

# Avaliação de Eletrodos de Solda a Ponto por Resistência Elétrica Revestidos com Cromo em Solda de Zircalloy

João Batista Meireles<sup>1,2</sup>, Guilherme Pennachin Sakamiti<sup>2,3</sup>, José Adilson de Castro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense – UFF, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Industrias Nucleares do Brasil, Coordenação de Desenvolvimento de Processos, Resende, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

Recebido: 05 Jun., 2018

Aceito: 20 Set., 2018

E-mails: joaomeireles@inb.gov.br (JBM),  
joseadilsoncastro@id.uff.br (JAC),  
guilhermesakamiti@inb.gov.br (GPS)

**Resumo:** A soldagem de estruturas de combustíveis nucleares de Zircalloy possui uma faixa de parâmetros pequena para soldas de qualidade adequadas, pois o Zircalloy tem a temperatura de fusão maior do que a da liga de cobre usualmente utilizada para os eletrodos. No intuito de aumentar a faixa de parâmetros que produzem soldas de qualidade, foi testado um revestimento de cromo nas superfícies do eletrodo e demais dispositivos de soldagem, pois o cromo apresenta uma temperatura de fusão maior do que o Zircalloy e também daquela apresentada pelo cobre. Foram soldadas amostras com dispositivos de soldagem comumente utilizados, que são sem nenhum revestimento e dispositivos de soldagem revestidos de cromo para uma comparação da ampliação da faixa de parâmetros, garantindo a qualidade adequada para a solda. Foram utilizados ensaios metalográficos para avaliar a medida do tamanho da lentilha, e ensaios de corrosão para verificar a integridade da solda, que são critérios usuais de aceitação da solda. Além disso, foi utilizada simulação computacional para análise da região soldada e possibilitar a disponibilização de uma ferramenta de análise adicional para previsão da zona afetada pelo calor que confere qualidade adequada para a zona afetada pelo calor. A simulação computacional foi capaz de prever o tamanho da lentilha de solda utilizando os parâmetros de controle. Ambas as abordagens indicaram que se obtém ampliação da faixa de parâmetros de soldagem aceitáveis e consequentemente o aumento do tamanho da lentilha de solda, tornando a nova metodologia mais confiável e adequada para a soldagem com a segurança necessária para se decidir sobre sua aprovação.

**Palavras-chave:** Energia nuclear; Solda a ponto; Zircônio.

## Evaluation of Electrodes of the Resistance Spot Welding with a Chromium Coating on the Welding of Zircalloy

**Abstract:** To weld zircalloy nuclear fuel assembly structures, there is a small parameter range for acceptable welds, since zircalloy has a higher melting temperature than the copper alloy of the electrodes. In order to increase the parameter range, a chromium coating was inserted and on the surfaces of the electrode and on other welding devices, once the melting temperature of the chromium is higher than that of zircalloy, as well as of copper. In order to compare and test the new methodology, samples have been welded with the conventional devices which do not have any coating or welding devices covered by chromium and the new coating devices. A comparison on the improvements and enlargement of the range of the control parameter were measured and predicted to assure that the welded region presents adequate quality. Metallographic tests were used to evaluate welding lens size together with corrosion tests to verify the integrity of the welding regions. The lens dimensions and areas are usual criteria for weld acceptance assuring the quality. In addition, computational simulation was used to analyze the welded region, allowing the use of an additional analysis tool to predict the effect of process parameters on the heat affect zone. The simulation was able to predict the size of the welding lens as a function of process control parameters. Both approaches indicated that an increase in the range of acceptable welding parameters and a consequent increase in the lens size of the weld were obtained for the new chromium coating electrodes. The results of experimental data and model predictions confirmed that the new methodology is more reliable and suitable for safety welding procedure approval.

**Key-words:** Nuclear energy; Resistance spot welding; Zirconium.



## 1. Introdução

A Soldagem a ponto por resistência é utilizada em diversos setores industriais. No setor de energia nuclear, esse processo de soldagem é empregado na união de componentes metálicos que formam a estrutura de um elemento combustível nuclear. Esta estrutura, que é normalmente chamada de esqueleto, é formada por tubos e reticulados de chapas finas de Zircalloy chamados de grades. Os tubos e as grades são unidos por este processo, formando esta estrutura rígida. Um esqueleto possui em torno de 1300 pontos soldados.

Existem vários parâmetros para a realização de uma solda, entretanto, três destes tem maior influência sobre a variação de energia, que são: tempo de soldagem, corrente e resistência de contato, como expresso na Equação 1. Onde  $E$  é a energia gerada (J),  $I$  a corrente elétrica (A),  $R$  a resistência de contato ( $\Omega$ ) e  $t$  o tempo de aplicação da corrente (s) [1].

$$E = \int_0^t I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1)$$

A corrente elétrica tem relação direta com a energia. O aumento da corrente aumenta também o fluxo de elétrons na região de contato, gerando maior calor. Assim como a corrente, o tempo de soldagem também tem uma relação direta com a energia. O aumento do mesmo causa uma aplicação de corrente na região de contato por mais tempo gerando maior calor.

A corrente elétrica e a duração da corrente são valores que são obtidos ou configurados para a realização da solda. Já a resistência é uma combinação das propriedades dos materiais e da força aplicada na região da solda. A resistência devido ao material é descrito na segunda lei de Ohm, Equação 2, onde  $\rho$  é a resistividade do material,  $L$  é a distancia que a corrente percorre e  $A$  a área de secção transversal.

$$R_M = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

A variação de força aplicada pelos eletrodos influencia no valor da resistência de contato na interface das chapas. Esta resistência é a fonte fundamental de aquecimento pelo efeito Joule para metais de alta condutibilidade elétrica. Quando as chapas estão em contato, a rugosidade da superfície de cada chapa causa uma dificuldade na passagem de corrente elétrica, pois as rugosidades diminuem a área de contato, aumentando a densidade de corrente e gerando o aquecimento. Quando é aplicada uma força unindo as chapas, as rugosidades são deformadas e assim aumenta a área de contato. Então, quanto maior a força aplicada menor será a resistência de contato [2]. A resistência de contato pode ser considerada como resistência de contração [2,3]. A resistência de contração pode ser resumida pela Equação 3, sendo  $\rho_m$  a resistividade média entre os materiais em contato,  $H$  é a dureza do material macio da interface,  $F$  é a força compressiva e  $n$  é o percentual em contato, que é devido à rugosidade das chapas.

$$R_C = 0,89 \rho_m \left( \frac{nH}{F} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Quando há uma camada de revestimento, como é o caso em estudo, existe uma resistência que é chamada de resistência de filme. Essa resistência é somada à resistência de contração formando a resistência de contato entre as chapas. A resistência filme é dada pela Equação 4, onde  $\rho_c$  é a resistividade do material que forma o filme e  $d_c$  é a espessura de camada do filme [2,3].

$$R_F = \frac{\rho_c d_c H}{F} \quad (4)$$

De posse das Equações 1 e 3, pode se escrever uma equação da energia na região de solda em relação a corrente e a força, que são os parâmetros que são possui variação nesse estudo, conforme Equação 5. Essa equação em termos da força e corrente permite comparar as soldas devido à energia utilizada. Sendo que todos os parâmetros na Equação 6 são conhecidos.

$$E = \frac{I^2}{F^{1/2}} C \quad (5)$$

Onde:

$$C = 0,89 \rho_m \Delta t (nH)^{1/2} \quad (6)$$

Em condições de produção existe a variação nos parâmetros de corrente e força, porém essas variações não podem interferir na qualidade da solda. Por esse motivo é determinada uma faixa de parâmetros, variando os valores de corrente e força até se obter o ponto de mínima energia (corrente mínima e força máxima) e ponto de máxima energia (corrente máxima e força mínima). O parâmetro tempo de soldagem também interfere no valor de potência, mas este pode ser mantido constante.

Existem algumas regras para se avaliar os pontos de energia máxima e mínima. Quando a energia é reduzida, a lentilha de solda, que é a região entre os materiais que se funde gerando uma elipsoide de material fundido, tem um volume reduzido. O volume mínimo da lentilha de solda é aquele que suporta uma determinada carga. Quando a energia é aumentada, pode haver uma lentilha que seja suficientemente grande para que se ultrapasse a espessura das chapas, o que é chamado de fenômeno de expulsão.

Uma das dificuldades da soldagem a ponto em chapas de ligas de Zircônio é sua alta temperatura de fusão, em torno de 1855°C. O Zircônio é um dos materiais escolhidos para aplicação de energia nuclear devido a sua seção de choques de nêutrons serem muito baixa. Para que ocorra a soldagem deve-se impor uma resistência de contato alta entre chapa/tubo para que ocorra a fusão, porém não deverá ocorrer a fusão do cobre na superfície da chapa soldada. Caso a energia dissipada no contato do eletrodo/chapa seja suficiente para ocorrer fusão do cobre, poderia ocorrer o desprendimento do material do eletrodo e este poderia se aderir ao zircônio. Este fenômeno irá acontecer antes da expulsão do material da chapa. Em aplicações nucleares é necessário que se atenda a requisitos de ausência de corrosão ao longo da vida útil do elemento combustível. No caso das ligas de zircônio quando há inclusão metálica de cobre pode ocorrer fenômeno de corrosão galvânica. Para que não ocorra esse depósito de material, se restringe a faixa de parâmetros considerados adequados para a aprovação do procedimento.

Nas aplicações automotivas, onde se utiliza aço carbono como matéria prima com uma temperatura de fusão em torno de 1400°C já existe a preocupação com o desgaste de eletrodo que acarreta desconformidades na soldagem [4,5]. Recentemente Panames [6] estudou o desgaste do eletrodo durante o aumento do número de pulsos do tempo de soldagem em aços IF e HSLA. O maior aporte térmico, devido ao aumento do tempo de soldagem, causa desgaste no eletrodo. Os autores avaliaram experimentalmente o desgaste dos eletrodos e das regiões soldadas, informando graficamente a quantidade de pontos de solda que seria possível realizar a soldagem, mantendo-se a integridade da solda.

Também observando o desgaste do eletrodo, Branco [7] analisou o desgaste de capas de eletrodos de soldagem a ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas. As capas de eletrodos citadas neste estudo não podem ser comparadas à camada de cromo proposto neste trabalho, pois as capas de eletrodos são similares a mini-eletrodos que são sacados quando se atinge a vida útil do mesmo, enquanto a camada de cromo é adicionada diretamente no eletrodo, não sendo possível sua troca. Neste trabalho são avaliados diversos tipos de materiais nas capas do eletrodo, relacionando os mesmos com a qualidade da solda e a quantidade de pontos de solda que cada capa pode realizar.

Estudos recentes sobre soldagem a ponto em ligas de zircônio são escassos, apesar de ser um processo consolidado na indústria. Isso mostra a importância e justificativa para esta pesquisa, que visa obter um material de recobrimento do eletrodo com maior eficiência, analisar seu desempenho em serviço e calibrar um modelo numérico de previsão dos parâmetros de controle utilizados no processo que possibilite uma maior assertividade do processo e consequente diminuição de refugo da estrutura soldada.

## 2. Materiais e Métodos

O foco principal do presente trabalho foi a proposição de um método para proteger o eletrodo da temperatura elevada da região da soldagem e aumentar a faixa de soldas aceitáveis durante o procedimento: cromagem de eletrodos de cobre. Para proteger o cobre é adicionada uma camada de 20 µm de cromo duro (temperatura de fusão de 1907°C). Acredita-se que essa camada não se fundirá com a liga de zircônio na superfície e não trará impactos significativos à passagem de corrente, por ser somente uma camada micrométrica. Esse estudo poderá

permitir um aumento na corrente de soldagem no ponto de potência máxima, devido à possibilidade de aumento de temperatura no contato eletrodo/chapa.

Para verificar se o revestimento de cromo trará vantagens ao processo de soldagem foram realizados os experimentos divididos em algumas etapas. Primeiramente foram soldados 50 corpos de prova com eletrodos sem revestimento. Destes, 25 corpos de prova foram soldados com o objetivo de encontrar o ponto de energia máxima e 25 com o objetivo de encontrar o ponto de energia mínima. Dos 25 corpos de prova de cada ponto, 20 foram submetidos a ensaios metalográficos e 5 a ensaios de corrosão. O mesmo foi feito com os 50 corpos de prova soldados com eletrodos e mandril com revestimento, totalizando 100 corpos de prova. Esta divisão e planejamento estão representados na Figura 1.

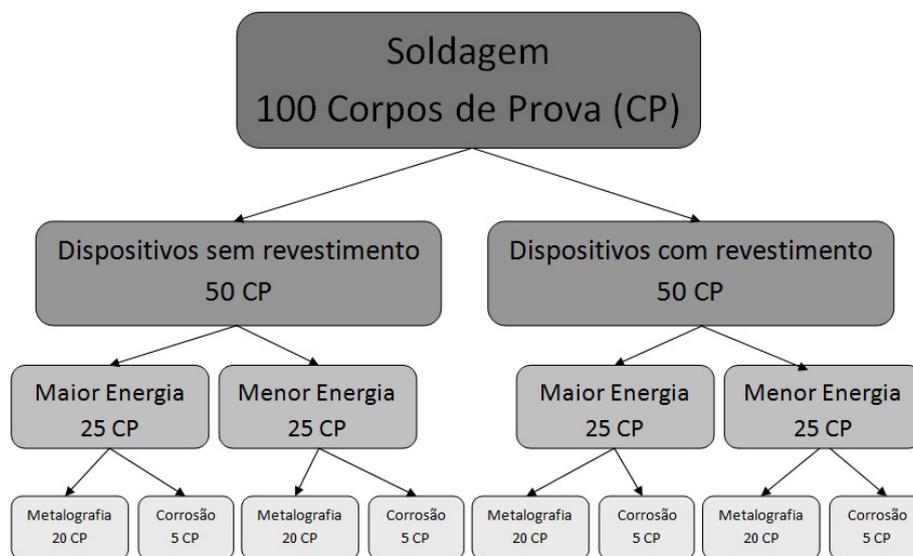


Figura 1. Programação da soldagem e análise.

O corpo de prova é composto de um segmento de tubo e uma chapa. O segmento do tubo possui diâmetro externo de 14,1 mm e espessura de 0,85 mm e a chapa tem 0,43 mm de espessura. Um corpo de prova está ilustrado na Figura 2A que apresenta também um desenho esquemático dos eletrodos e do mandril.

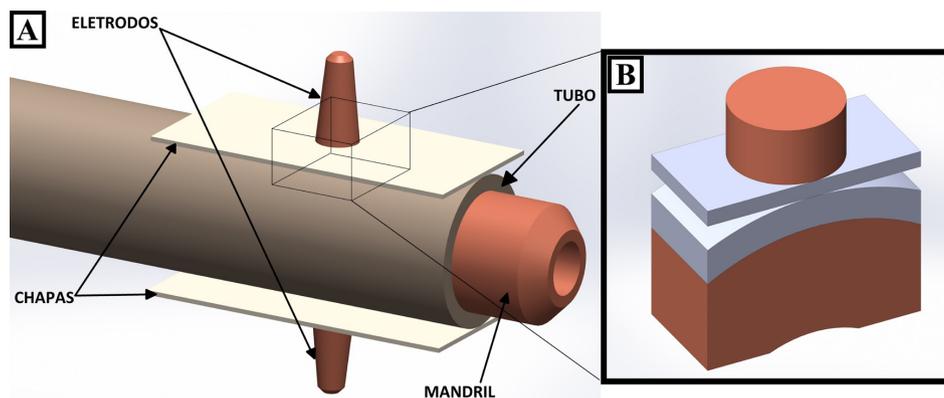


Figura 2. A - Corpo de Prova de Solda a Ponto e os Dispositivos de Soldagem. B - Detalhe do Volume de Controle Utilizado na Simulação Computacional.

O cobre do eletrodo e mandril são feitos de uma liga de cobre DIN CuCo2Be/2.1285 [8] e o material do Corpo de Prova foi o Zircalloy-4 [9]. O ideal seria considerar que as propriedades dos materiais fossem dependentes da temperatura. No entanto, não foram obtidos dados a respeito dessa dependência de forma que suas propriedades térmicas e elétricas são consideradas constantes conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Propriedades dos materiais.

| Propriedade            | CuCo2Be                   | Zircalloy-4              | Cromo [10]               |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Densidade              | 8750 kg/m <sup>3</sup>    | 6560 kg/m <sup>3</sup>   | 7190 kg/m <sup>3</sup>   |
| Condutividade Térmica  | 401 W/m.K                 | 21,5 W/m.K               | 69,1 W/m.K               |
| Calor Específico       | 420 J/kg.K                | 285 J/kg.K               | 461 J/kg.K               |
| Resistividade Elétrica | 7,15x10 <sup>-8</sup> Ω.m | 7,4x10 <sup>-7</sup> Ω.m | 1,3x10 <sup>-7</sup> Ω.m |

Adicionalmente, foi feita uma simulação computacional com o objetivo de comparar o modelamento matemático com o experimental e permitir uma análise de temperatura no local em que estava sendo realizada a soldagem. Para estimar o tamanho da lentina de solda foram utilizados como dados de entrada da simulação, os valores de corrente elétrica e força. Ao final da simulação computacional, os resultados foram comparados com os valores experimentais de zona afetada pelo calor e suas respectivas dimensões.

## 2.1. Procedimento experimental

Em cada etapa (com e sem revestimento) buscou-se encontrar os dois pontos de interesse: ponto de menor energia (corrente baixa e força alta) e ponto de maior energia (corrente alta e força baixa). Os alvos de força alta e baixa foram pré-determinados em 400N e 500N. A partir daí, foram confeccionados e analisados corpos de prova variando a corrente elétrica.

Os demais parâmetros utilizados foram: tempo de compressão = 200 ms; tempo de soldagem 40 ms e tempo de retenção 800 ms. Estes parâmetros se mantiveram inalterados durante o processo de soldagem.

Para realizar os pontos de solda, foi utilizada uma máquina de solda a ponto estacionária que é utilizada para solda de estruturas de combustíveis nucleares, com potência de 20 KVA, sem refrigeração a água, regulagem eletrônica da potência da máquina, corrente alternada e com acionamento eletrônico através de um CNC. Os equipamentos de medição dos parâmetros de soldagem (Tempo, Corrente e Força) são calibrados periodicamente.

Na análise metalográfica os corpos de prova foram cortados transversalmente, com o auxílio de um líquido refrigerante, seguidos de embutimento à quente em baquelite. Depois de lixado, o corpo de prova foi submetido a polimento com alumina em suspensão. Na última etapa de polimento, os abrasivos foram substituídos por uma solução de 0,5 ml de ácido fluorídrico 40% e 35 ml de sílica coloidal. Ao final de cada etapa as amostras foram lavadas com água desmineralizada. Após o polimento as amostras dos corpos de prova foram analisadas por microscopia óptica, de forma a caracterizar a lentina de solda na seção transversal dos corpos de prova.

As imagens das micrografias foram submetidas ao programa de tratamento de imagem, ImageJ. Com as ferramentas deste programa é feita a determinação da área transversal da lentina, que será apresentada nos resultados.

O teste de corrosão visa determinar a resistência do corpo de prova à degradação por ação de agentes químicos ou por oxidação. Este ensaio foi feito em uma autoclave: o corpo de prova foi imerso em água desmineralizada e foi submetido a uma temperatura de 300°C ± 3°C e pressão de 87 bar por 72 horas. Após lavados e secados, os corpos de provas são avaliados por inspeção visual, comparando com amostras padrões. Os corpos de provas que apresentem pontos de solda brancos ou cinzentos, assim como anéis ou zonas também nestas cores, perto ou dentro da zona termicamente afetada são considerados reprovados.

Os ensaios metalográficos com a medida da área da seção transversal da lentina de solda e os testes de corrosão são necessários para a avaliação da faixa de trabalho. Para avaliação dos corpos de prova soldados, levou-se em consideração que o ponto de energia mínima é aquele que a área da seção transversal da lentina na

análise metalográfica será superior a 1 mm<sup>2</sup> e o ponto de energia máxima é o ponto imediatamente anterior em que os corpos de prova comecem apresentar corrosão em seus testes.

Na busca de uma faixa de operação, já era esperado que alguns dos corpos de prova soldados se afastaram destas condições. Por esse motivo, no ponto de energia mínima, dos 20 corpos de provas submetidos à análise metalográfica foram selecionados 5 para representar este ponto. E no ponto de energia máxima, dos 5 corpos de prova que foram testados, foram selecionados 2.

Para ocorrer uma avaliação do aumento da área fundida no ponto de energia máxima devido a inclusão de um revestimento no eletrodo, dos 20 corpos de prova que foram submetidos à análise metalográfica no ponto de energia máxima em cada tipo de dispositivo (com e sem revestimento) foram selecionados 5 cujos parâmetros de soldagem se aproximem dos que foram aprovados nos testes de corrosão. Também foram selecionados 2 corpos de provas dos 5 que foram testados para corrosão no ponto de energia mínima para comprovação de ausência de corrosão para os parâmetros aprovados no ponto de energia mínima.

## 2.2. Simulação computacional

A geometria do problema que se deseja simular é apresentada na Figura 2A, onde estão representados os dois eletrodos, as duas chapas o tubo e o mandril de solda. Foram realizadas simplificações com intuito de reduzir o tempo de simulação, selecionando somente o volume em que há variação térmica devido à energia de solda. Esse volume de controle é representado pela Figura 2B. A análise transiente do processo de solda à ponto foi modelada como um modelo simétrico e tridimensional.

Para modelar o processo de soldagem e fazer a previsão de tamanho da lentilha e temperatura no corpo de prova foram considerados os mesmos parâmetros do processo experimental. Além disso, algumas considerações adicionais foram feitas a fim de tornar viável a simulação computacional como: perda de calor na superfície do corpo de prova por convecção e radiação e não ocorrência de difusão de elementos químicos no local de solda. O modelo numérico de previsão de temperatura consiste na resolução da equação de conservação de energia, Equação 7 aplicada sobre o volume do corpo de prova como domínio de estudo. Onde  $\rho$ ,  $C_p$  e  $k$  são propriedades termofísicas do material, respectivamente, densidade, calor específico, condutividade térmica,  $u$  e  $T$  são os campos de velocidade e temperatura, respectivamente.  $S$  é o termo fonte correspondente a todas as fontes de entrada e/ou perda de calor durante o processo.

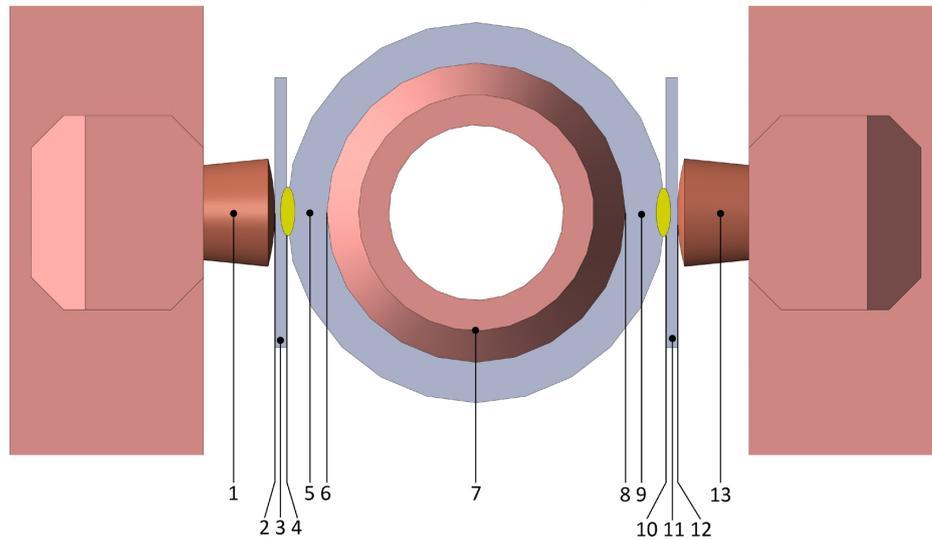
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}[\rho c_p (\vec{u}) T] = \text{div}[k[\text{grad}(T)]] + S \quad (7)$$

No processo de solda a ponto, a fonte de calor é a resistência de contato entre a chapa e o tubo. Essa resistência de contato é descrita a seguir. Este modelo propõe uma fonte de calor tridimensional onde a distribuição de calor é modelada (em volume) como um disco nas superfícies de contato entre chapas.

### 2.2.1. Resistências de contato

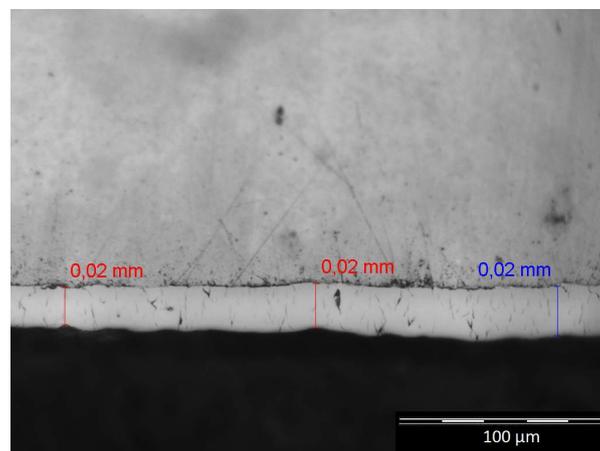
O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto, incluindo a peça de trabalho sendo soldada, é uma série de resistências, conforme ilustrado na Figura 3, e o valor delas afeta o fluxo da corrente. A corrente deve ser a mesma em qualquer ponto do circuito de tal forma que o calor gerado é diretamente proporcional à resistência nesse ponto [11].

Onde as resistências 1 e 13 são devido ao material do eletrodo, 3 e 11 ao material da grade, 5 e 9 ao material do tubo e 7 ao material do mandril. Já as demais resistências são devido ao contato entre os materiais: 2 e 12 resistência de contato entre o eletrodo e a chapa da grade. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície da grade e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força aplicada. Este é um ponto de alta geração de calor, é esperado que a superfície da grade não atinja sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (1 e 13). As resistências 6 e 8 são compatíveis com as 2 e 12, que são as resistências de contato do tubo com o mandril. As resistências 4 e 10 são do contato da chapa da grade e o tubo, que é a interface no local onde a solda deve ser formada. Esta interface é a de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor.



**Figura 3.** Pontos principais de calor nos eletrodos.

Para o cálculo da resistência a camada de filme, conforme Equação 4, foi medida a espessura da camada de revestimento de cromo cortando um eletrodo e utilizando microscopia óptica para o mesmo, conforme Figura 4. A espessura considerada na simulação foi de  $20\mu\text{m}$ .



**Figura 4.** Espessura da Camada de Cromo no Eletrodo.

### 2.2.2. Condições de contorno

A solução da Equação 2 com as condições de contorno (CC's), iniciais (CI) e a representação da fonte permitem, então, a obtenção dos valores de temperaturas a todos os instantes durante o procedimento de soldagem. Quanto às condições de contorno, foram admitidas duas condições térmicas: convecção e radiação pelas superfícies da peça. A fonte de calor tridimensional, que será a energia descrita na Equação 1, é incluída no termo fonte da Equação 2 em cada ponto de contato entre as superfícies dos componentes e pode-se, portanto, resolver o problema acoplado considerando as não linearidades devidas a propriedades termofísicas (dependentes da temperatura e composição). A convecção e radiação nas superfícies da chapa são classicamente descritos por  $q_c = h(T - T_0)$  e  $q_r = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$ , respectivamente. Onde  $T$  a temperatura final e  $T_0$  a inicial,  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W / m^2 \cdot K^4]$ ), foram admitidos emissividade ( $\varepsilon$ ) igual a 0,6 e coeficiente de convecção ( $h$ ) igual a  $10 W / (m^2 \cdot K)$ . Quanto à condição inicial, admite-se que todas as faces da chapa tenham temperatura igual a  $23^\circ\text{C}$  no início do processo.

Aplicadas as CC's e CI, uma solução para a Equação (7) é obtida por meio do método de volumes finitos, conforme detalhado por Xavier et al. [12]. Os resultados de distribuição de temperatura obtidos por meio do modelo, foram adicionalmente utilizados para previsão de tamanho da lentilha utilizando o calor de fusão e temperatura de fusão do material [13,14].

### 3. Resultados e Discussão

Conforme foi explanado no procedimento experimental, dos 100 corpos de prova soldados, foram separados 28 que melhor representariam o ponto de mínima e máxima energia dos dispositivos com e sem revestimentos. Os resultados estão nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados e resultados da área da lentilha de solda na micrografia.

| Tipo Revestimento do Eletrodo | Tipo de Potência | Número Sequencial do Corpo de Prova | Corrente [kA] | Força [N] | Área [mm <sup>2</sup> ] Metalografia |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|---------------|-----------|--------------------------------------|
| Sem Revestimento              | Mínima           | SRMI07                              | 2,99          | 521       | 1,01                                 |
|                               |                  | SRMI17                              | 3,08          | 497       | 1,35                                 |
|                               |                  | SRMI79                              | 2,96          | 483       | 1,13                                 |
|                               |                  | SRMI80                              | 3,03          | 483       | 1,11                                 |
|                               |                  | SRMI97                              | 3,18          | 498       | 1,29                                 |
|                               | Máxima           | SRMA09                              | 3,71          | 389       | 1,56                                 |
|                               |                  | SRMA10                              | 3,82          | 383       | 1,76                                 |
|                               |                  | SRMA71                              | 3,83          | 398       | 1,79                                 |
|                               |                  | SRMA72                              | 3,88          | 391       | 1,82                                 |
|                               |                  | SRMA73                              | 3,89          | 390       | 1,94                                 |
| Revestimento de Cromo         | Mínima           | RCMI26                              | 2,88          | 505       | 1,22                                 |
|                               |                  | RCMI27                              | 2,85          | 502       | 1,18                                 |
|                               |                  | RCMI28                              | 2,88          | 505       | 1,22                                 |
|                               |                  | RCMI29                              | 2,88          | 509       | 1,17                                 |
|                               |                  | RCMI30                              | 2,99          | 509       | 1,12                                 |
|                               | Máxima           | RCMA36                              | 4,42          | 388       | 2,4                                  |
|                               |                  | RCMA37                              | 4,55          | 385       | 2,03                                 |
|                               |                  | RCMA38                              | 4,38          | 394       | 1,95                                 |
|                               |                  | RCMA39                              | 4,34          | 394       | 2,03                                 |
|                               |                  | RCMA40                              | 4,10          | 401       | 2,00                                 |

Onde: SRMI – Sem Revestimento Potência Mínima, SRMA – Sem Revestimento Potência Máxima, RCMI – Revestimento de Cromo Potência Mínima e RCMA – Revestimento de Cromo Potência Máxima.

**Tabela 3.** Parâmetros utilizados e resultados de Corrosão.

| Tipo Revestimento do Eletrodo | Tipo de Potência | Número Sequencial do CP | Corrente [kA] | Força [N] | Situação Corrosão |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|---------------|-----------|-------------------|
| Sem Revestimento              | Mínima           | SRMI04                  | 2,71          | 516       | Aprovado          |
|                               |                  | SRMI08                  | 3,04          | 518       | Aprovado          |
|                               | Máxima           | SRMA70                  | 3,79          | 391       | Aprovado          |
|                               |                  | SRMA95                  | 3,78          | 386       | Aprovado          |
| Revestimento de Cromo         | Mínima           | RCMI31                  | 2,94          | 509       | Aprovado          |
|                               |                  | RCMI32                  | 2,95          | 512       | Aprovado          |
|                               | Máxima           | RCMA41                  | 4,14          | 392       | Aprovado          |
|                               |                  | RCMA42                  | 4,26          | 391       | Aprovado          |

Onde: SRMI – Sem Revestimento Potência Mínima, SRMA – Sem Revestimento Potência Máxima, RCMI – Revestimento de Cromo Potência Mínima e RCMA – Revestimento de Cromo Potência Máxima.

Nas soldas com dispositivos sem revestimento, a faixa de força é de 391 a 521 N, já com os dispositivos cromados a faixa é de 392 a 509. A faixa de força desse experimento não teve uma variação efetiva uma vez que foi pré-fixado, porém a força sofre variações devido a diferenças na geometria do material.

Mas a variação da corrente foi significativa. Nas soldas com os dispositivos sem revestimento a faixa é de 2,96 a 3,78 kA e quando feito com os dispositivos com revestimento de cromo duro a faixa foi de 2,85 a 4,26 kA. Um aumento de 41,8% na largura de faixa. Esse aumento pode ser explicado pela possibilidade de aumento de temperatura na superfície de contato eletrodo/chapa, sem que houvesse desprendimento do cobre. É possível comparar as faixas de trabalho através de um gráfico, conforme Figura 5.

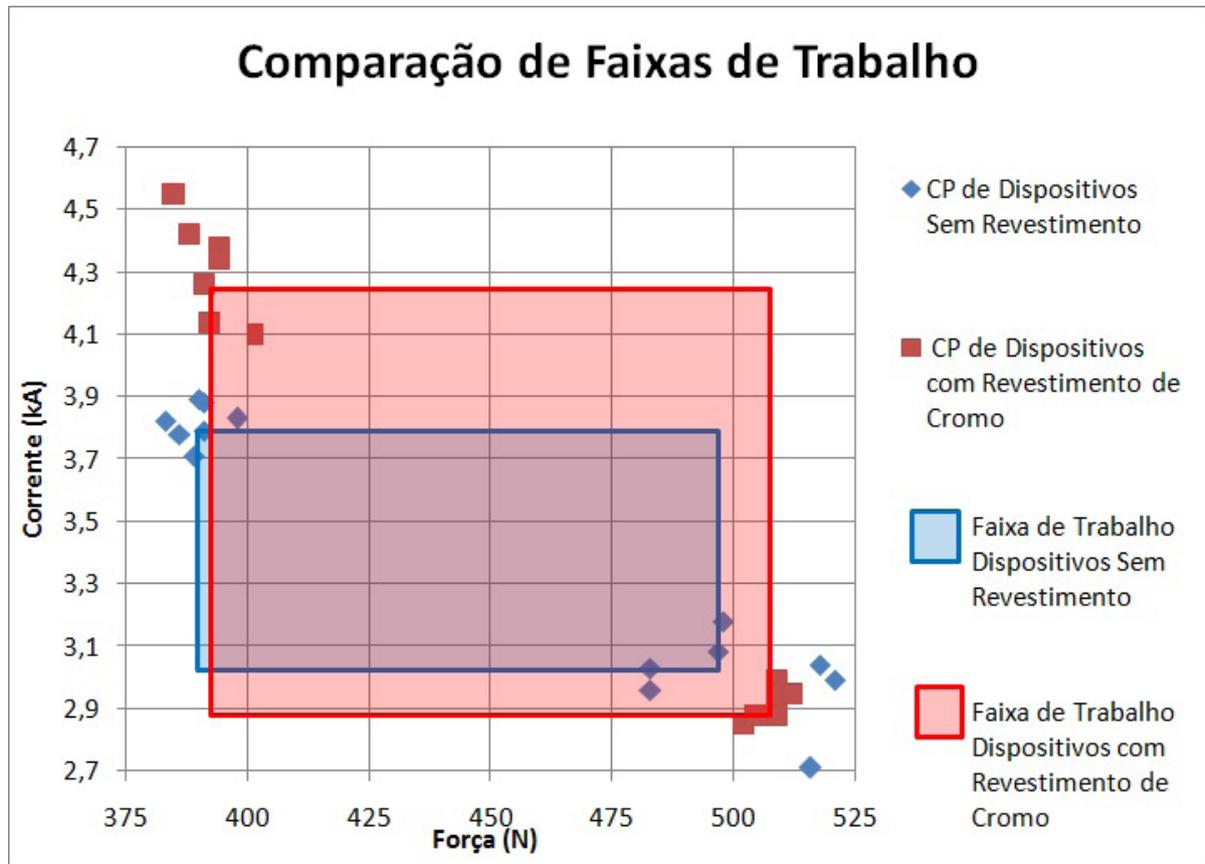


Figura 5. Gráfico Comparativo de Faixas de Trabalho.

Existe também um aumento na área da seção transversal no ponto de maior energia. Quando soldados com dispositivos sem revestimento, a média das áreas é de 1,774 mm<sup>2</sup> passando para 2,082 mm<sup>2</sup> quando soldados com dispositivos com revestimento. Isto representa um aumento de 14,8% no volume da lentilha de solda que pode melhorar a resistência da soldagem.

Utilizando a Equação 6, é possível comparar o aumento da energia de soldagem com o aumento da área da seção transversal da lentilha de solda. Conforme Figura 6, utilizando os dispositivos de soldagem revestidos, ocorreu um maior volume de solda. Isso se deve a maior energia que pode ser aplicada devido à proteção concedida pela camada de cromo na superfície.

A simulação computacional teve dois objetivos principais: o primeiro objetivo era apresentar a distribuição de temperatura da região soldada. O segundo objetivo, que foi alcançado a partir do primeiro, é verificar o tamanho da região soldada.

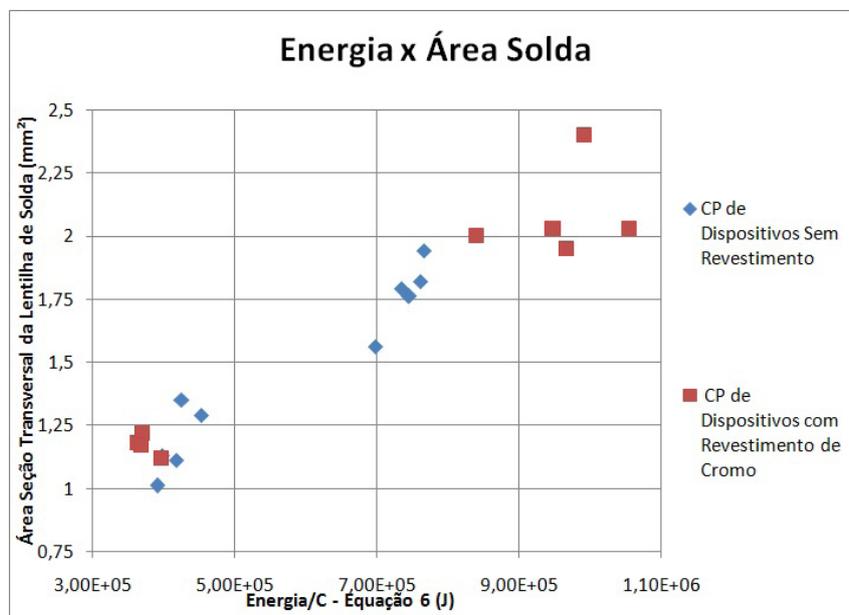


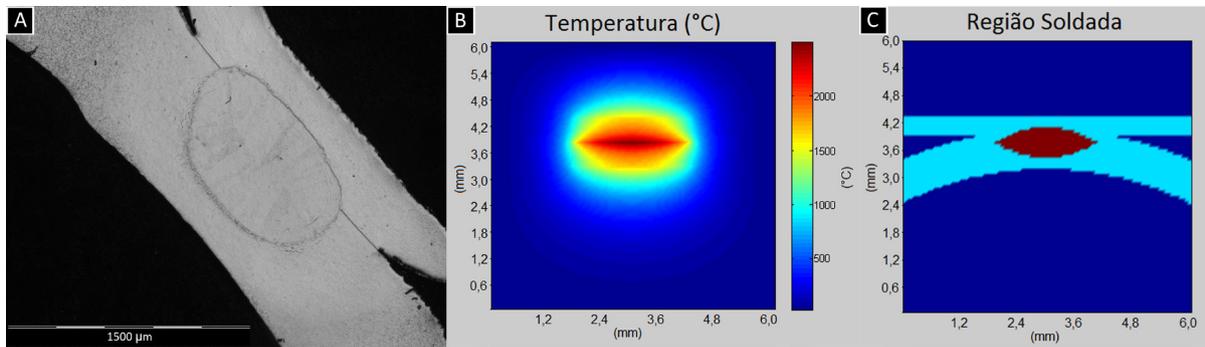
Figura 6. Gráfico da Energia x Área da Seção transversal da Lentilha de Solda.

Após a realização de todas as etapas experimentais do trabalho, utilizou-se dos parâmetros de corrente e força, listados na Tabela 2, como dados de entrada da simulação computacional. Utilizando-se da solução numérica das equações, obteve-se a distribuição de temperatura no plano central da lentilha de solda, conforme Figura 7 B e Figura 8 que apresentam as distribuições de temperaturas conforme legenda de cores em uma região de 6x6 mm no entorno da zona fundida e conseqüente formação da lentilha de soldagem a ponto.

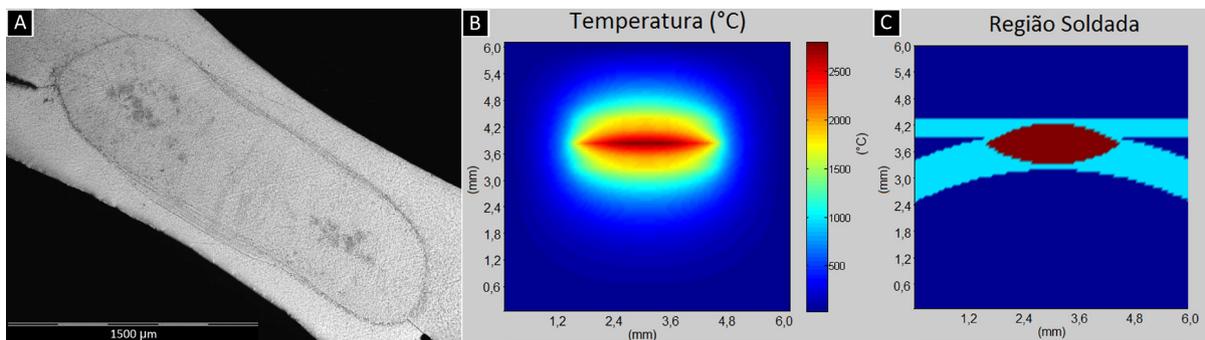
Tabela 4. Resultados das temperaturas de superfícies do eletrodo e mandril obtidos por simulação computacional.

| Tipo Revestimento do Eletrodo | Tipo de Potência | Número Sequencial do CP | Temperatura na Superfície do eletrodo (°C) | Temperatura na Superfície do mandril (°C) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|--|---|
| Sem Revestimento              | Mínima           | SRMI07                  | 1716                                       | 1562                                      |
|                               |                  | SRMI17                  | 1753                                       | 1602                                      |
|                               |                  | SRMI79                  | 1716                                       | 1563                                      |
|                               |                  | SRMI80                  | 1740                                       | 1589                                      |
|                               |                  | SRMI97                  | 1786                                       | 1638                                      |
|                               | Máxima           | SRMA09                  | 1812                                       | 1658                                      |
|                               |                  | SRMA10                  | 1833                                       | 1684                                      |
|                               |                  | SRMA71                  | 1831                                       | 1681                                      |
|                               |                  | SRMA72                  | 1843                                       | 1694                                      |
|                               |                  | SRMA73                  | 1845                                       | 1697                                      |
| Revestimento de Cromo Duro    | Mínima           | RCMI26                  | 1746                                       | 1594                                      |
|                               |                  | RCMI27                  | 1737                                       | 1583                                      |
|                               |                  | RCMI28                  | 1746                                       | 1594                                      |
|                               |                  | RCMI29                  | 1745                                       | 1592                                      |
|                               |                  | RCMI30                  | 1784                                       | 1634                                      |
|                               | Máxima           | RCMA36                  | 1854                                       | 1763                                      |
|                               |                  | RCMA37                  | 1860                                       | 1779                                      |
|                               |                  | RCMA38                  | 1852                                       | 1756                                      |
|                               |                  | RCMA39                  | 1820                                       | 1750                                      |
|                               |                  | RCMA40                  | 1830                                       | 1692                                      |

Onde: SRMI – Sem Revestimento Potência Mínima, SRMA – Sem Revestimento Potência Máxima, RCMI – Revestimento de Cromo Potência Mínima e RCMA – Revestimento de Cromo Potência Máxima.



**Figura 7.** A – Micrografia do corpo de prova SRMI07, B - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMI07, C – Área Fundida (em vermelho) formando a lentilha de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMI07.



**Figura 8.** A – Micrografia do corpo de prova SRMI72, B - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMI72, C – Área Fundida (em vermelho) formando a lentilha de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMI72.

Para determinar área da região fundida a partir das temperaturas apresentadas na parte B foi inferido que temperaturas iguais ou maiores que a temperatura de fusão do Zircônio determinaria a geometria e a área da lentilha de solda, conforme região vermelha da parte C da Figura 7 e Figura 8. A área simulada foi comparada com a respectiva micrografia (parte A) em relação à área e geometria.

A Figura 7 mostra este processo descrito para uma soldagem realizada no ponto de energia mínima e a Figura 8 para uma soldagem no ponto de energia máximo, respectivamente. Para ambos os casos foram obtidos resultados coerentes e compatíveis em relação à geometria da região soldada.

Estes parâmetros foram avaliados para todas as 20 micrografias descritas na Tabela 2 e as geometrias simuladas das regiões soldadas de todas as amostras foram consistentes com as respectivas imagens micrográficas. A área da região vermelha (simulado) na parte C foi comparada com as áreas que foram obtidas das micrografias utilizando o ImageJ (experimental). A Figura 9 apresenta essa comparação para as amostras soldadas com dispositivos sem revestimento. Os dados experimentais (em vermelho) apresentam uma barra de erro devido às incertezas das medições. Pode-se observar que os valores das áreas encontrados na simulação se apresentam próximos dos obtidos experimentalmente, o que valida o procedimento de simulação considerado.

O mesmo procedimento foi realizado para os dispositivos de soldagem com revestimento de Cromo. A Figura 10 apresenta essa comparação. Similarmente aos resultados sem revestimento, os resultados previstos pelas simulações quando comparados aos resultados experimentais (em vermelho) apresentam uma boa concordância dentro da variabilidade do processo e a incerteza da medição. Pode-se observar que neste caso os valores das áreas encontrados na simulação também se apresentam próximos dos obtidos experimentalmente. Portanto, podemos considerar que o modelo foi validado e pode ser utilizado para se prever as condições seguras para se realizar os procedimentos de soldagem.



**Figura 9.** Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas micrografias em eletrodos e mandris sem revestimento, onde: SRMI – Sem Revestimento Potência Mínima, SRMA – Sem Revestimento Potência Máxima.



**Figura 10.** Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas micrografias em eletrodos e mandris com revestimento de cromo duro, onde: RCMI – Revestimento de Cromo Potência Mínima e RCMA – Revestimento de Cromo Potência Máxima.

Resultados da simulação computacional (Figura 7B e Figura 8B) apresentam a distribuição de temperatura na região termicamente afetada pelo procedimento de soldagem. Essa distribuição foi utilizada para analisar a temperatura na área de contato com o eletrodo e mandril para avaliar possíveis danos aos mesmos. As máximas temperaturas obtidas nos contatos com os dispositivos de soldagem são informados na Tabela 4.

Analisando a Tabela 4, a temperatura no ponto de energia mínima foi aproximadamente a mesma para eletrodos revestidos e sem revestimento. A temperatura dos eletrodos revestidos foi um pouco superior, isso pode ser explicado pela resistência de camada de filme dado pela Equação 5. Já no ponto de energia máxima, os valores de temperatura aumentaram aproximadamente 100°C no mandril nos eletrodos com revestimento. Isso se deve ao aumento de energia fornecida à região de contato.

A corrosão ocorre quando há desprendimento de material do eletrodo no corpo de prova. Esse desprendimento deve se a fusão do eletrodo. Nos casos testados não houve corrosão, conforme Tabela 3, então pode se dizer que o aumento de energia, ilustrado na Figura 6 foi possível porque o cromo tem uma maior temperatura de fusão protegendo o eletrodo. Em suma, o revestimento de cromo nos eletrodos permite a utilização de uma energia maior na região da solda sem que ocorra corrosão.

Os resultados obtidos nos experimentos presentes neste trabalho poderão, de maneira relevante, auxiliar a compreender de forma mais aprofundada o processo de soldagem a ponto em ligas de zircônio e como a inclusão de uma camada de cromo pode influenciar na qualidade da junta soldada.

Trabalhos futuros poderão comparar a vida útil dos eletrodos sem revestimento e com revestimento de cromo, pois os eletrodos sem revestimento para soldagem em zircônio têm uma vida útil muito curta quando comparada a eletrodos para solda de aço utilizado na indústria automobilística. Como o revestimento de cromo protege o eletrodo, isso poderá trazer impactos positivos também a vida útil do mesmo.

#### 4. Conclusões

A utilização de uma camada de cromo na superfície dos dispositivos de soldagem (eletrodo e mandril) no processo de soldagem de chapas em tubos de Zircônio, utilizando a solda a ponto por resistência elétrica, permitiu um aumento na energia de soldagem de uma média de 7,41E+05°C J para 9,60E+05°C J, isso corresponde a um aumento de 23%, conforme Figura 6. Através de análises das micrografias e dos ensaios de corrosão, conclui-se que ocorre um aumento de 41,8% na largura de faixa quando os eletrodos e mandril de solda possuem revestimento. Isso comprova que a inclusão de uma camada de cromo nos dispositivos de soldagem trará vantagem como o aumento da faixa de parâmetros e uma influência menor na corrosão em relação aos dispositivos sem revestimentos, já que o cromo protege o eletrodo mesmo utilizando uma energia maior. O aumento da energia também aumentou o volume da lentilha. Isto trás vantagens como o aumento da resistência mecânica da solda.

Este trabalho apresentou simulações computacionais do crescimento da lentilha de solda. Foi desenvolvido um modelo tridimensional e utilizado o método de volumes finitos em regime transiente. Foram consideradas todas as resistências de contato na simulação computacional. Com essa simulação foi possível determinar a área lentilha de solda em uma secção transversal ao centro. A comparação dos resultados das simulações com resultados experimentais foi satisfatória, pois o erro médio entre os dados de simulação e experimental apresentados nas Figuras 9 e 10 é de 5%. Com o modelo apresentado, é possível prever o volume da lentilha de solda utilizando os parâmetros de soldagem desejados. Foi também possível visualizar a distribuição de temperatura na região da solda e analisar a temperatura na superfície de contato dos dispositivos de soldagem. Essa temperatura foi um pouco maior nos dispositivos revestidos, pois esse suporta uma energia maior.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a INB e a PPGEM pelo incentivo concedido.

#### Referências

- |   |   |
|---|---|
| <p>[1] Avila TLD, Bracarense AQ, Influência dos parâmetros de soldagem no ensaio de torção de solda a ponto em um dispositivo automatizado recém desenvolvido. <i>Soldagem e Inspeção</i>. 2017;22(2):228-237. <a href="http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2202.11">http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2202.11</a>.</p> <p>[2] Braunovic M, Konchits VV, Myshkin NK. <i>Electrical contacts fundamentals, applications and technology</i>. Boca Raton: Taylor &amp; Francis Group, LLC; 2006.</p> | <p>[3] Tan W, Zhou Y, Kerr HW, Lawson S. A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets. <i>Journal of Physics. D, Applied Physics</i>. 2004;37(14):1998-2008. <a href="http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/37/14/017">http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/37/14/017</a>.</p> <p>[4] Silva RF, Vieira SL. Influência do tipo de revestimento na vida útil dos eletrodos na soldagem a pontos. <i>Soldagem e Inspeção</i>. 2008;13(2):105-110.</p> |
|---|---|

- [5] Guedes JBP, Gonçalves RA, Scotti A. Avaliação de desgaste de eletrodos em solda a ponto por resistência de chapas galvanizadas. *Soldagem e Inspeção*. 2005;10(2):105-110.
- [6] Delgado-Pamanes MF, Maldonado-Ruiz SI, Guerrero-Mata MP, Olvera-Vázquez ZL. Evaluación del deterioro de los electrodos al incrementar el número de pulsos del tiempo de soldadura en aceros IF y HSLA galvanizados y la afectación de las propiedades mecánicas en los puntos de soldadura. *Soldagem e Inspeção*. 2016;21(4):469-482. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2104.07>.
- [7] Branco HLO, Okimoto PC. Análise do desgaste de capas de eletrodos de solda ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas. *Soldagem e Inspeção*. 2012;17(4):347-355. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242012000400009>.
- [8] MatWeb Material Property Data. Blacksburg: MatWeb; 2018 [acesso em 20 jan. 2018]. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84db99f39a0c4640a3536f9f13293cde>
- [9] MatWeb Material Property Data. Blacksburg: MatWeb; 2018 [acesso em 20 jan. 2018]. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e36a9590eb5945de94d89a35097b7faa>
- [10] MatWeb Material Property Data. Blacksburg: MatWeb; 2018 [acesso em 20 jan. 2018]. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=25ce9b7f40364cf79d54ed0db5c8e41f>
- [11] Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR. (1983). ASM handbook. 9th ed. Ohio: ASM International. (Welding, Brazing and Soldering, vol. 6).
- [12] Xavier CR, Delgado Junior HG, Castro JA, Ferreira AF. Numerical predictions for the thermal history, microstructure and hardness distributions at the HAZ during welding of low alloy steels. *Materials Research*. 2016;19(3):520-533. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0068>.
- [13] Molenda CHA, Paris AAF, Limberger IF, Silva RB, Oliveira LM, Righi LA. Simulação numérica do crescimento da lentilha de solda obtida pelo processo de soldagem a ponto por resistência elétrica no aço inox AISI 304. *Soldagem e Inspeção*. 2010;15(4):307-316. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000400008>.
- [14] Srinivasaraju P, Raju JVN, Varma PSP, Kumar KA. Temperature Distribution using RSW process on coupled analysis weld nugget. *IJDETR*. 2013;2(19):2342-2346.