

ANÁLISE DO PERFIL DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM FLASH-BUTT DE MATERIAIS DISSIMILARES, BASEADA EM UM MODELO MATEMÁTICO*

Sergio Cordero Calvimontes¹

Antônio José Oliveira Cabral²

Rafaella Martins Ribeiro³

Resumo

Através de um processo de simplificação do problema que envolve o processo FBW (*Flash-Butt Welding*), é possível criar e implementar computacionalmente um modelo matemático na plataforma Octave®, para analisar o comportamento do perfil de temperatura na soldagem de materiais dissimilares. Faz-se uma comparação analítica dos resultados obtidos com os resultados de trabalhos experimentais de caracterização deste tipo de soldagem.

Palavras-chave: Modelo matemático; ERW-FBW; Defasagem Térmica; Octave®.

THERMAL PROFILE ANALYSIS APPLIED IN A DISSIMILAR FLASH-BUTT WELDING, BASED IN A MATHEMATICAL MODEL

Abstract

Using a problem simplification process involving Flash-Butt Welding, it is possible to create and computationally implement a mathematical model on the Octave® platform, in order to analyze the thermal profile behavior in dissimilar welding. An analytic comparison is done using the implementation results and the results of Flash-Butt Welding experimental characterization research.

Keywords: Mathematical modeling; ERW-FBW; Thermal Shift; Octave®.

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

² 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.

³ Engenheira Metalúrgica, Doutora, Professora do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por resistência elétrica (*Electric Resistance Welding*, ERW) tem uma variante para solda de topo conhecida como soldagem por centelhamento (*Flash-Butt Welding*, FBW) aplicada em linhas de produção contínuas [1]. Da mesma forma que o processo ERW pode ser representado aplicando uma desagregação tecnológica (*Technological Disaggregation*, TD), o processo FBW também pode ser conceituado conforme é mostrado na Figura 1 [2].

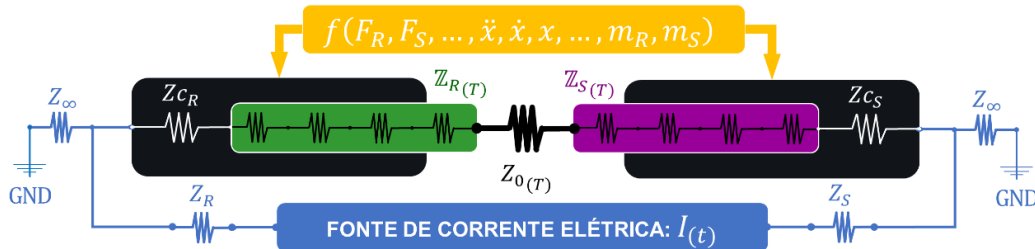


Figura 1. Conceitualização unidimensional do processo de soldagem FBW.

O sistema FBW possui os circuitos mecânico e elétrico superpostos aportando energia ao sistema, onde o elétrico aquece o material pelo efeito *Joule*, e o mecânico se aplica nas etapas de centelhamento e de recalque [1]. A Figura 1 apresenta a Impedância de Interface Z_0 , de natureza instável no centelhamento, e os Arranjos de Impedâncias Z_R e Z_S . Estes valores são os principais transformadores de energia elétrica em energia térmica através da passagem de uma corrente elétrica I que muda no tempo. Na mesma figura apresentam-se as impedâncias de contato Z_{cR} e Z_{cS} , impedâncias dos condutores elétricos que conectam a fonte de energia com os eletrodos Z_R e Z_S e as impedâncias de isolamento do circuito $Z_{R\infty} \sim Z_{S\infty} \sim Z_{\infty}$. Para este trabalho, estas impedâncias adotam valores padrão como variáveis em estado estável [1].

Aplica-se um modelo matemático na soldagem de materiais dissimilares, baseado na equação da condução de calor no caso unidimensional isotrópico, não homogêneo, com coeficientes dependentes, com forçamento e perdas. Cujas soluções são obtidas usando o método das diferenças finitas centralizadas, segundo a Equação 1 [3]:

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

Onde i é o índice de diferença finita com domínio: $(i - 1)[i, i + 1, \dots, n - 1, n](n + 1)$, sendo diferente por cada material, e n é quantidade de diferenças finitas por cada material. A discretização temporal aplica um tempo diferencial Δt constante; a precisão é maior se $\Delta x \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$. O termo D é o produto do calor específico vezes densidade, também discretizadas e vetorizadas ($\rho C p$), e TN e TNL são os Termos Lineares e Termos Não Lineares respectivamente. O termo I é a matriz identidade que diagonaliza D ; o símbolo “ \cdot ” denota produto escalar. O termo T é a temperatura a calcular $(t + \Delta t)$ baseada numa temperatura anterior (t) . As impedâncias da Figura 1 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 [3].

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) [1].

O objetivo do presente trabalho é analisar o perfil de temperatura obtido utilizando o modelo matemático resumido acima e comparar este com os resultados de dois trabalhos acadêmicos que caracterizam a solda *Flash-Butt* em materiais dissimilares.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

Considerando a componente resistiva do sistema de impedâncias descrito na Figura 1, a resistência equivalente pode ser calculada usando a Equação 2 [3]:

$$R_{eq} = R_R + R_{C_R} + R_R + R_0 + R_S + R_{C_S} + R_S \leftarrow R_R = \sum_{i=1}^r R_{(T)_i}; R_S = \sum_{i=1}^s R_{(T)_i} \quad (2)$$

A impedância (resistência) de interface R_0 , é a condição de contorno transitória que vincula as diferenças finitas do material R e S próximas à interface. Assumindo que existe uma continuidade de propriedades neste ponto, o valor numérico da impedância de interface pode ser calculado pela média entre as impedâncias contíguas em R e S , recorrendo assim ao caso da força motriz média (*Medium Driving Force*, MDF) o qual, segundo estudos anteriores, simplifica o problema permitindo desconsiderar a natureza instável da impedância de interface [1]. Feita esta simplificação, o código do modelo matemático desenvolvido é implementado na plataforma Octave® (software gratuito semelhante ao MatLab®). O resultado é uma matriz cujas colunas são perfis de temperatura em distribuição espacial; cada linha é a evolução de temperatura de cada ponto ou diferença finita em função do tempo [3]. As Tabelas 1 e 2, resumem valores iniciais e de contorno relevantes para o modelo:

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

| Material | Temperatura de fusão $T_F [C^\circ]$ | 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 | 1253.0 | 7700.0 | 470.0 | 47.0 | 1.7E-7 | 4800 |
| S | 1203.0 | 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 | (3) |
| Calor Específico: | $Cp_{(T)} = Cp_0 + a e^{bT}$ | 17 | 15 | 1E-3 | 1E-3 | (4) |
| Condutividade térmica: | $K_{(T)} = a(T - T_0)^b + K_0$ | 7E-5 | 5E-5 | 2.0 | 2.0 | (5) |
| Resistividade elétrica: | $\Omega_{(T)} = \Omega_0 + a e^{bT}$ | 1E-5 | 1E-5 | 1.7E-3 | 1.5E-3 | (6) |
| 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 | (8) |

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, refere 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 o tri-térmicas de calor por condução [4]. Cabe ressaltar, que as componentes resistivas da Equação 2 são função da geometria da seção transversal e da resistividade elétrica apresentada na Tabela 2. Aplicando a lei de geração de calor por efeito *Joule* tem-se a Equação 9, que define uma relação matemática para a geração de calor interno g fora da interface de solda e dentro dos limites r e s (pontos onde são aplicados os eletrodos) [1].

$$G_{(t)_i} = g_{(t)_i} dV \rightarrow g_{(t)_i} = \frac{\mu^2 I_{(t)}^2 R_{(t)_i}}{4LM\Delta x} = \mu^2 I_{(t)}^2 \frac{1}{16L^2 M^2} \Omega_{(t)_i} \quad (9)$$

O coeficiente de recorte de onda μ é utilizado só na etapa de centelhamento, com o valor de 0.5 [6]. Implementa-se o modelo com um passo $\Delta t = 0.1$ em todas as etapas da soldagem, o domínio do tempo para cada etapa é o seguinte:

- Pré aquecimento: 60 s, 5000 A
- Centelhamento: 60 s, 20000 A
- Aquecimento intermédio ou tratamento térmico intermédio: 13 s, 0 A
- Recalque: 40 s, 0 A
- Pós aquecimento ou tratamento térmico: 200 s, 0 A

A distância diferencial se define em $\Delta x = 0.01$ constante e é igual para cada material; o domínio de n é de 200 cm para cada material (desde $i = 0$ até $i = n$), porém o comprimento de material ativo na geração de calor é 40 cm para cada material (desde $i = 0$ até $i = r|s$). Utiliza-se as funções *surf*, *surface*, *mesh*, e *contour* próprias do Octave® para plotar os perfis de temperatura (matrizes) gerados pelo modelo.

2.2 Resultados

O primeiro trabalho acadêmico a ser comparado, caracteriza a soldagem *Flash-Butt* de um aço DP600 (Material R) e um aço SAE1008 (Material S). O autor descreve que a região do aço bifásico não foi fundida durante o processo, havendo centelhamento [5]. O segundo trabalho acadêmico aborda o mesmo processo de soldagem entre um aço DP600 (Material R) e um aço SAE1015 (Material S), onde o autor descreve a existência de fusão em ambos os materiais, identifica-se uma mudança na dureza da região termicamente afetada do aço bifásico [6]. Como estes trabalhos não tem uma base de dados que armazena a variação da temperatura, a forma mais efetiva de fazer uma comparação com o modelo matemático é utilizando os perfis de dureza que cada estudo gerou. A Figura 2 reúne os dados dos dois trabalhos acadêmicos citados [5,6]:

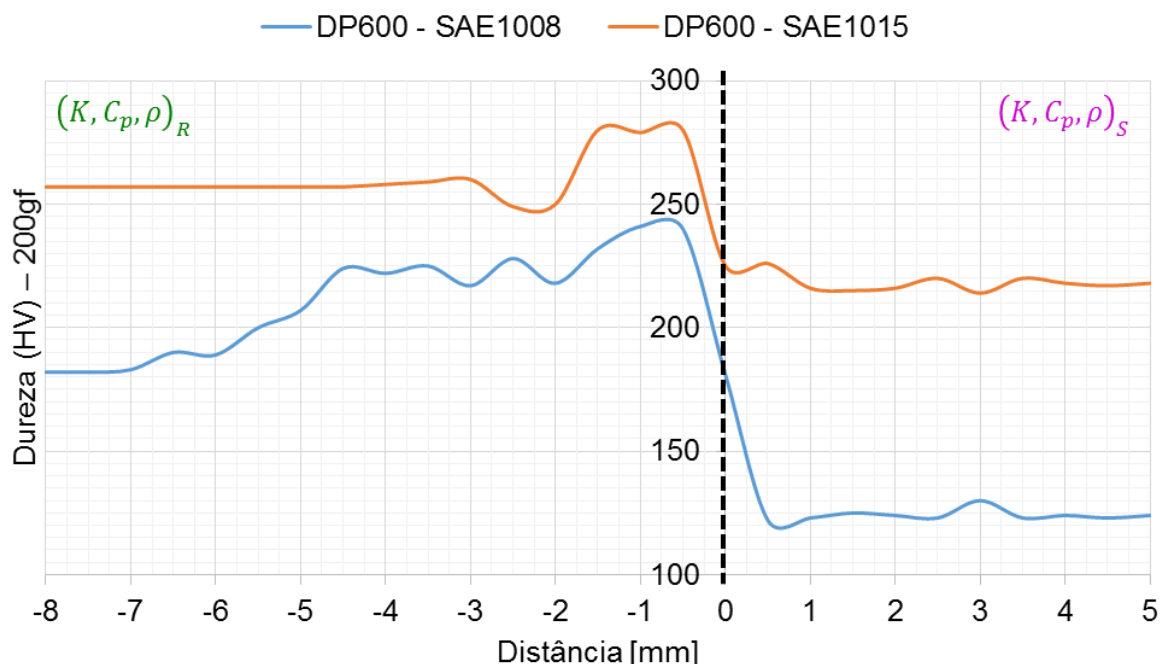


Figura 2. Microdureza HV de dois corpos de prova: DP600-SAE1008 [5] e DP600-SAE1015 [6].

Na Figura 2, com fins comparativos, a posição do perfil de dureza foi modificado a partir dos gráficos originais para uniformizar a escala e deixar os resultados

referentes ao aço bifásico à direita, conforme uma convenção previamente definida [2].

Objetivando introduzir um conceito que ajuda na geração de inferências e conclusões na análise dos perfis de temperatura, gera-se uma sequência de perfis usando o modelo matemático, que mostram a defasagem do perfil máximo de temperatura respeito à interface de solda. A Figura 3 mostra este fenômeno:

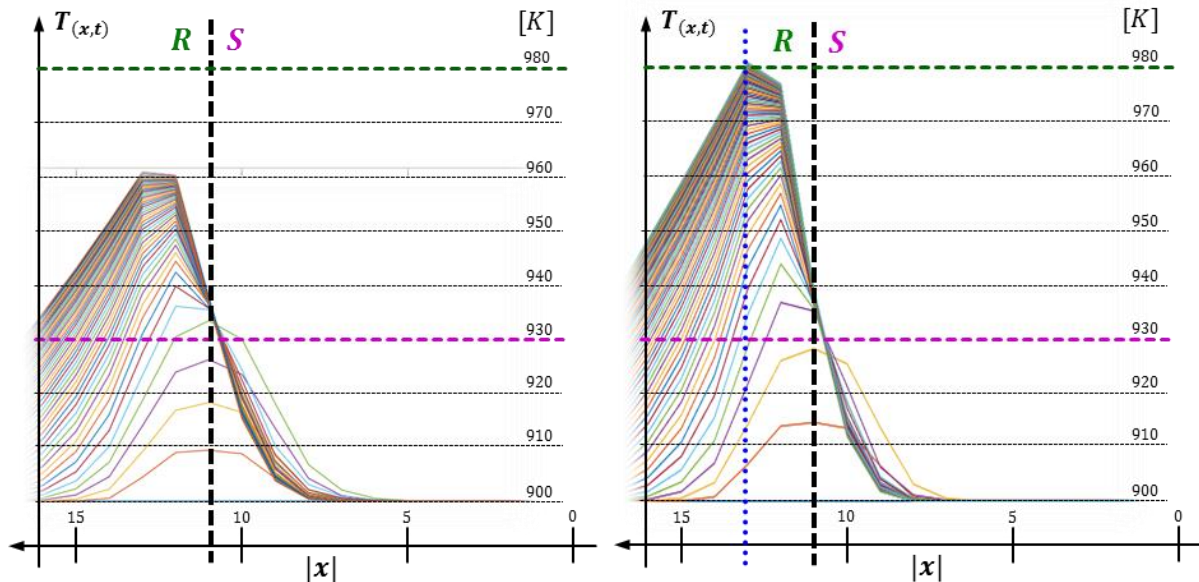


Figura 3. Defasagem do perfil máximo de temperatura na etapa de centelhamento em vista frontal, para 20 kA (esquerda) e 25 kA (direita).

A Figura 3 mostra dois perfis de temperatura obtidos com o modelo matemático na etapa de centelhamento quando esta chega no estado pseudo-estável [1]. Com propósitos explicativos se define uma temperatura de fusão de 980 K e 930 K para os materiais R e S respectivamente, em ambos gráficos, e a temperatura inicial em ambos casos se define em 900 K para ambos os materiais. A distância entre a linha azul e a interface da solda define-se como a defasagem do perfil máximo de temperatura.

Aplicando no modelo as cinco etapas definidas do processo *Flash-Butt Welding*, o resultado da simulação se mostra em uma vista lateral e vista superior na Figura 4:

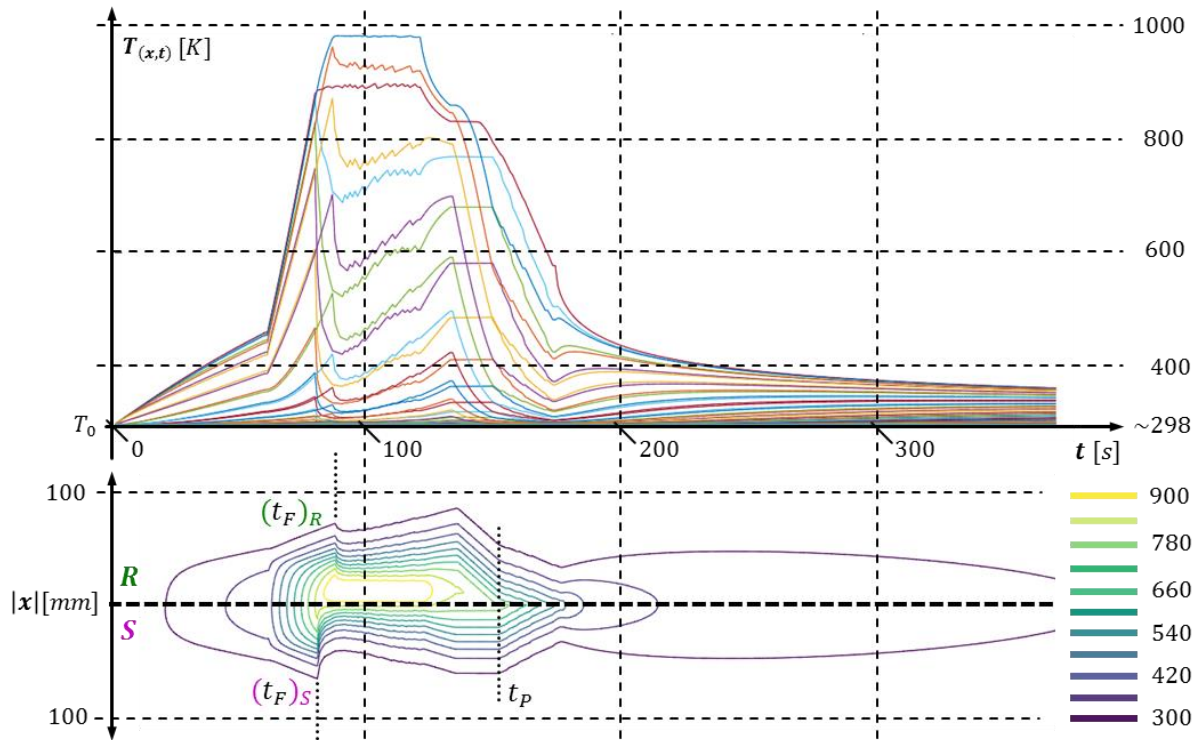


Figura 4. Vista lateral (acima) do perfil de temperatura em função do tempo; vista superior (embaixo) da distribuição espacial do perfil de temperatura. Ambos calculados para todas as etapas FBW. Na Figura 4 se ressaltam os tempos em que começa o centelhamento (*Flashing*, F) t_F e o recalque (*Pressing*, P) t_P . Nota-se que o centelhamento começa quando o material alcança a temperatura de fusão na região da interface da solda. A Figura 4 pode ser modificada para fazer uma representação 3D, na Figura 5, objetivando uma melhor visualização do perfil de temperatura obtido:

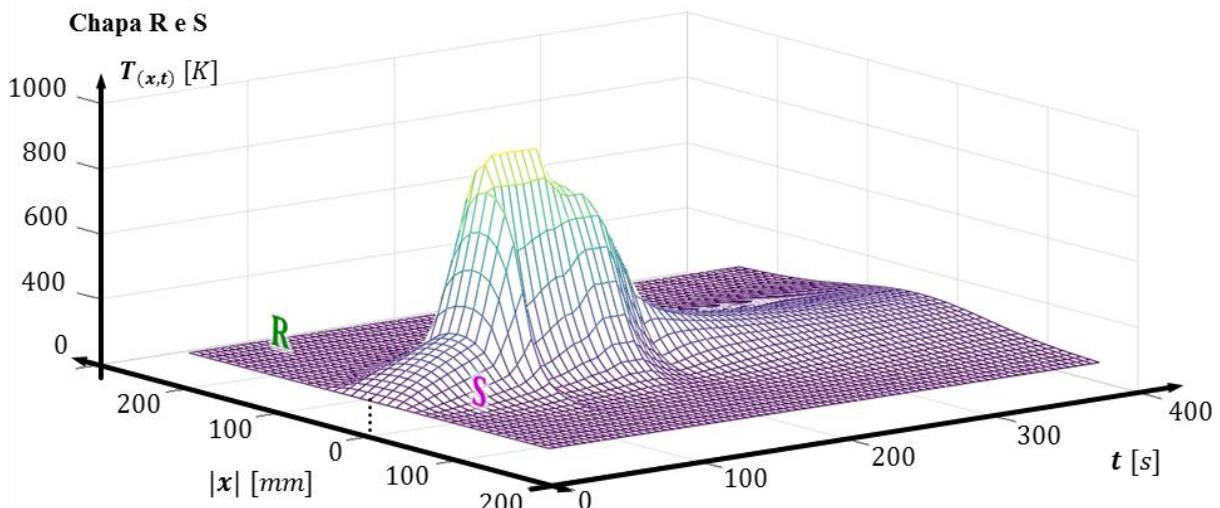


Figura 5. Representação em três dimensões da distribuição espacial do perfil de temperatura em função do tempo. Calculado para todas as etapas FBW.

2.3 Discussão

Antes de analisar os resultados obtidos, é necessário ressaltar que as equações de comportamento dos materiais R e S da Tabela 2, não representam um material específico. Estas equações representam o comportamento não linear baseado em

propriedades térmicas, mecânicas e elétricas de aços genéricos de baixa liga, mas não especificamente os aços tratados na Figura 2. Conseqüentemente, a comparação entre os resultados do modelo matemático e os trabalhos de caracterização de solda citados é válida somente sob o ponto de vista qualitativo e não assim quantitativo. Fizeram-se varias simulações anteriores, mudando as não linearidades dos materiais R e S (dentro de valores reais, próprios de materiais usados na prática) que demonstram que o comportamento do perfil de temperatura é semelhante para quase todos os casos, exceto para materiais de ligas especiais ou com microestrutura diferente das características-padrão [1,3,4]. Assim, a análise do perfil de temperatura é feita focando a natureza do comportamento.

Analisando o perfil de dureza da soldagem DP600 – SAE1008, Figura 2, pode-se fazer uma correlação com o comportamento da Figura 3, onde se mostra uma defasagem do perfil máximo de temperatura, que neste caso é no sentido do aço bifásico. O aço DP600 possui uma temperatura de fusão maior, permitindo que a distribuição térmica alcance um perfil semelhante ao perfil apresentado na Figura 5, especialmente na etapa do centelhamento, como se mostra no gráfico da esquerda da Figura 3. Analisando a Figura 3, pode-se perceber que a temperatura de fusão do aço SAE1008 serviria como uma condição de contorno pseudo-estável situada na interface, pois este material não pode aquecer mais nessa região sem ser transformado em líquido e ser expulso pelo centelhamento. Note-se que esta dinâmica torna-se pseudo-estável com a aplicação de uma compensação de material, que neste caso só existe para o aço SAE1008 sem que o aço DP600 seja afetado pelo centelhamento.

O raciocínio do parágrafo anterior parece ser justificado pela explicação que o autor fornece, ao descrever a falta de fusão na interface com o aço bifásico [5]. Poderia-se inferir que o aço DP600 experimentou o perfil máximo defasado da interface como mostra a Figura 6, que detalha a região onde ocorre a defasagem:

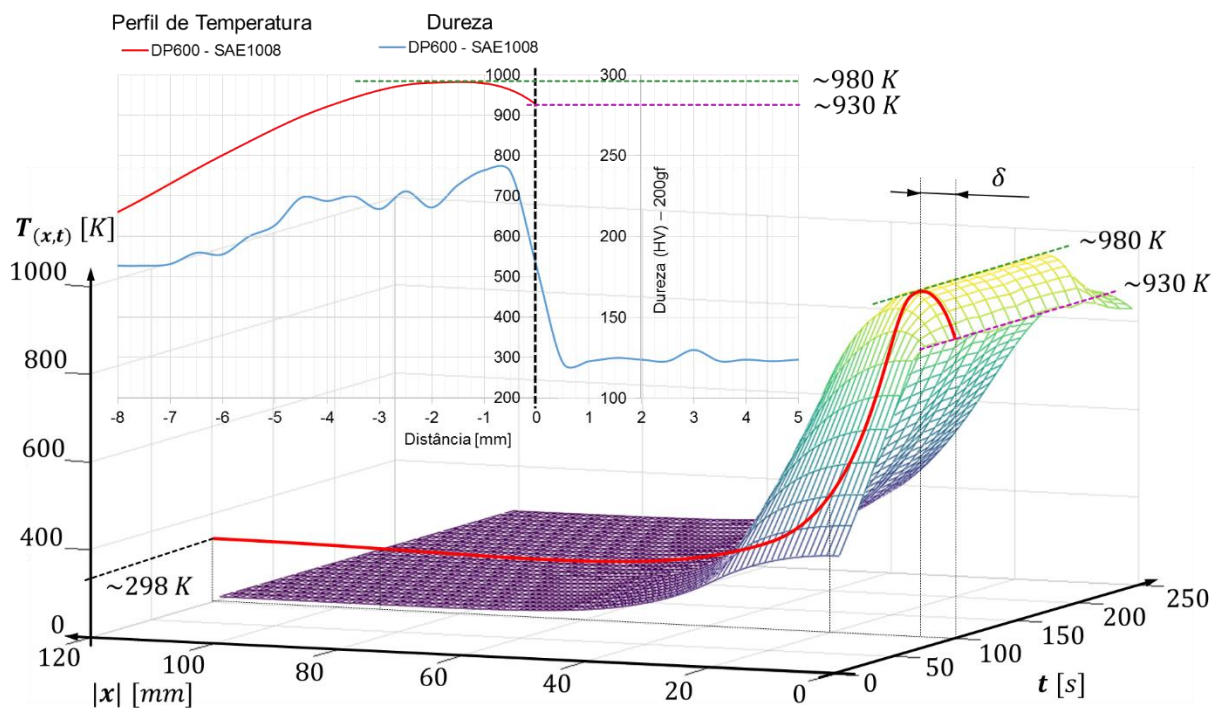


Figura 6. Comparação do perfil de temperatura máxima alcançada no centelhamento e o perfil de dureza na região da defasagem.

Depois de um tempo de centelhamento no estado pseudo-estável, como mostra a Figura 6, o sistema não recebe aporte de energia térmica significativo, permitindo um resfriamento relativamente rápido, segundo mostra a Figura 4. Isto permite inferir que a região de 5 *mm* (contando desde a interface da solda) alcançou temperaturas de austenitização em todo o tempo do centelhamento, o que pode levar à alteração da microestrutura inicial do aço bifásico, com a formação de microestruturas mais duras como a martensita, resultando em um aumento local de dureza também desfasada na interface, como mostra a Figura 6, que corrobora com os resultados obtidos.

A Figura 6 também destaca a aparição da distância de defasagem δ , valor que é calculável utilizando o modelo matemático do perfil de temperatura.

Para o segundo caso, o perfil de dureza da soldagem DP600 – SAE1015 na Figura 2, pode-se aplicar a mesma explicação do primeiro caso. Adicionalmente, como a temperatura de fusão do aço SAE1015 é maior do que a temperatura de fusão do aço SAE1008, o aço DP600 teve mais oportunidade de fundir na interface, o qual se justifica porque, para as mesmas variáveis de processo de soldagem, o autor do segundo caso [6] descreve que houve material fundido na região do aço bifásico. Logo, entende-se que o aço DP600 teve uma maior participação no centelhamento comparativamente com o caso anterior. Portanto, é possível que a distância de defasagem seja menor que a do aço SAE1008, permitindo uma menor porção austenitizada (aproximadamente de 3 *mm* desde a interface da solda – Figura 2) justificando o aumento de dureza em uma região menor que no primeiro caso. O metal base, em ambos ensaios, tem dureza original diferente.

A defasagem do perfil máximo de temperatura no sentido do aço de maior temperatura de fusão é um fenômeno que deve ser melhor estudado em trabalhos futuros.

Uma das soluções potenciais para melhorar a qualidade das soldas entre materiais dissimilares é balancear a quantidade de carga eletrotérmica, que é função da resistividade elétrica e resistividade térmica de cada material. Uma solução trivial aplicando este raciocínio seria utilizar uma porção *r* menor do que a porção *s*, que se resume em mudar a posição de aplicação dos eletrodos buscando ter um menor coeficiente R_R/R_S ou possivelmente K_R/K_S . O objetivo é que ambos materiais alcancem a temperatura de fusão em tempos curtos em regiões próximas da interface de solda.

3 CONCLUSÃO

Aplicando o método da desagregação tecnológica no processo de soldagem FBW de materiais dissimilares é possível definir um circuito elétrico que simplifica a abordagem do problema. Assim, é válido aplicar uma equação de governo adaptada para resolução computacional que permita calcular um perfil de temperatura representativo. As conclusões da análise desenvolvida no presente trabalho são resumidas a seguir:

- Depois de um certo tempo, maior ou igual ao tempo ideal de centelhamento, a temperatura de fusão mais baixa atua numericamente como condição de contorno não transitória na interface de solda na etapa de centelhamento.
- O fato anterior permite que o perfil de temperatura máximo seja defasado uma distância calculável no sentido do material que possui a temperatura de fusão mais elevada. Este fenômeno deve ser melhor estudado.

- Independentemente da quantidade de energia térmica aportada no sistema, sempre que seja maior do que as perdas, a etapa de centelhamento alcança um ponto pseudo-estável; as recomendações anteriores devem ser cumpridas e deve existir compensação de massa. Calcular esta compensação se traduz em calcular a velocidade ideal de centelhamento para garantir a estabilidade máxima do arco. Isto também permite conhecer o tempo de centelhamento ótimo.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 Sergio C. Calvimontes, A. J. O. Cabral, Aduino M. Assis. Sheet format steel Flash-Butt welding variables inquiry for mathematical modeling. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2017; 9: 100.
- 3 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.
- 4 Luiz F. Sotero. Implementação de um modelo numérico computacional para simulação do processo FBW aplicado a trilhos ferroviários: Análise termo-eletromagnética. Juiz de Fora: Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora; 2017.
- 5 Railla R. Lopes. Caracterização da junta dissimilar soldada por centelhamento topo a topo do aço DP600 com o aço SAE1008 produzido na CSN no processo de decapagem. Volta Redonda: Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense; 2017.
- 6 Henrique C. Almeida A. Caracterização da soldagem por centelhamento topo a topo do aço DP600 com SAE1015 produzido na CSN no processo de decapagem. Volta Redonda: Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense; 2017.