

AUTOMAÇÃO E MONITORAÇÃO DE MÁQUINA DE SOLDA POR PONTOS PARA MODELAGEM DO PERFIL DE TEMPERATURA NO AQUECIMENTO DA SOLDAGEM DE TOPO DE AÇO AISI 409

José Rubens Gonçalves Carneiro

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. joserub@pucminas.br

Attenister Tarcísio Rêgo

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. atrego@pucminas.br

Pedro Paiva Brito

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dante, 114/03. São Lucas. Belo Horizonte. MG. CEP 30240-290. pedrobrito@pop.com.br

Ivan José Santana

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. ivansan@pucminas.br

Resumo. *Este trabalho visa a automação de um equipamento para a modelagem do perfil de temperatura no aquecimento na soldagem de topo, construído a partir de uma máquina de soldagem por pontos. Na automação, foram utilizados software de aquisição, controle e supervisão, fontes de alimentação, sistema para condicionamento de sinal e termopares. A automação do equipamento possibilitou monitoração de temperatura, da corrente e tensões primárias e secundárias e resistência de contato. Foi adquirido o perfil térmico em chapas de aço AISI 409 de 1,6mm de espessura, nas distâncias da linha de soldagem de 3, 5 e 7mm, em tempos de soldagem de 3,4,5,6 e 8s. O erro médio obtido na modelagem das curvas experimentais do perfil de temperatura nas chapas, em comparação com modelos matemáticos existentes na literatura, foi de 15,29% com desvio padrão de 10,23. A não aplicabilidade da solução de Grong para o modelo de Rosenthal se justifica pela consideração do rendimento térmico decrescente em função da distância e, possivelmente, pela não consideração do fluxo volumétrico e formação de rebarba que desloca os pontos de fixação dos termopares em relação à linha de soldagem e modifica a unidirecionalidade do fluxo de calor.*

Palavras-chave: *AISI 409, Soldagem de topo, Perfil térmico.*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de exaustão com catalisadores geralmente trabalham em temperaturas mais altas que os sem catalisadores e requerem materiais com maior resistência a altas temperaturas e à corrosão, como os aços inoxidáveis. Os aços inoxidáveis são utilizados nas peças que estão entre o catalisador e o motor, uma vez que qualquer processo de corrosão que se inicie antes do catalisador pode gerar resíduos que aderem na superfície do corpo catalítico, diminuindo a eficiência da catálise.

Os aços inoxidáveis ferríticos com baixos teores de cromo atendem às exigências da aplicação de resistência à corrosão, desempenho em alta temperatura e boa tenacidade para serem conformados na forma de tubos. Os tubos de um sistema de exaustão são fabricados através do processo de soldagem por indução de alta frequência. A soldagem por indução de alta frequência é um processo de soldagem por deformação, em que calor é gerado na interface dos materiais com a passagem de um fluxo de corrente elétrica (efeito Joule), e a união é obtida simultaneamente com a aplicação de pressão (Cary¹).

O equipamento de soldagem por indução de alta frequência possui, em geral, alto índice de automatização, alto valor agregado (AWS²) e elevada produtividade, o que o torna inadequado economicamente para a realização de testes de simulação. Santana et al³ buscaram desenvolver um equipamento utilizando uma máquina de soldagem por pontos, para simular o processo de soldagem por indução de alta frequência industrial. Observou-se a necessidade de monitoração dos parâmetros de processo no equipamento desenvolvido para melhorar a reprodutibilidade dos resultados obtidos e conferir maior flexibilidade aos ensaios. Em razão da necessidade da automação, são objetivos deste trabalho:

- Automação do equipamento com aquisição dos seguintes parâmetros: tensão e corrente de soldagem no primário e secundário da máquina, resistência de contato, força aplicada aos corpos-de-prova, tempo de soldagem e temperatura na zona termicamente afetada (ZTA);
- Obtenção das curvas de aquecimento para diferentes tempos (3, 4, 5, 6 e 8s) e distâncias da linha de soldagem (3, 5 e 7mm);
- Verificar a eficiência de modelos matemáticos existentes na literatura na quantificação das curvas de aquecimento obtidas experimentalmente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de aço inoxidável ferrítico AISI 409, na forma de chapa com dimensões 50x20x1,6mm (Figura 1), utilizado para a fabricação de tubos de descarga para automóveis. A preparação do corpo-de-prova foi feita através de corte e, em seguida, fresamento das superfícies.

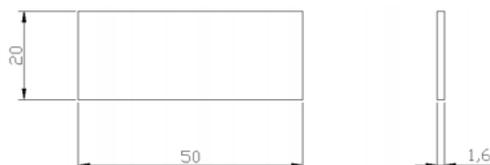


Figura 1. Dimensões do corpo-de-prova de aço inoxidável AISI 409 utilizados.

2.2. Equipamento

Santana⁴ desenvolveu a parte mecânica do equipamento de soldagem, a partir de uma máquina de soldagem por pontos, modificando-o para a soldagem de topo de chapas. A automação do equipamento tendo em vista os objetivos do trabalho envolveu as seguintes etapas: projeto do circuito para controle da corrente e da tensão de alimentação da máquina, projeto do sistema de amplificação para aquisição dos dados de temperatura e elaboração do programa de controle.

Para a aquisição dos valores de corrente e tensão do sistema (no primário e secundário) bem como das medidas de temperatura no corpo-de-prova, foi instalada uma placa de aquisição de dados Advantech de 12bits, com frequência de aquisição de dados de 1kHz, modelo PCL-718B. A corrente no primário foi medida com um transformador de corrente (TC), de relação 75/5 de seguintes características: Tipo TI – 44 – HB, 600V, 5VA, precisão de $\pm 1\%$. O TC foi ligado a uma

resistência elétrica de valor conhecido, obtendo-se, na placa de aquisição de dados, um valor de tensão elétrica correspondente à corrente no primário da máquina de soldagem.

A corrente de soldagem foi medida em um Shunt, de resistência $0,005\Omega$, instalado em série no circuito secundário da máquina. O sinal gerado no Shunt foi levado a um amplificador diferencial (INA 118) e, em seguida, à placa de aquisição de dados. A tensão sobre o corpo-de-prova foi aplicada diretamente a um transformador, com o intuito de isolar magneticamente o sinal e, posteriormente, levada à placa de aquisição de dados. Na Figura 2 apresenta-se o esquema geral da alimentação e controle da máquina de soldagem.

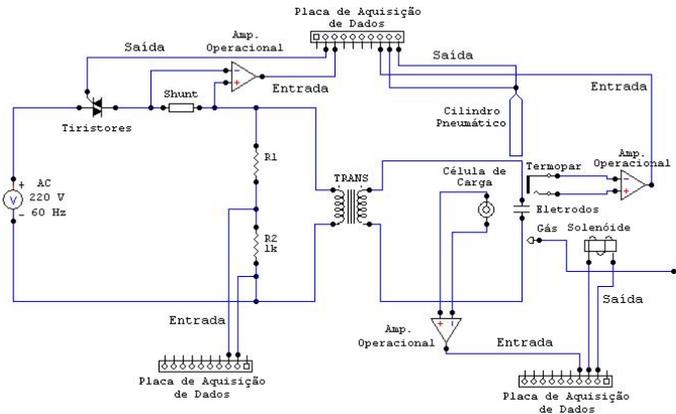


Figura 2. Esquema geral do circuito de alimentação e controle da máquina de solda.

2.3. Medida da Temperatura

Para a medição do perfil de temperatura foram soldados por descarga capacitiva termopares do tipo K, de diâmetro 0,8mm, no corpo-de-prova à distância de 3, 5 e 7mm da linha de soldagem. Na Figura 3 mostra-se esquematicamente a posição dos termopares nos corpos-de-prova. Devido à sua pequena amplitude (entre 0,02 e 0,05V, aproximadamente), os sinais elétricos gerados pelos termopares foram levados a amplificadores diferenciais (INA 118) antes de serem adquiridos.

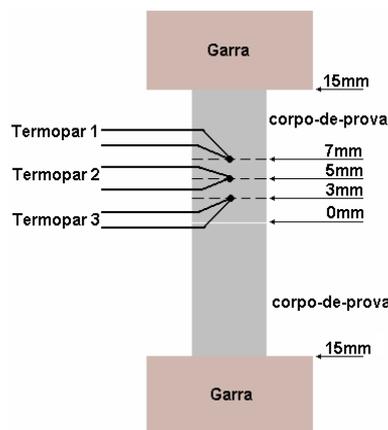


Figura 3. Posicionamento dos termopares no corpo-de-prova e garras de fixação das chapas.

2.4. Desenvolvimento do Programa de Controle

Para o controle da máquina de soldagem e aquisição de dados pela placa de aquisição, foi desenvolvido um programa em Delphi, que comunica com a placa de aquisição de dados, armazena os dados obtidos, gera gráficos de todas as variáveis monitoradas e controla o tempo de soldagem. Foi desenvolvido, também, um sistema supervisório implementado junto ao programa, com o objetivo de facilitar a operação e o monitoramento do processo.

A Figura 4 mostra a tela principal do programa desenvolvido.

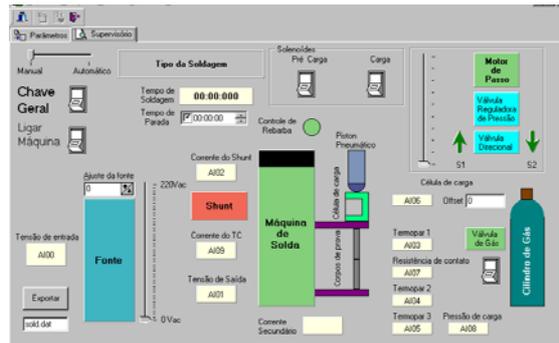


Figura 4. Supervisório de controle e gerenciamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação da Resistência Dinâmica

A Figura 5 mostra a evolução da corrente e da tensão sobre o corpo-de-prova para tempo de soldagem de 3s. Observa-se que o crescimento da tensão ocorreu a partir do tempo de aproximadamente 1,5s. Este atraso se deve à aquisição e atualização dos dados no sistema supervisório, posterior envio do sinal de energização ao relé auxiliar da máquina e, também, ao tempo necessário para a energização do contator principal, que é responsável por conectar a máquina ao sistema de alimentação.

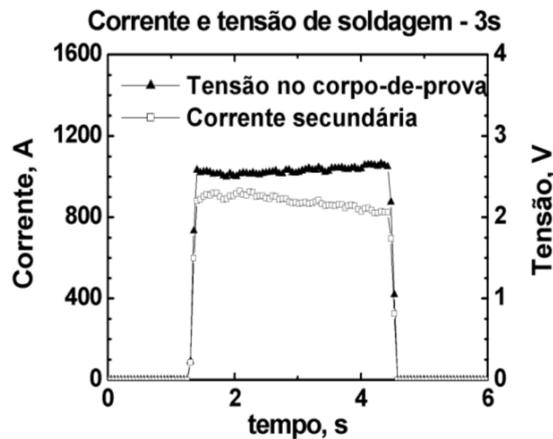


Figura 5. Corrente secundária e queda de tensão sobre o corpo-de-prova, em fase, obtidas para o tempo de soldagem de 3s.

Nota-se, também, que o tempo de crescimento da tensão até 2,7V é reduzido (aproximadamente 100ms). A partir daí, a variação de tensão ocorrida durante a soldagem é devido à variação da resistência elétrica total do corpo-de-prova (R_t). Essa, por sua vez, é afetada pela resistência das chapas (que cresce com o aumento da temperatura) e pela diminuição da resistência de contato (devido ao aumento da área efetiva de contato entre as chapas).

A corrente de soldagem, de modo análogo à tensão, cresce rapidamente até atingir 900A aproximadamente e, após o tempo de soldagem de 3s, cai a zero. No intervalo de 1,3 a 4,3s, observa-se um decréscimo de 100A na corrente secundária.

Como nesse intervalo de tempo observou-se um crescimento da queda tensão, da ordem de 3,13% (0,08V), tem-se que a resistência elétrica total (R_t), cresceu. Como a resistência elétrica total é a soma algébrica da resistência das chapas e da resistência de contato entre elas, pode-se concluir que o aumento da resistência das chapas decorrente do aumento de temperatura superou o decréscimo da resistência de contato. A Figura 6 mostra a evolução da resistência dinâmica durante

a soldagem. Os valores foram obtidos através da divisão da tensão sobre o corpo-de-prova pela corrente de soldagem.

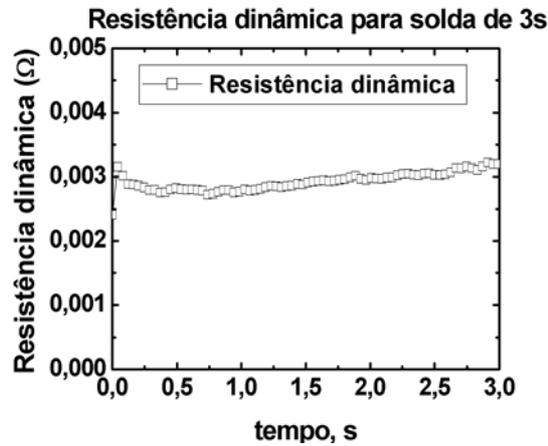


Figura 6 – Gráfico da variação da resistência dinâmica para o tempo de soldagem de 3s.

3.2. A Solução de Grong⁵ Para o Modelo de Rosenthal⁶

Na Figura 7 (a), (b), (c) e (d), são mostradas as curvas de temperatura obtidas para os tempos de soldagem de 3, 4, 5, 6s respectivamente.

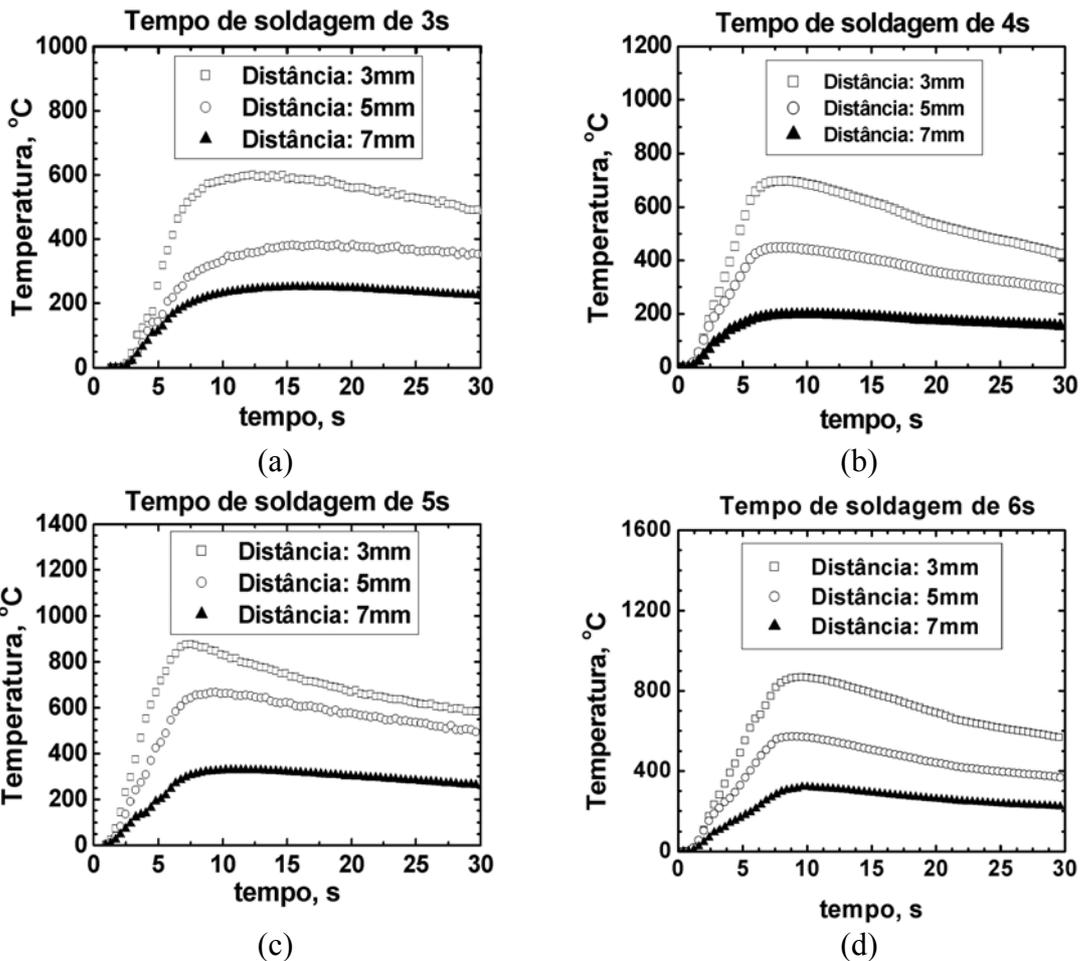


Figura 7. Curvas de temperatura obtidas para os tempos de soldagem de (a) 3, (b) 4, (c) 5 e (d) 6s

Para a modelagem das curvas obtidas, usou-se a solução de Grong⁵ (considerando fluxo unidirecional de calor) para o modelo de Rosenthal⁶, cuja expressão é dada abaixo (Equação 1).

$$T - T_0 = \frac{B}{t^{1/2}} \exp\left(\frac{-y^2}{4\alpha t}\right) \quad (1)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), T_0 é a temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$), t é o tempo (s), B é uma constante, y é a distância a partir da linha de soldagem e α a difusividade térmica do material (m^2/s).

A constante B pode ser calculada a partir das condições de contorno (Equação 2):

$$B = \frac{Q}{2A\rho c\alpha^{1/2}\pi^{1/2}} \quad (2)$$

onde Q é o calor transferido na soldagem (J), A é a área de contato (m^2), ρ é a densidade do material (kg/m^3) e c o calor específico ($\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$). O calor transferido é dado por:

$$Q = \eta \int V I dt \quad (3)$$

onde η é o rendimento. Para um rendimento considerado de 100%, observou-se que a temperatura de pico modelada atingiu uma temperatura da ordem de 3600°C , conforme a Figura 8 (a). Para se ajustar a temperatura de pico experimental, o rendimento teórico calculado no processo de soldagem foi da ordem de 16%. Para este rendimento de 16%, a Figura 8 (b) mostra, respectivamente, a curva teórica e experimental da solução de Grong⁵ para o modelo de Rosenthal⁶.

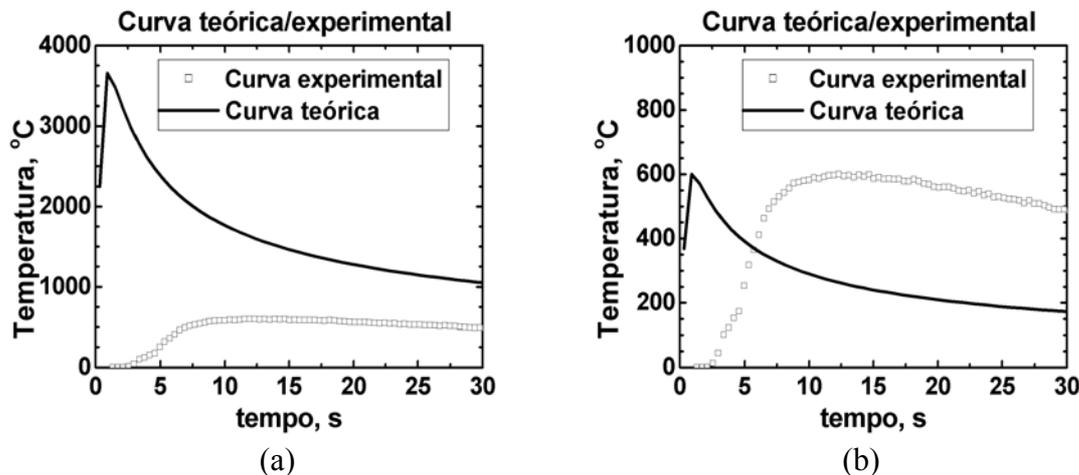


Figura 8. Curva teórica/experimental, para o tempo de soldagem de 3s, na distância de 3mm, considerando um rendimento de (a) 100% e (b) 16%.

Após o insucesso da aplicação da solução proposta por Grong⁵, para o modelo de Rosenthal⁶, encontrou-se, através de um ajuste não linear baseado no método de Levenberg-Marquadt (Jorge Junior⁷), os valores das variáveis P_1 e P_2 na Equação 4, que ajustavam as curvas experimentais.

$$T = \frac{P_1}{\sqrt{t}} \exp\left(\frac{-P_2}{t}\right) \quad (4)$$

onde P_1 e P_2 são os parâmetros de ajuste. As curvas foram ajustadas somente para a região de aquecimento, de modo que a determinação das temperaturas de pico em cada caso se fez necessária.

A correlação entre a temperatura de pico e os parâmetros de ajuste são mostrados na Figura 9.

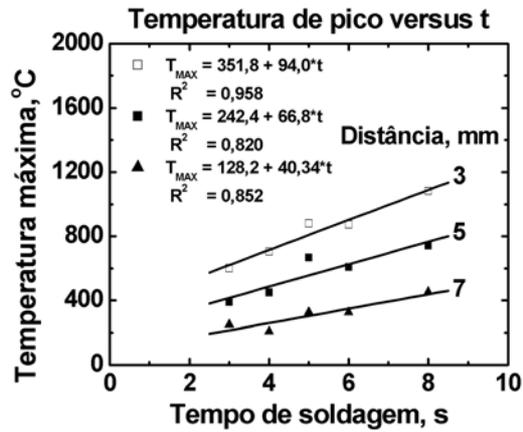


Figura 9. Evolução das temperaturas de pico, para cada distância, em função do tempo de soldagem.

Para a obtenção dos parâmetros P_1 e P_2 , os dados experimentais foram filtrados com média móvel, no programa Origin 6.1. Os dados filtrados foram ajustados no mesmo programa através de ajuste não linear de acordo com a Equação 4, segundo o método de Levenberg-Marquadt. Por fim, para cada curva ajustada, foi encontrado um par de valores de P_1 e P_2 .

P_1 e P_2 foram correlacionados, respectivamente, com o tempo de soldagem e com a distância, pois substituíram no modelo proposto os parâmetros relacionados com o tempo de soldagem e distância (Figura 10).

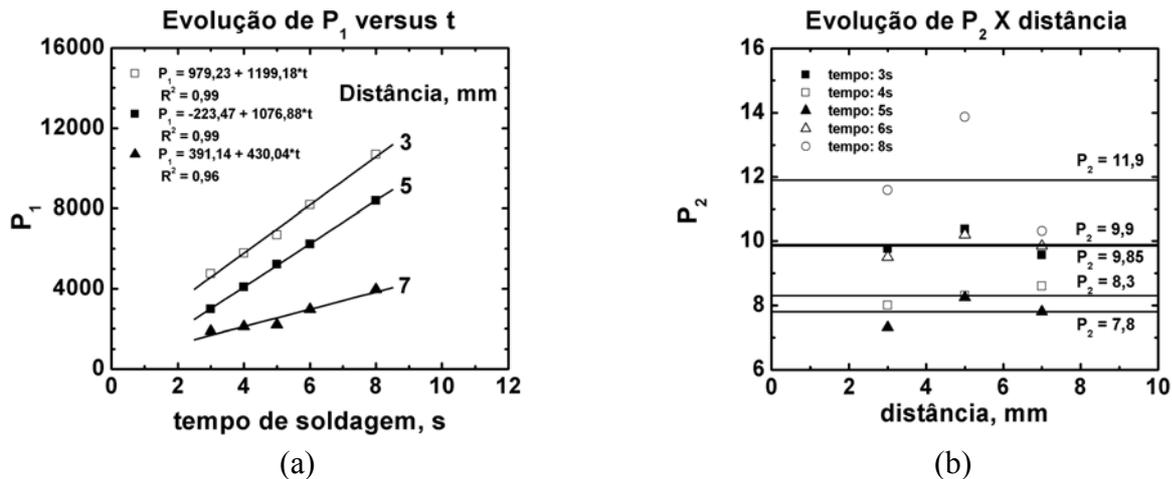


Figura 10. Correlações entre (a) o parâmetro P_1 com o tempo de soldagem e (b) o parâmetro P_2 com a distância da linha de soldagem.

A partir das correlações encontradas, foram geradas as curvas que modelam o processo. Esse resultado é mostrado na Figura 11 (a), (b), (c), (d) e (e).

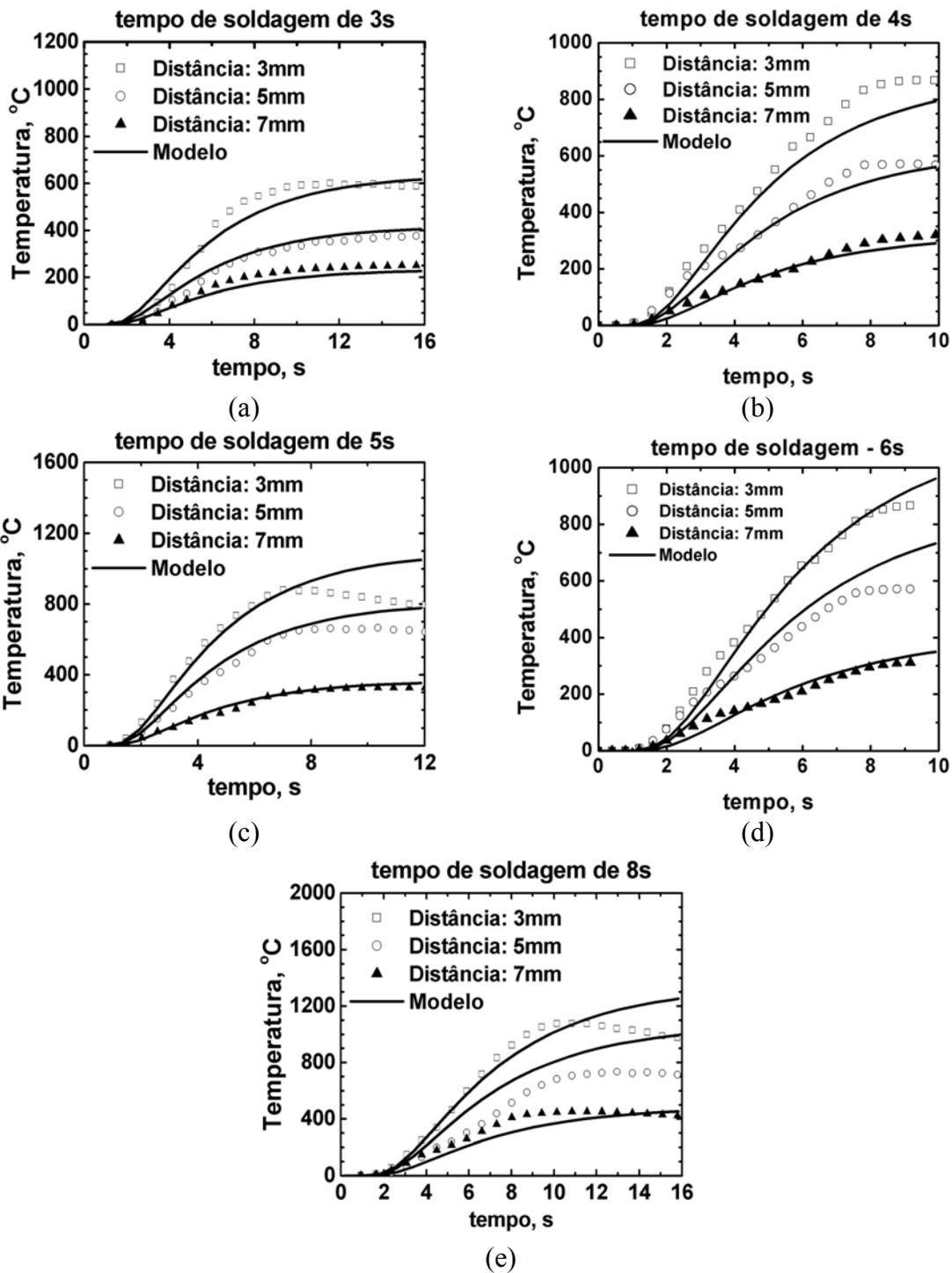


Figura 11. Curvas de aquecimento experimentais e modeladas para as distâncias de 3, 5 e 7mm da linha de soldagem para os tempos de soldagem de (a) 3s, (b) 4s, (c) 5s, (d) 6s e (e) 8s.

O erro na modelagem pode ser calculado através da Equação (5):

$$\text{Erro}(\%) = \frac{1}{s} \sum \left| \frac{T_{\text{modelado}} - T_{\text{experimental}}}{T_{\text{experimental}}} \right| \times 100 \quad (5)$$

onde s é o número de pontos experimentais.

O erro médio obtido foi 15,29% com desvio-padrão de 10,23. O parâmetro P_1 determinado pode ser relacionado com o rendimento térmico em cada ensaio. A partir das Equações (2), (3) e (4), é

possível escrever (considerando que os valores eficazes de corrente e tensão são invariáveis ao longo do processo):

$$P_1 = \frac{\eta V I t}{2 A \rho c \alpha^{1/2} \pi^{1/2}} \quad (6)$$

Considerando as propriedades do material como constantes, obtém-se, de acordo com o tempo de soldagem e o valor de P_1 correspondente, o rendimento térmico no corpo-de-prova. A Figura 12 (a) e (b) mostra os valores de rendimento para as distâncias de 3,5 e 7mm com os tempos de soldagem de 3,4,5,6 e 8s. Pode-se perceber que, à medida que a distância da linha de soldagem aumenta, tem-se uma queda no rendimento, o que indica que o fluxo de calor nestes pontos é menor.

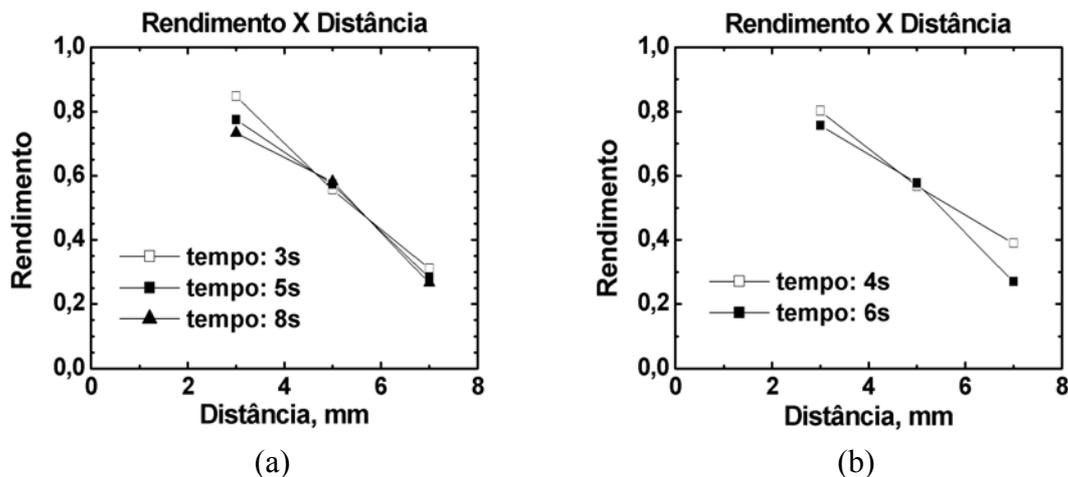


Figura 14. Evolução do rendimento com a distância da linha de soldagem para os tempos de (a) 3, 5 e 8s e (b) 4 e 6s.

Conclui-se, portanto, que a hipótese proposta por Grong⁵ de que não há perda de calor ao longo do volume provocou inconsistência na modelagem matemática.

4. CONCLUSÕES

A elaboração do sistema supervisor permitiu a operação automática e manual do sistema com controle consistente e confiável das variáveis do processo tais como: tensão e corrente primárias e tensão e corrente secundárias.

O sistema proposto para medição da resistência dinâmica através da medição da tensão e corrente sobre os corpos-de-prova avaliou a resistência dinâmica da junta.

A não aplicabilidade da solução de Grong⁵ para o modelo de Rosenthal⁶ se justifica pela consideração do rendimento térmico decrescente em função da distância.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARY, Howard B. **Modern Welding Technology**. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
2. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook. Welding Processes**. 8.ed. V2. Miami: AWS, 1991. p. 651-670.
3. SANTANA, Ivan José e MODENESI, Paulo. **Desenvolvimento de um Sistema para a Simulação da Soldagem por Indução de Alta Frequência** - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG. Belo Horizonte, 2002.

4. SANTANA, Ivan José. **Simulação da Soldagem por Indução de Alta Frequência em Tubos de Aço Inoxidável Ferrítico**. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Mecânica) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG. Belo Horizonte, 2003.
5. GRONG, Oystein. **Metallurgical Modeling of Welding**. The Institute of Materials – Materials Modeling Series, p. 579.
6. ROSENTHAL, Daniel. **Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting**. Bruxelas, 1935. p. 1277-1292.
7. JORGE Junior, Alberto Moreira. **Análise do Comportamento Mecânico de Aços Inoxidáveis em Altas Temperaturas e Altas Taxas de Deformação**. São Carlos, 1997.

AUTOMATION AND MONITORING OF A SPOT WELDING MACHINE FOR THE MATHEMATICAL MODELING OF THE HEATING CURVES DURING THE BUTT WELDING OF AISI 409 STAINLESS STEEL

José Rubens Gonçalves Carneiro

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. joserub@pucminas.br

Attenister Tarcísio Rêgo

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. atrego@pucminas.br

Pedro Paiva Brito

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dante, 114/03. São Lucas. Belo Horizonte. MG. CEP 30240-290. pedrobrito@pop.com.br

Ivan José Santana

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Rua Dom José Gaspar, 500. Coração Eucarístico. Belo Horizonte. MG. CEP 30535-610. ivansan@pucminas.br

***Abstract.** The objective of this work was the automation of equipment, adapted from a spot-welding machine, for the mathematical modeling of the heating curves of a butt welding process. To this end, data acquisition, supervision and control software was developed, as well as an amplification system. Through the automation process, measuring of the temperature in the heat affected zone, current and tension at the primary and secondary phase and contact resistance was made possible. The temperature was acquired in AISI 409 steel sheets, with 1,6mm width, at the distances of 3, 5 and 7mm from the welding joint, with welding times of 3, 4, 5, 6 and 8s. The mean error found in this modeling of the process using Grong's solution to Rosenthal's model was 15,29%, with a standard deviation of 10,23. The model was not found to be applicable, due to the consideration regarding thermo performance, which decreases with the distance from the welding joint, and possibly due to the consideration of null volumetric flow and expulsion from the welding point, which changes the relative distance of the thermocouples' fixation points and modifies the conditions of one-dimensional heat flow.*

Keyword: AISI 409, Butt Welding, Temperature Distribution.