

ANÁLISE DO REVESTIMENTO DE CROMO EM ELETRODOS DE SOLDADA A PONTO POR RESISTÊNCIA EM LIGAS DE ZIRCÔNIO*

João Batista Meireles¹
José Adilson de Castro²

Resumo

Um processo de união dos componentes que compõe a estrutura de um combustível nuclear é a soldagem a ponto por resistência elétrica. Os componentes soldados são chapas e tubos de fabricados de ligas de Zircônio, que é conhecido por sua secção de choques a neutros ser muito baixa e por sua temperatura de fusão muito alta. Devido à alta temperatura de fusão, a faixa de soldas aceitáveis é pequena. Para uma abertura desta faixa de trabalho, foi proposta a inclusão de uma camada micrométrica de cromo na superfície do eletrodo de cobre. O cromo tem uma temperatura de fusão maior do que o cobre, e por esse motivo protege o eletrodo e não altera significativamente o fluxo elétrico. Foram avaliados testes de corrosão e ensaios micrográficos para comprovar um ganho de faixa de trabalho e consequente aumento do volume da lentilha de solda.

Palavras-chave: Zircônio; Solda a Ponto; Energia Nuclear

ANALYSIS OF CHROME COATING OF RESISTENCE SPOT WELDING ELECTRODES IN ZIRCONIUM ALLOYS

Abstract

One of the joining processes of the metal components that make up the structure of a nuclear fuel is the RSW (Resistance Spot Welding). The components that are welded are sheets and tubes made of Zirconium alloys. It is known for a low neutron-capture cross-section and its melting temperature too high. Since of the high melt temperature, the range of acceptable welds is small. To increase this working range, a coating of chromium was tested on the surface of the electrode. Chromium has a higher melting temperature than the copper therefore protects the electrode and does not significantly change the electric flux because the layer is a micrometric. For the evaluation of the increase of working range, metallographic tests were used to determine the lentil size and the corrosion tests were used either.

Keywords: Zirconium; Resistance Spot Welding; Nuclear Energy.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na produção de combustíveis nucleares é utilizado o processo de solda a ponto por resistência. Este é utilizado para união de componentes metálicos que formam a estrutura do combustível nuclear. Esta estrutura, que é normalmente chamada de esqueleto, é formada por tubos e de reticulados de chapas finas chamados de grades que são de ligas de zircônio. Os tubos e as grades são unidos por este processo, formando esta estrutura rígida. Um esqueleto possui em torno de 1300 pontos soldados.

A solda a ponto por resistência é utilizada em diversos setores da indústria. Nela, o calor gerado é resultante da resistência de contato entre as chapas à passagem de corrente elétrica em um intervalo de tempo determinado. A união entre a chapa e o tubo ocorre pela fusão e solidificação do material no ponto de solda devido a esse calor gerado. Os eletrodos aplicam uma força antes, durante e após a aplicação da corrente para aumentar a área de contato da solda nas superfícies sobrepostas [1].

No processo de solda do esqueleto, os eletrodos têm forma de pontas arredondadas e desempenham a função de aplicar a força necessária para a solda e conduzir a corrente até o material [2]. Os eletrodos utilizados na solda da estrutura do combustível nuclear não possuem refrigeração, então a dissipação do calor gerado durante o processo de soldagem ocorre por meio da convecção natural e irradiação. Além do eletrodo, existe outro dispositivo de solda que é importante no processo de soldagem, que é chamado de mandril de solda. O mandril suporta a força que os eletrodos aplicam na chapa e conseqüentemente transferido para o tubo, impedindo que o tubo se deforme. O mandril também tem a função de condutor elétrico, estando o mesmo no caminho percorrido pela corrente elétrica entre o eletrodo superior e inferior (Figura 6).

Existem vários parâmetros para a realização de uma solda, entretanto neste estudo, dois destes parâmetros que são corrente e força, foram estudados sobre a influência sobre a variação de energia durante a realização da solda.

A variação de força aplicada pelos eletrodos influencia no valor de resistência de contato. A resistência de contato na interface das chapas a serem soldadas 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, a força é inversamente proporcional a resistência de contato [3]. E a corrente elétrica tem relação direta com a energia. O aumento da corrente aumenta o fluxo de elétron na região de contato, gerando maior calor. [4].

Nas aplicações automotivas, que utilizam aço carbono como matéria prima da solda que possui uma temperatura de fusão em torno de 1400°C já existe a preocupação com o desgaste de eletrodo. Panames [6] estudou o desgaste do eletrodo durante o aumento do número de pulsos do tempo de solda em aços IF e HSLA. O maior aporte térmico, devido o aumento do tempo de soldagem, causa desgaste no eletrodo e o desgaste foi avaliado experimentalmente analisando os eletrodos e as regiões soldadas, informando graficamente a quantidade de pontos de solda que era possível realizar, mantendo a integridade da solda.

Branco [7] analisou do desgaste de capas de eletrodos de solda a ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas. As capas

de eletrodos citada no estudo de Branco não podem ser comparadas à camada de cromo proposto neste trabalho, pois as capas de eletrodos de Branco são parecidas com mini-eletrodos que são sacados quando a vida útil do mesmo acaba, enquanto a camada de cromo é adicionada diretamente no eletrodo não sendo possível sua troca. No trabalho de Branco ele avalia 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.

2 DESENVOLVIMENTO

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 determinado 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). Os demais parâmetros de solda são mantidos inalterados.

De acordo com normas utilizadas na indústria nuclear, 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 ultrapasse a espessura das chapas, o que é chamado de expulsão. Uma das dificuldades da Solda a Ponto em chapas de liga de Zircônio é a temperatura de fusão do Zircônio. O Zircônio é um dos materiais escolhidos para aplicação de energia nuclear devido a sua secção de choques de nêutrons ser muito baixa, porém ele tem uma temperatura de fusão alta, em torno de 1855°C. Para que ocorra a solda deve haver uma resistência de contato alta entre chapa/tubo para que ocorra a fusão. Resolvendo a equação de energia levando em consideração a resistência de contato, a temperatura no centro da solda pode chegar a aproximadamente 2500°C, conforme Figura 1. Porém, a temperatura na superfície o eletrodo no contato eletrodo/chapa não pode ser alta suficiente causando a fusão do cobre. Caso a temperatura de contato do eletrodo/chapa for superior a de fusão do cobre que é de 1085°C, pode haver o desprendimento do material do eletrodo, devido à fusão do mesmo e este pode ser aderir ao zircônio. Isso irá acontecer antes da expulsão do material [5]. Em aplicações nucleares existem requisitos de ausência de corrosão. No caso das ligas de zircônio quando há inclusão metálica de cobre pode ocorrer uma corrosão galvânica. Para que não ocorra esse depósito de material, se restringe a faixa de parâmetros. A Figura 2 exemplifica a faixa de trabalho.

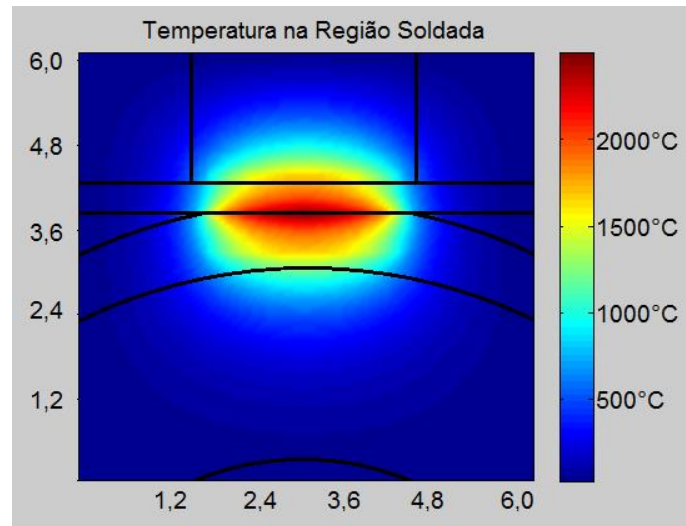


Figura 1: Gráfico da Temperatura na Região Soldada.

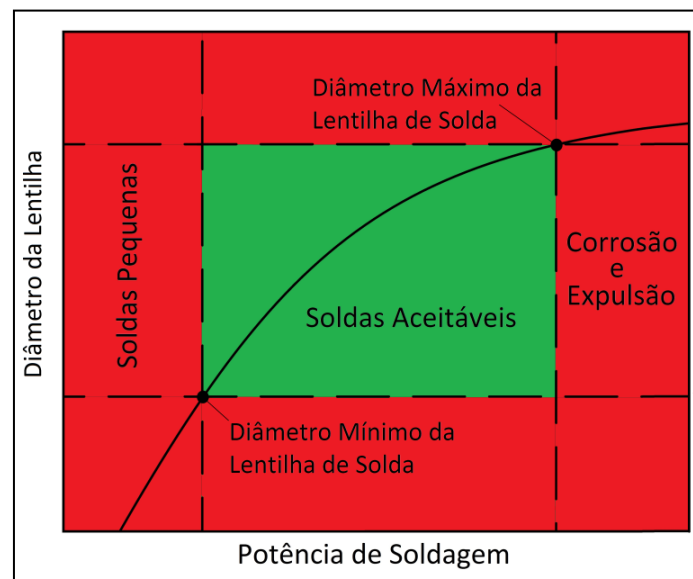


Figura 2: Curva de soldabilidade

Foram realizados ensaios micrográficos e ensaios de corrosão para se determinar a faixa de trabalho. Para se verificar o ponto de energia mínima, se verificava nos ensaios micrográficos o tamanho da lentilha, por meio da área de sua secção transversal ao seu centro. A Figura 3 apresenta três micrografias, Sendo, a primeira como fica a união entre as chapas quando a energia é muito pequena e não é suficiente nem para iniciar a fusão dos materiais. Na micrografia seguinte, existe a fusão do material, mas a área da secção transversal, segundo requisitos, não é grande suficiente para suportar a carga mínima. Já na terceira micrografia é apresentada uma lentilha que possui uma área que atende os requisitos.

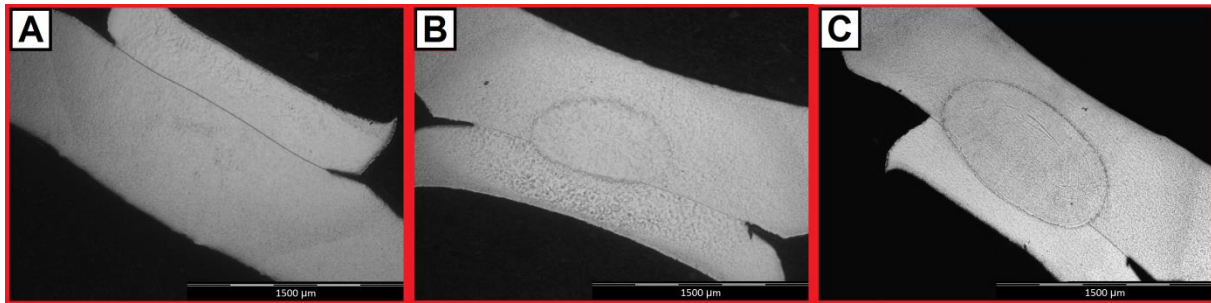


Figura 3: Lentilha de Solda Mínima: A - Ausência de lentilha de solda; B- Lentilha de solda pequena (menor que 1 mm²); C- Lentilha de solda Mínima (aproximadamente 1mm²)

No ponto de energia máxima a preocupação maior é que não exista corrosão, então os corpos de provas que foram submetidos a ensaios de corrosão em uma autoclave simulando o ambiente de um reator foram avaliados. A Figura 4 apresenta um corpo de prova que apresenta corrosão e um que não. Adicionalmente também foram realizados testes de corrosão no ponto de energia mínima e testes micrográficos no ponto de energia máximo.

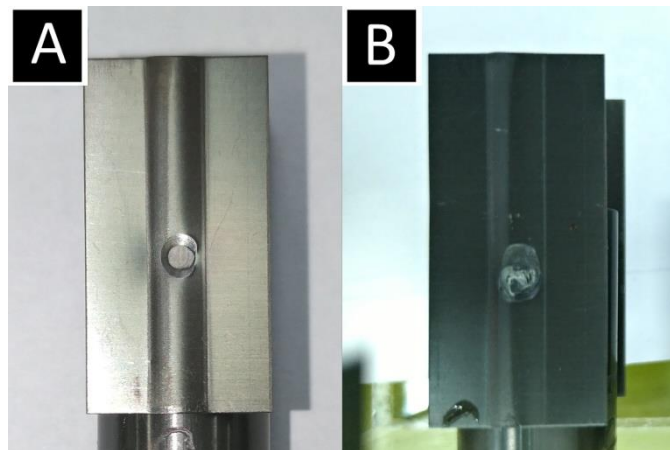


Figura 4: Lentilha de Solda Máxima: A – Superfície do corpo de prova sem corrosão; B – Superfície do corpo de prova com corrosão.

O que foi estudado nesse trabalho é um método para proteger o eletrodo dessa temperatura elevada e aumentar a faixa de soldas aceitáveis: 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) que não se fundiria com o liga de zircônio na superfície e não traria impactos significativos à passagem de corrente, por ser somente uma camada micrométrica (Figura 5). Esse estudo permitiria aumentar a faixa de corrente de soldagem no ponto de potência máxima, devido à possibilidade de aumento de temperatura no contato eletrodo/chapa.

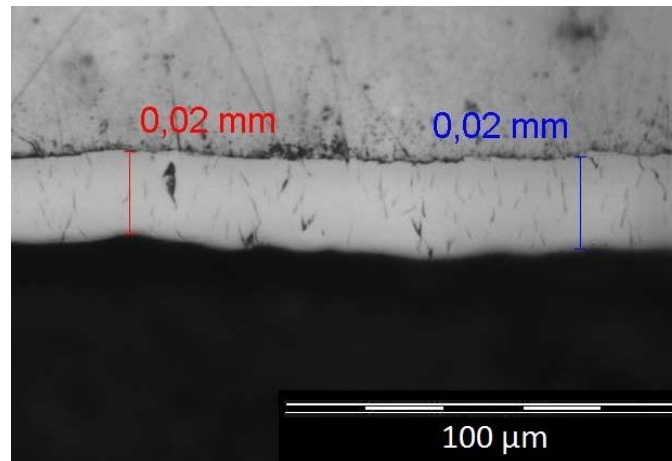


Figura 5: Camada de Cromo no Eletrodo

2.1 Materiais e Métodos

Foi utilizado um corpo de prova para simular a solda que ocorre no esqueleto. Ele é composto de um segmento do tubo do esqueleto e uma chapa de mesma espessura que a da grade. Um corpo de prova está ilustrado na Figura 6 que apresenta também um desenho esquemático dos eletrodos e do mandril.

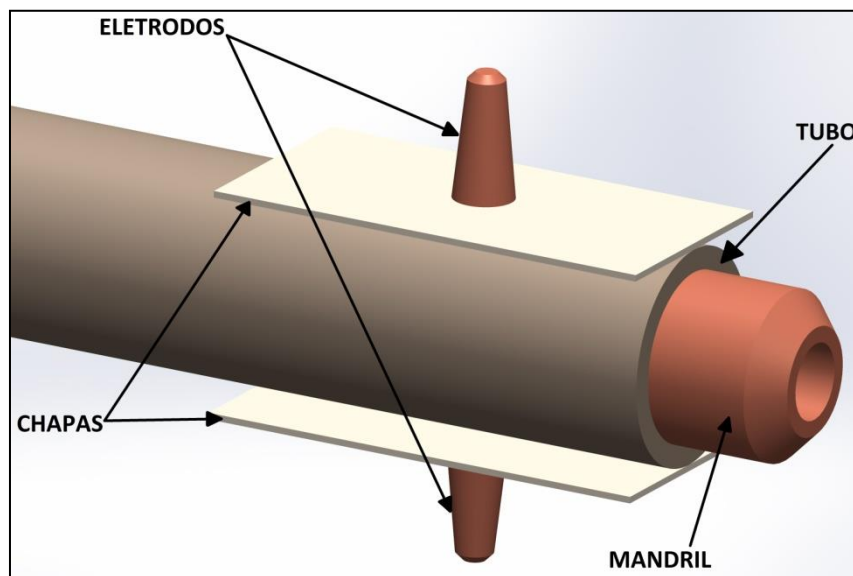


Figura 6: Corpo de Prova de Solda a Ponto e os Dispositivos de Solda.

Para verificar se o revestimento de cromo trará vantagens ao processo de soldagem o experimento foi dividido em duas etapas. Primeiramente foram soldados e avaliados corpos de prova com eletrodos sem revestimento, depois foram soldados e avaliados corpos de prova com eletrodos e mandril com revestimento, avaliando o ponto de mínima e máxima energia.

2.2 Procedimento Experimental.

Em cada etapa (com e sem revestimento) foi buscado 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 alto e baixo foram pré-

determinados e são 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 solda 40 ms e tempo de retenção 800 ms. Estes parâmetros se mantiveram inalterados durante o processo de solda.

Para realizar os pontos de solda, foi utilizada uma máquina de solda a ponto estacionária utilizada para solda de esqueletos de combustíveis nucleares, com potência de 20 KVA, sem refrigeração a água, regulação eletrônica da potência da máquina, corrente alternada, com acionamento eletrônico através de um CNC. Ela sofre um processo de calibração dos parâmetros de soldagem (Tempo, Corrente e Força), periodicamente.

Na análise micrográfica os corpos de prova são cortados transversalmente, com o auxílio de um líquido refrigerante, de modo que possibilite sua análise, seguidos de embutimento à quente em baquelite. Depois são preparados para análise micrográfica através de lixamento utilizando uma politriz, substituindo progressivamente as lixas P220, P320, P400 e P600. Depois de lixado, o corpo de prova é submetido a polimento com alumina em suspensão ou pasta de diamante sintético. Na última etapa de polimento, os abrasivos são substituídos por uma solução de 0,5 ml de ácido fluorídrico 40% e 35 ml de sílica coloidal. Ao final de cada etapa deve-se lavar com água desmineralizada. Após o polimento as amostras dos corpos de prova foram analisadas por microscopia óptica, de forma a caracterizar a lentilha de solda na seção transversal dos corpos de prova. Com as imagens das micrografias, estas são submetidas ao programa de tratamento de imagem, ImageJ, para determinar o tamanho da lentilha. Com a análise micrográfica foi possível verificar a existência da lentilha de solda na corrente mínima testada e a existência de poros e trincas na corrente máxima testada. Esses resultados comprovarão a união nas chapas em ambos os casos e também comprovará o aumento da faixa de parâmetros para a solda com o revestimento de cromo nos eletrodos e mandris.

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 submetido a uma temperatura de $300^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e pressão de 87 bar por 72 horas. Depois de lavados e secados, os corpos de prova são avaliados por inspeção visual comparado com amostras padrões. Os corpos de prova que apresentem pontos de solda branco ou cinzentos, assim como anéis ou zonas também nestas cores, perto ou dentro da zona termicamente afetada são considerados reprovados.

2.3 Resultados e Discussão

Para evidenciar a faixa de trabalho foi necessário utilização de alguns requisitos: o ponto de energia mínima foi evidenciado quando a área da lentilha de solda no ensaio micrográfico ultrapasse 1 mm^2 . Adicionalmente os corpos de prova não poderão possuir corrosão. O ponto de energia máxima foi aquele ponto imediatamente anterior em que os corpos de prova comecem apresentar corrosão em seus testes. Também foi verificada a área na seção transversal da lentilha para avaliação de quantidade de material fundido.

De todos os corpos de prova que foram confeccionados, cinco corpos de prova de micrografia e dois de corrosão foram selecionados para representar cada ponto de energia em cada tipo de dispositivos de solda (com e sem revestimento). Com essa seleção foram encontradas duas faixas de energia (corrente e força), uma de eletrodo

e mandril sem revestimento e outro com revestimento em cromo. Os resultados dos testes estão na Tabela 1 e Tabela 2.

Nas soldas com os dispositivos sem revestimento, a faixa de força foi de 390 a 512 N, já com os dispositivos cromados a faixa foi de 392 a 507. A faixa de força desse experimento não teve uma variação efetiva uma vez que este foi pré-fixado, porém este sofre variações devidas diferenças na geometria do material.

Tabela 1: Área da lentilha de solda na micrografia e Situação do teste de Corrosão para CP soldados com eletrodos de cobre sem revestimento

PONTO DE MENOR ENERGIA – ELETRODO SEM REVESTIMENTO				
NÚMERO SEQUENCIAL	CORRENTE [KA]	FORÇA [N]	ÁREA [MM²] MICROGRAFIA	SITUAÇÃO CORROSÃO
5	2,96	523	1,07	
74	2,99	508	1,11	
76	2,95	508	1,04	
77	2,87	509	1,01	
78	2,89	505	1,02	
4	2,71	516		Aprovado
8	3,04	518		Aprovado
Média	2,91	512	1,05	
PONTO DE MAIOR ENERGIA – ELETRODO SEM REVESTIMENTO				
NÚMERO SEQUENCIAL	CORRENTE [KA]	FORÇA [N]	ÁREA [MM²] MICROGRAFIA	SITUAÇÃO CORROSÃO
9	3,71	389	1,56	
10	3,82	383	1,76	
71	3,83	398	1,79	
72	3,88	391	1,82	
73	3,89	390	1,94	
70	3,79	391		Aprovado
95	3,78	386		Aprovado
Média	3,81	390	1,77	

Mas a variação da corrente foi significativa. Nas soldas com os dispositivos sem revestimento a faixa é de 2,92 a 3,81 kA e quando feito com os dispositivos com revestimento de cromo duro a faixa foi de 2,91 a 4,31 kA. Um aumento de 11,6% 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.

Existe também um aumento na área da secção transversal no ponto de maior energia. Quando soldados com dispositivos sem revestimento, a média das áreas é de 1,709 mm² passando para 1,942 mm² quando soldados com dispositivos com revestimento. Isto representa um aumento de 11,9% no volume da lentilha de solda, confirmando o aumento que ocorreu na temperatura da região da solda.

Tabela 2: Área da lentilha de solda na micrografia e Situação do teste de Corrosão para CP soldados com eletrodos de cobre com revestimento de cromo

PONTO DE MENOR ENERGIA – ELETRODO COM CAMADA DE CROMO				
NÚMERO SEQUENCIAL	CORRENTE [KA]	FORÇA [N]	ÁREA [MM²] MICROGRAFIA	SITUAÇÃO CORROSÃO
26	2,88	505	1,22	
27	2,85	502	1,18	
28	2,88	505	1,22	
29	2,88	509	1,17	
30	2,99	509	1,12	
31	2,94	509		Aprovado
32	2,95	512		Aprovado
Média	2,91	507	1,18	
PONTO DE MAIOR ENERGIA– ELETRODO COM CAMADA DE CROMO				
NÚMERO SEQUENCIAL	CORRENTE [KA]	FORÇA [N]	ÁREA [MM²] MICROGRAFIA	SITUAÇÃO CORROSÃO
36	4,42	388	2,40	
37	4,55	385	2,03	
38	4,38	394	1,95	
39	4,34	394	2,03	
40	4,10	401	2,00	
41	4,14	392		Aprovado
42	4,26	391		Aprovado
Média	4,31	392	2,08	

3 CONCLUSÃO

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

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 um revestimento de cromo. Isso comprova que a inclusão de uma camada de cromo nos dispositivos de solda trará vantagem como o aumento da faixa de parâmetros e uma influência menor na corrosão em relação aos dispositivos sem revestimentos.

Trabalhos futuros poderão comparar a vida útil dos eletrodos sem revestimento e com revestimento de cromo duro, pois os eletrodos sem revestimento para solda 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 pode trazer impactos também a vida útil do mesmo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a INB e a PPGEM pelo incentivo concedido

REFERÊNCIAS

- [1] Agashe S, Zhang H. Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, Jul. 2003, p. 179 S – 183S.
- [2] Holliday R, Parker JD e Williams NT. “Electrode deformation when spot welding coated steels.” *Welding in the World*.1995; Vol. 15, Nº 3, pp. 160-164.
- [3] Rivet RM. “Simple monitoring devices for resistance welding.” *The Welding Institute Research Bulletin*, March,1984; pp. 74 – 78.
- [4] Tan W, Zhou Y e Kerr HW, Lawson S. “A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets”. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, pp. 1998–2008.
- [5] Chang HS e Cho HS. “A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, August 1990, Vol. 69, Nº 8, pp. 308-s – 317-s.
- [6] Pamanes MFD. Evaluación del Deterioro de los Electrodo 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 & Inspeção*. 2016;21(4):469-482
- [7] Branco HLO. Análise do desgaste de capas de eletrodos de solda ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas. *Soldag. Insp.* São Paulo, Vol. 17, Nº. 4, p.347-355, Out/Dez 2012.