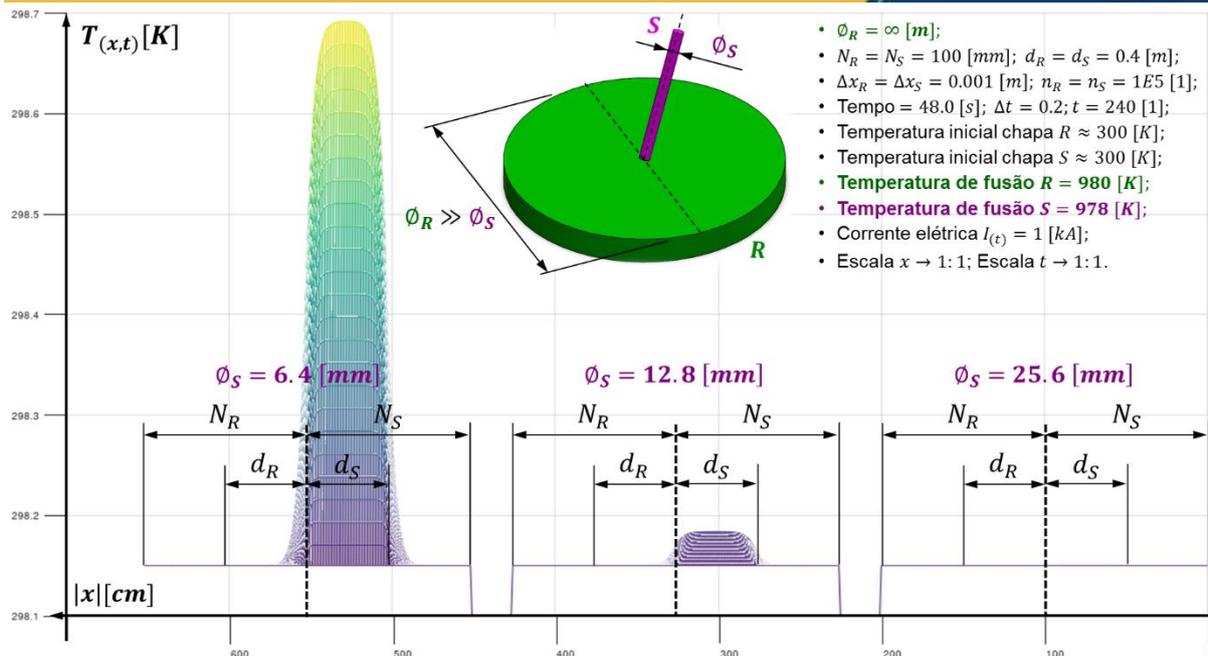


Figura 11. Vista frontal de três perfis de temperatura em uma soldagem SMAW onde a peça de trabalho é muito maior ao diâmetro do eletrodo.

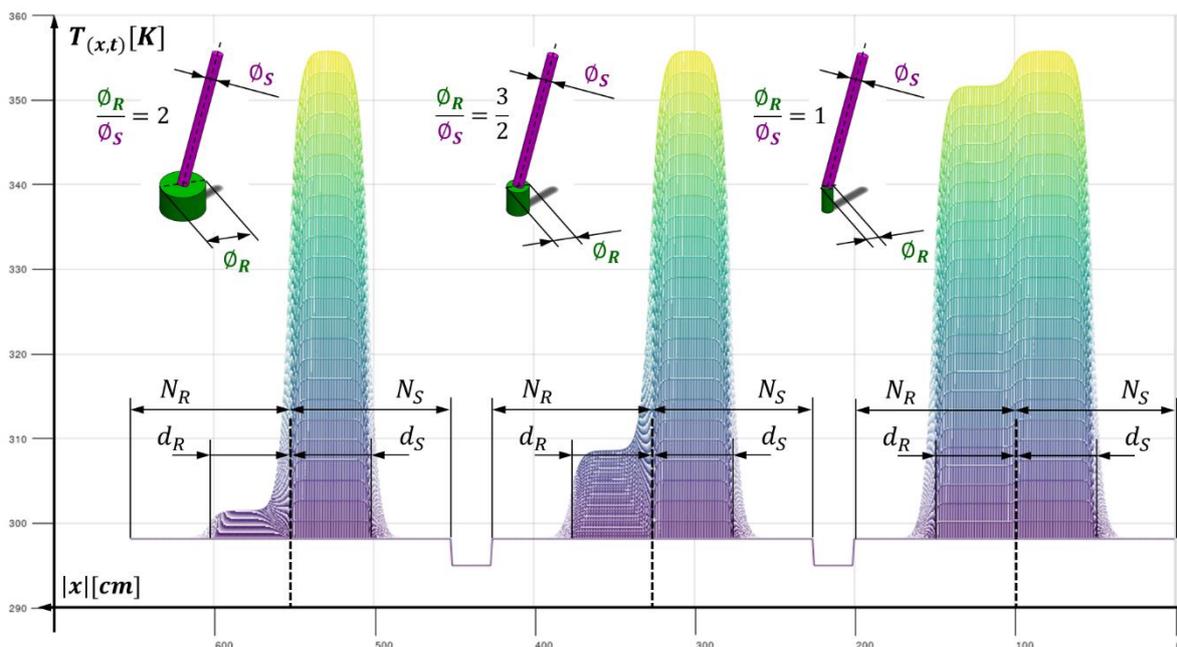


Figura 12. Vista frontal de três perfis de temperatura em uma soldagem SMAW onde a peça de trabalho e o eletrodo tem uma proporção semelhante em tamanho

No exemplo da Figura 12 usa-se os mesmos dados do exemplo da Figura 11. Aplicando a condicionante vinculada à Equação 2, descrita anteriormente, e utilizando o método de armazenamento de valores do vetor vinculado a v , na Equação 4, pode-se gerar o gráfico característico das velocidades de compensação para cada material. A Figura 13 ilustra estes gráficos, com base no quarto caso da Figura 10.

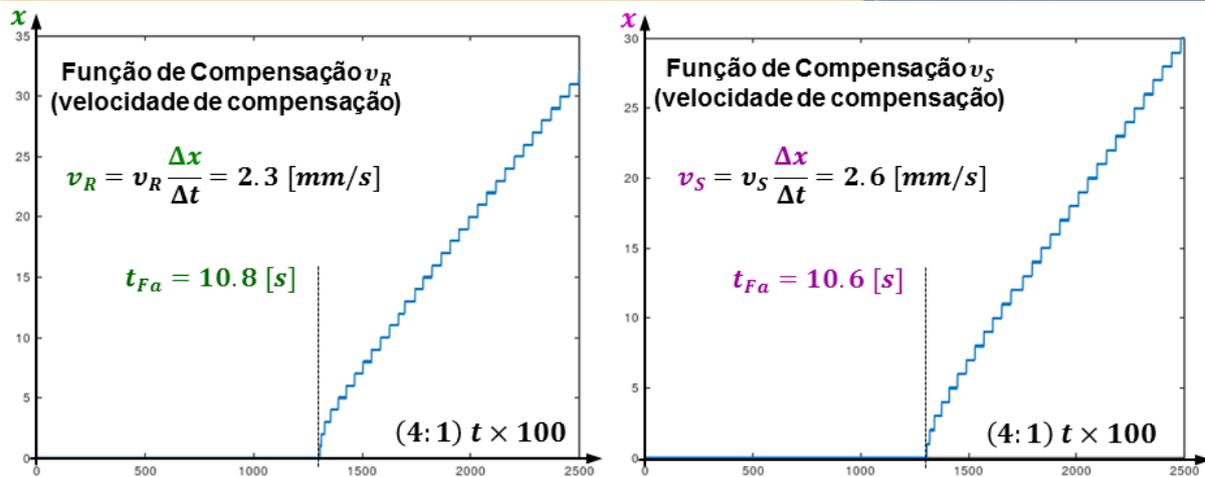


Figura 13. Curva do Deslocamento relativo frente o Tempo dos eletrodo R (esquerda) e S (direita)

Para poder gerar as curvas da Figura 13, o Δt deve ser 100 vezes menor do que o valor original mostrado nas Figuras 9 e 10, isto aumenta o tempo de processamento para mais de 20 minutos por gráfico (utilizando um computador i3 com 2,4 GHz por núcleo, 4 GB de memória RAM, código não vetorizado, sem multisserviço nem multitarefa). As curvas Deslocamento vs Tempo para os exemplos das outras figuras não são apresentados por possuírem um comportamento muito semelhante.

Não se faz o cálculo para determinar os valores numéricos de \dot{c} ou \dot{m} , porque os valores das Tabelas 1 e 2 não representam algum material em específico, carecendo da possibilidade de fazer comparações quantitativas [3]. Logo, conhecendo a Equação 2 e os dados da Figura 13, o cálculo de \dot{m} torna-se simples. Conhecendo a velocidade necessária para compensação, independentemente do processo, a determinação da energia mecânica a aportar (E_{mec}) também torna-se uma tarefa trivial. Este procedimento se apresenta na Equação 11 a seguir:

$$\frac{d}{dt}v \cong a_{t \times 1} \frac{v_{(t+1) \times 1} - v_{(t) \times 1}}{\Delta t} \rightarrow Ma_{t \times 1} = F_{t \times 1} \rightarrow F_{t \times 1} \cdot v_{t \times 1} \Delta t \cong E_{mec_{t \times 1}} \quad (11)$$

2.3 Discussão

A taxa de deposição pode ser estimada utilizando o método alternativo apresentado neste trabalho. No entanto, não seria justificável montar um complexo modelo matemático computacional somente com este objetivo, sendo que o perfil de temperatura e seu comportamento podem ser usados para a determinação de outras propriedades e características da soldagem.

A característica de maior importância descrita no presente trabalho é a possibilidade de converter variáveis independentes (do ponto de vista técnico do processo) vinculadas ao aporte de energia mecânica, como a taxa de deposição e velocidade de compensação, para dependentes como função de outras variáveis independentes vinculadas à fonte de energia elétrica. Uma vantagem adicional do método apresentado é a capacidade de estimar valores ótimos (pelo menos em teoria, que serve como referência) para as variáveis mecânicas de compensação baseadas na principal fonte de energia.

A generalização e simplificação dos processos, baseada implicitamente no método da desagregação tecnológica (*Technological Disaggregation*, TD), como se mostra nas Figuras 2 a 4, simplificam a abordagem do problema com os métodos de modelagem computacional. É importante ressaltar que este desenvolvimento não precisa ser resolvido exclusivamente pelo método das diferenças finitas.

Adicionalmente a conceitualização do perfil de temperatura da Figura 4 torna-se um padrão de resposta generalizado para qualquer sistema $1D$ de soldagem que acopla dois materiais com propriedades eletrotérmicas e geométricas diferentes. Um exemplo é a adaptação mostrada na Figura 8 para um caso SMAW, o qual tem potencial para representar outros processos importantes como o GMAW, FCAW e SAW com pequenas modificações no modelo. O mesmo modelo matemático computacional foi usado para alcançar os resultados das Figuras 9 e 10 (processo ERW-FB) e Figuras 11 e 12 (processo SMAW), sendo necessário somente a especificação de seções transversais diferentes: retangular e circular, respetivamente. Para ambos casos, ERW e SMAW, o perfil de temperatura descreve o comportamento que os sistemas de soldagem experimentam na realidade.

Nas simulações do processo ERW-FB pode-se perceber que ambos terminais (R e S) possuem uma carga eletrotérmica próxima, permitindo um perfil de temperatura distribuído em ambas as regiões. É importante ressaltar a presença da defasagem entre o perfil dos valores máximos de temperatura e a interface da solda; esta defasagem é dependente exclusivamente da temperatura de fusão de cada material como mostra-se na Figura 10, onde a compensação do material sempre acontece na região oposta à dita defasagem, como estudado em trabalhos anteriores [3]. Os resultados da Figura 10 comprovam a teoria base do método, resumindo os tipos possíveis de resposta em quatro casos com as seguintes características: O primeiro e segundo caso, *sem compensação e com compensação no material R*, são teóricos; o terceiro caso, *com compensação no material S*, é o caso genérico para os processos GMAW, SMAW, FCAW e SAW, precisando poucas modificações para representar o caso ESW/EGW; o quarto caso, *com compensação em R e S*, é genérico para o processo ERW com um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 9.

Nas simulações do processo SMAW da Figura 11, pode-se perceber que ambos terminais (R e S) possuem uma carga eletrotérmica distinta, gerando um perfil de temperatura totalmente deslocado para a região S , a qual representa o eletrodo revestido. É importante esclarecer que isto somente acontece em um tempo inicial de soldagem, pois na medida que o eletrodo revestido alcança a temperatura de fusão o material da região R também aquece, mudando o perfil térmico para uma situação semelhante às simulações da Figura 12. O tempo de simulação e a corrente elétrica aplicadas aos sistemas da Figura 11, independentemente do diâmetro do eletrodo, deveriam ter calculado perfis com maiores temperaturas máximas para serem compatíveis com experiências reais, isto deve ser aprimorado em trabalhos futuros. No entanto, analisando somente o comportamento dos perfis da Figura 11, tem-se um caso comum onde a peça de trabalho é muito maior do que o eletrodo, sendo este último o único consumível, o qual justifica ter um perfil totalmente deslocado na região S . Adicionalmente, nota-se que para uma mesma corrente elétrica, é mais fácil consumir um eletrodo de diâmetro menor do que um eletrodo mais de maior diâmetro.

Nas simulações do processo SMAW da Figura 12, se a proporção entre ambos os terminais é mais parecida, contrastando o caso da Figura 11, o comportamento dos perfis de temperatura possui uma distribuição que tende a ser mais equilibrada para ambas as regiões. Estas simulações foram feitas com base nos mesmos parâmetros base das simulações da Figura 11, como detalha-se na mesma.

Adicionalmente, para os resultados das Figuras 11 e 12, é importante ressaltar que por causa da unidimensionalidade do planeamento do problema, segundo a Figura 8, não interessa o ângulo formado entre ambos os terminais. No caso ERW-FB as

duas chapas podem não compartilhar o mesmo plano, e no caso SMAW, o ângulo de ataque do eletrodo não é relevante. Isto não é válido para problemas 2D ou 3D. Na Figura 13 se apresentam as velocidades de compensação em ambas as peças em um processo ERW-FB. Para um processo SMAW somente existe a curva da direita, porque o material R funde mais não deve ser compensado. As curvas obtidas como resultado, possuem o mesmo comportamento, com uma tendência à natureza LDF no início do movimento relativo. As curvas calculadas expressam o movimento teórico ótimo relativo entre ambos os terminais, os quais servem como referência para o dimensionamento dos parâmetros do processo real. Um sobredimensionamento da velocidade relativa significa um aporte adicional de energia mecânica, aplicando uma pressão entre as peças, a qual é vantajosa (ou não) segundo o processo.

3 CONCLUSÃO

É possível criar um método alternativo para a determinação da taxa de deposição e/ou velocidade de compensação em processos de soldagem por fusão, baseado em um modelo matemático computacional. O planeamento do problema e interpretação dos resultados requer um vínculo próximo com o processo a ser estudado. Segundo explicações em parágrafos anteriores, se inferem as seguintes conclusões:

- A energia mecânica pode ser calculada em função da energia elétrica. Variáveis importantes como v e \dot{m} são dependentes da $I_{(t)}$ e propriedades do material. O tipo de dependência é capturado no comportamento do perfil de temperatura.
- A resolução do passo temporal do modelo deve ser muito pequena para poder traçar uma curva representativa de v e conseqüentemente calcular \dot{m} . Isto se justifica quando o perfil é calculado objetivando resultados de maior importância.

REFERÊNCIAS

- 1 Robert W. Messler, Jr. Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy. Troy: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 1999.
- 2 American Welding Society. Welding Handbook – Welding Processes, Part 1. Volume 2. Miami: AWS; 2004.
- 3 Sergio C. Calvimontes. Modelamento matemático do perfil de temperatura no processo de soldagem Flash-Butt nos aços DP600. Volta Redonda: Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense; 2018.
- 4 Sergio C. Calvimontes, A. J. O. Cabral, Adauto M. Assis. Sheet format steel Flash-Butt welding variables inquiry for mathematical modeling. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2017; 9: 100.
- 5 Yasutomo Ichiyama, Shinji Kodama. Flash-Butt Welding of High Strength Steels. Nippon Steel Technical Report. 2007; 1: 1-8.
- 6 Sergio C. Calvimontes, Renan F. D. Lopes. Stability matrix and boundary condition computational implementation alternative to the Finite Differences Method for Cartesian Thermal Problems resolution involving isotropic materials. Encontro Nacional de Modelagem Computacional. 2018; 21.
- 7 Nissandro Domingues. Soldabilidade por Centelhamento do Aço Dual Phase 780. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidad Federal de Minas Gerais; 2013.
- 8 Luiz F. Sotero. Implementação de um modelo numérico computacional para simulação do processo de soldagem por centelhamento aplicado a trilhos ferroviários: Análise termo-eletromagnética. Juiz de Fora: Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora; 2017.

- 9 Ramazani A., Mukherjee K., Abdurakhmanov A., Reisgen U. Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding. Aachen: Department of Ferrous Metallurgy & Welding and Joining Institute RWTH. Computational Material Science. 2013; 68: 107-116.