



COMPARAÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS ELETRODOS DE Cu/Zr E Cu/Al₂O₃ EM DISPERSÃO PARA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA ¹

Leiner Novaes Arêdes ²
Jefferson Fabrício Cardoso Lins ³

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a vida útil de dois eletrodos distintos, Cu/Zr e Cu/Al₂O₃ em dispersão, em operações de soldagem a ponto por resistência elétrica de uma peça de aço revestido com zinco. Estas peças foram analisadas via metalografia convencional de forma a se analisar a camada de liga formada nas pontas de cada eletrodo a fim de avaliar o mecanismo de desgaste durante o processo de soldagem. Por permitir trabalho com correntes mais baixas e conseqüentemente menor aquecimento, o eletrodo de Cu com Al₂O₃ em dispersão possui uma vida útil quatro vezes maior e também apresentou um ciclo de soldagem inferior em relação ao Cu/Zr. Logo o eletrodo de CuAl₂O₃ apresenta vantagens em substituição ao eletrodo de Cu/Zr.

Palavras-chave: Solda; Automobilística; Resistência elétrica; Eletrodo.

COMPARISON OF THE LIFE OF ELECTRODES COPPER / ZIRCONIUM AND COPPER ALUMINA DISPERSION USED IN SPOT WELDING

Abstract

This study aimed to evaluate the shelf life of two different electrodes, Cu/Zr and Cu/Al₂O₃ in dispersion in electrical resistance spot welding operations of steel pieces coated with zinc. These samples were analyzed by conventional metallography in order to analyze the alloy layer formed on the tips of each electrode in order to evaluate the wasting mechanism during the welding process. By allowing working with lower currents and thus lower heating, the Cu electrode with dispersed Al₂O₃ presents a useful life four times and also a welding cycle lower than in the Cu/Zr. So, the Cu Al₂O₃ electrode replaces advantageously the Cu/Zr electrode.

Key words: Weld; Automotive; Electrical resistance; Electrode.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Discente de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense. leiner.aredes@csn.com.br

³ Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal Fluminense. jfclins@metal.eeimvr.uff.br.



1 INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto por resistência elétrica é um processo largamente utilizado na indústria automobilística e os seus eletrodos são considerados não-consumíveis por não transferirem massa durante o processo de fabricação. Do ponto de vista econômico, o grande impacto no processo de soldagem é quanto à vida útil do eletrodo. A atual tendência de emprego de aços revestidos para satisfazer as exigências de resistência à corrosão implica em interações entre a matéria-prima e os eletrodos.

A soldagem por resistência é um processo bastante difundido de união de metais.^(1,2) Neste processo, deve-se pressionar o eletrodo contra as peças, geralmente chapas metálicas, a serem unidas para a formação de um circuito elétrico em que seja permitida a passagem de corrente elétrica durante um tempo especificado. O calor gerado cria um estado plástico e promove a fusão entre as superfícies das chapas em contato.⁽¹⁾

A soldagem por resistência baseia-se na relação entre a tensão, corrente e resistência em circuito elétrico.⁽³⁾ O controle do processo se regula pela corrente (I) e o tempo (T), em que também existe associada uma variável, R, referente ao ajuste da máquina.⁽¹⁾ Os principais parâmetros de soldagem no ciclo de soldagem são: corrente de soldagem, força de eletrodo e tempo de soldagem.^(1,3)

O ciclo de soldagem consiste basicamente de quatro fases: i) tempo de compressão em dois estágios (contato das chapas e aplicação final de força); ii) tempo de soldagem no qual a corrente de soldagem é aplicada ao material para soldagem em pulso único; iii) tempo de espera em que a força é mantida no material após o pulso de corrente cessar. Durante este intervalo, a lente de solda se solidifica e é resfriada até que se tenha resistência adequada; iv) Tempo de pausa em que os eletrodos são separados do material.

Durante a formação de uma solda numa chapa revestida, o zinco na interface sobreposta se funde e é radialmente deslocado da zona de solda para formar uma auréola que circunda a solda.^(4,5) Esta auréola consome parte da corrente elétrica ao redor da zona de solda, limitando a densidade de corrente disponível para a formação de lente.⁽⁶⁾

Os eletrodos apresentam três funções fundamentais: conduzir a corrente de soldagem até as chapas, transmitir a força necessária às chapas na área de solda para produzir uma lente de solda satisfatória e dissipar rapidamente o calor da zona de solda.^(6,7) Durante a operação de soldagem, os eletrodos sofrem grandes tensões compressivas a elevadas temperaturas, fazendo com que sua ponta se deforme plasticamente de forma progressiva, necessitando de restauração ou substituição à medida que soldas satisfatórias não sejam mais obtidas.

O eletrodo de Cu-Al₂O₃ é formado por uma liga obtida por consolidação de um pó oriundo de uma oxidação seletiva. O tamanho médio das partículas de Al₂O₃ é de cerca de 3 nm a 12 nm com espaçamento da ordem de 30 nm a 100 nm. A Al₂O₃ em dispersão ancora os contornos de grão do cobre a fim de se limitar o crescimento de grão. Já que o composto Al₂O₃ é bastante estável até 2.300°C e não reage com a matriz de cobre, o eletrodo que possui uma fina dispersão não perde significativamente suas propriedades durante a soldagem.⁽⁸⁾

Os mecanismos atuantes no desgaste do eletrodo podem ser resumidos como: deformação, formação de liga e erosão.⁽⁹⁾ A diminuição da vida útil do eletrodo refere-se a uma série de processos que se iniciam com a formação de ligas na ponta do eletrodo e incluem seu crescimento e ruptura, formando crateras na face de contato com aumento do seu diâmetro e decréscimo da densidade de

corrente. Durante a soldagem ocorre interdifusão entre os elementos contidos no revestimento e no eletrodo à base de Cu.^(4,5) Acredita-se que na superfície do eletrodo utilizado na soldagem de aço com revestimento de Zn formam-se camadas de Cu-Zn, devido à difusão de Zn do revestimento para a superfície do eletrodo.

O presente trabalho teve por objetivo realizar a caracterização microestrutural dos eletrodos de Cu/Zr e Cu/Al₂O₃ em dispersão em vários estágios de sua vida útil durante a soldagem robotizada de uma peça lateral de um veículo de passeio comercial de aço revestido com Zn com o auxílio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS – *energy dispersive spectroscopy*).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dois eletrodos distintos a base de Cu, da classe 01 da Nippert de formato dome com diâmetro da ponta de 5 mm para a realização de um processo de soldagem robotizada numa peça lateral de um veículo de passeio comercial de aço revestido com Zn (Figura 1).



Figura 1 – Foto da peça utilizada nos experimentos.

As Tabelas 1 e 2 mostram a composição química nominal dos eletrodos e da chapa de aço que foram utilizados nesta investigação, respectivamente.

Tabela 1 – Composição química dos eletrodos Cu/Zr e Cu/Al₂O₃ em dispersão (teores expressos em % em peso)

Eletrodo	Cu	Zr	Fe	Ni	Al	Si	Cr	O
Cu / Zr	99,64	0,19	0,02	0,01	0,002	0,01	0,01	0,003
Cu / Al₂O₃	98,79	0,02	0,01	0,02	0,584	0,01	0,01	0,601

Tabela 2 - Composição química percentual do aço para fabricação da lateral (teores expressos em peso)

C	Mn	P	S	Si	Al	N	Nb	Ti	Ni	Cr
0,002	0,11	0,011	0,008	0,07	0,026	0,002	0,029	0,036	0,006	0,012
						5	0	0		0

A avaliação da vida útil dos eletrodos a base de Cu foi conduzida via a soldagem em pinça robotizada na peça de aço mostrada na Figura 1 com um



intervalo, em números de pontos, no qual foi feita uma dressagem ou fresagem automática do eletrodo (Tabela 3). Para cada tipo de eletrodo foi utilizada uma combinação de força de compressão e um tempo de solda. Neste trabalho, utilizaram-se três valores de força: 200 Kgf, 250 Kgf e 300 Kgf e quatro tempos de solda: 8 ciclos, 10 ciclos, 12 ciclos e 16 ciclos. Os valores mínimos e máximos de corrente elétrica foram determinados empiricamente por meio de aproximações sucessivas. A Tabela 3 sumariza os parâmetros utilizados para cada eletrodo.

Tabela 3 – Parâmetros para a realização dos pontos sucessivos de solda

Parâmetros	Eletrodo Cu-Zr	Eletrodo Cu-Al ₂ O ₃
Tempo de 1ª compressão	5 ciclos (0,08 s)	
Tempo de 2ª compressão		
Corrente de solda	9,2 kA	8,0 kA
Tempo de solda	18 ciclos (0,3 s)	15 ciclos (0,25 s)
Tempo de resfriamento	10 ciclos (0,17 s)	5 ciclos (0,08 s)
Impulsos	2	1
Tempo total de ciclo	76 ciclos (1,27 s)	35 ciclos (0,53 s)
Número de pontos para dressagem	262	400
Incremento linear de corrente	8%	15%
Número de dressagens	3	10
Pontos por par de eletrodo (vida útil)	1050	4400

Foi adotado como critério de final de vida aparente dos eletrodos, a ocorrência de um diâmetro de lente de solda de cerca de $2\sqrt{t}$, em que t refere-se a espessura da chapa. O final de vida do par de eletrodos foi caracterizado após três dressagens para o eletrodo Cu/Zr e de dez dressagens para o eletrodo Cu/Al₂O₃ em dispersão.

Foram caracterizados eletrodos com aproximadamente 25, 50, 75 e 100% da média dos pontos de solda realizados inicialmente, ou seja, os eletrodos de Cu/Zr foram utilizados até imediatamente antes da 1ª, 2ª, e 3ª dressagem. Já os eletrodos de Cu-Al₂O₃ em dispersão foram utilizados até imediatamente antes da 3ª, 6ª e 8ª dressagem.

As camadas de liga formadas na ponta do eletrodo e a ponta do consumível novo foram caracterizadas por meio de microscópio eletrônico de varredura EVO MA10 da Carl Zeiss com filamento de LaB₆ acoplado a um sistema integrado de espectroscopia por energia dispersiva (da língua inglesa, *Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS), modelo Pegasus MX4i da EDAX para a realização de análise semiquantitativa dos elementos químicos presentes. Foi feita uma medição da profundidade do eletrodo atingida pela liga formada na ponta. Esta espessura foi confirmada pela mudança de patamares de concentração em massa dos elementos químicos por meio de varreduras em linha (*linescan*). Para cada *linescan* foi utilizada uma média de composição química de 165 pontos. Foram medidas 09 *linescans* equidistantes de 10 µm na ponta dos eletrodos, numa extensão de 50 µm de comprimento. Foram também medidos mapas elementais a fim de se determinar a delimitação da camada de liga frágil formada após os processos de soldagem avaliados.

Com o objetivo de confirmar a diferença de fragilidade e de dureza entre o material e a camada de liga formada na ponta do eletrodo e o material original do



eletrodo foram feitas medições de dureza Vickers nas duas regiões dos eletrodos com maior camada de liga formada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os eletrodos de Cu/Zr utilizados para caracterização podem ser vistos na Figura 2.



Figura 2 - Macrografia dos eletrodos de Cu/Zr caracterizados.

Embora o eletrodo de Cu/Zr tenha maior condutibilidade térmica a temperatura ambiente,⁽¹⁾ a maior estabilidade de condutibilidade do eletrodo de Cu-Al₂O₃ em temperaturas elevadas faz com que seu desempenho seja o melhor. A altas temperaturas, o Al₂O₃ em dispersão se mantém estável e o oxigênio livre combina-se com o cobre para formar uma segunda fase que reduz a condutibilidade elétrica, principalmente, por diminuir o volume de Cu para conduzir corrente.⁽¹⁰⁾ A maior condutibilidade térmica a temperatura de trabalho favorece uma maior dissipação de calor, promovendo desta forma, um menor aquecimento da interface eletrodo/chapa, já que a resistência à passagem da corrente elétrica é menor, reduzindo a velocidade de formação da liga Cu-Zn.

Observa-se macrograficamente a formação de uma superfície crescente não plana, mas ligeiramente convexa ao longo da vida do eletrodo, o que já era esperado de acordo com a literatura,⁽¹¹⁾ pois a camada de liga formada muitas vezes se adere a chapa e não ao eletrodo, gerando crateras na superfície do mesmo. A ampliação crescente do diâmetro da ponta do eletrodo também é observada, juntamente com a alteração contínua da coloração das regiões mais próximas ao centro, o que sugere a formação de uma camada de liga frágil na ponta do eletrodo maior em extensão de área.

A Figura 3 mostra micrografias da seção transversal dos eletrodos Cu/Zr, utilizados na soldagem de aço com revestimento de Zn, com 25%, 50%, 75% e 100% da vida útil, ou seja, 262 pontos, 524 pontos, 786 pontos e 1050 pontos de soldas, respectivamente. Considerando que estes eletrodos sofreram três dressagens, as caracterizações foram feitas antes de cada dressagem e após cumprida a vida útil do eletrodo.

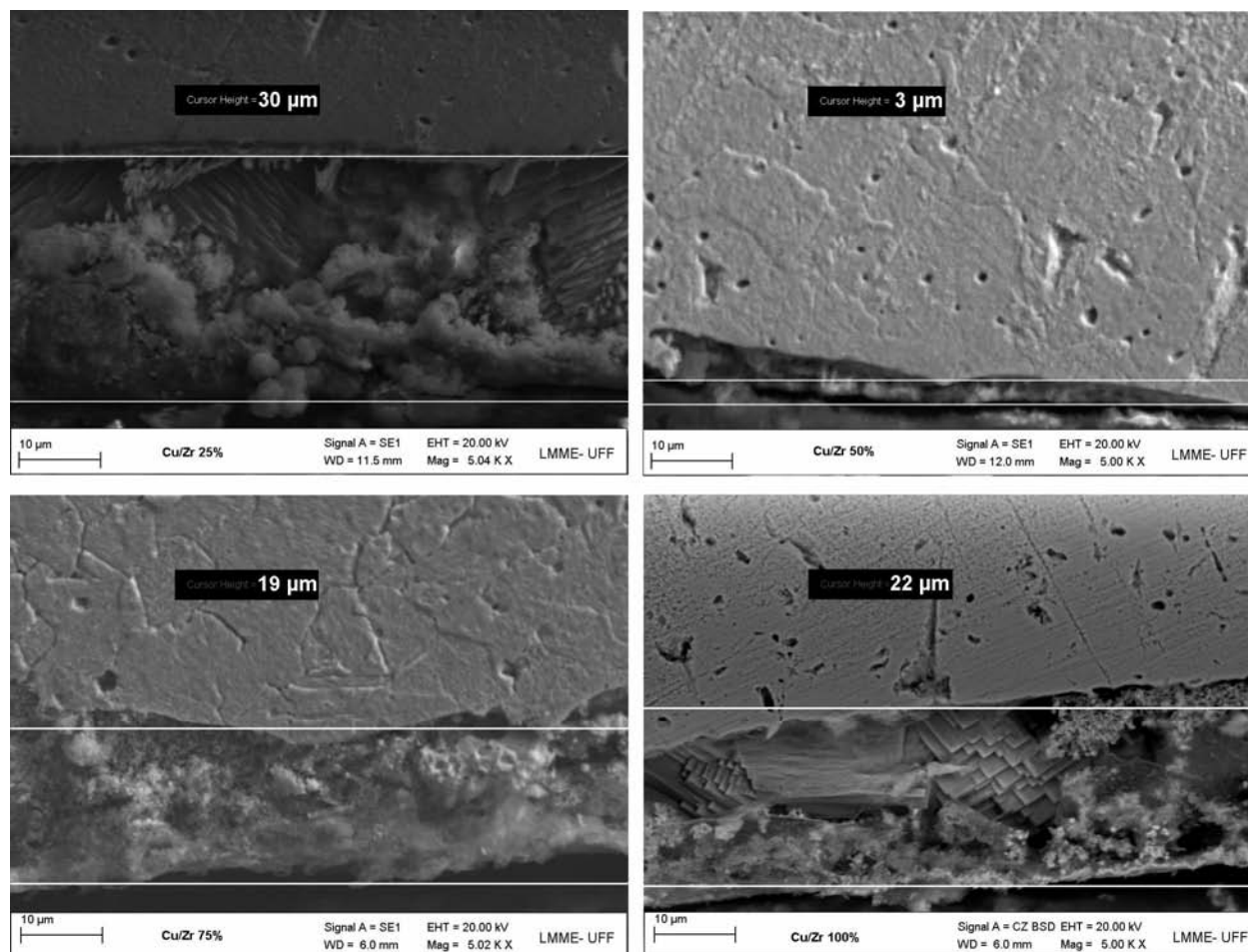


Figura 3 - Micrografia da seção longitudinal do eletrodo Cu/Zr mediante à aplicação de elétrons secundários, com 25%; 50%; 75%; e 100% da vida útil.

Percebe-se a formação nítida de uma espessa camada de liga frágil na ponta do eletrodo, com aproximadamente 30 μm, 3 μm, 19 μm, 22 μm. Há uma interface homogênea, linear e bem definida entre a liga de Cu/Zr que compõe o eletrodo inicial e a liga frágil que se forma ao longo dos pontos de solda executados na ponta do eletrodo. Nota-se ainda que a liga na ponta do eletrodo possui uma microestrutura complexa e não-homogênea. Mais de uma camada de diferentes microestruturas são formadas, sem interface ou espessura nitidamente definidas. A interface da amostra com a baquelite também é aproximadamente plana, o que indica que o desgaste gerado pela liga formada na ponta do eletrodo deve ser aproximadamente uniforme.

A Figura 4 mostra a evolução da composição química do eletrodo de Cu/Zr ao longo da vida útil atingida em relação à profundidade a partir da ponta, obtida pela varredura em linha do EDS, mostrando a variação da composição química do eletrodo ao longo de sua profundidade.

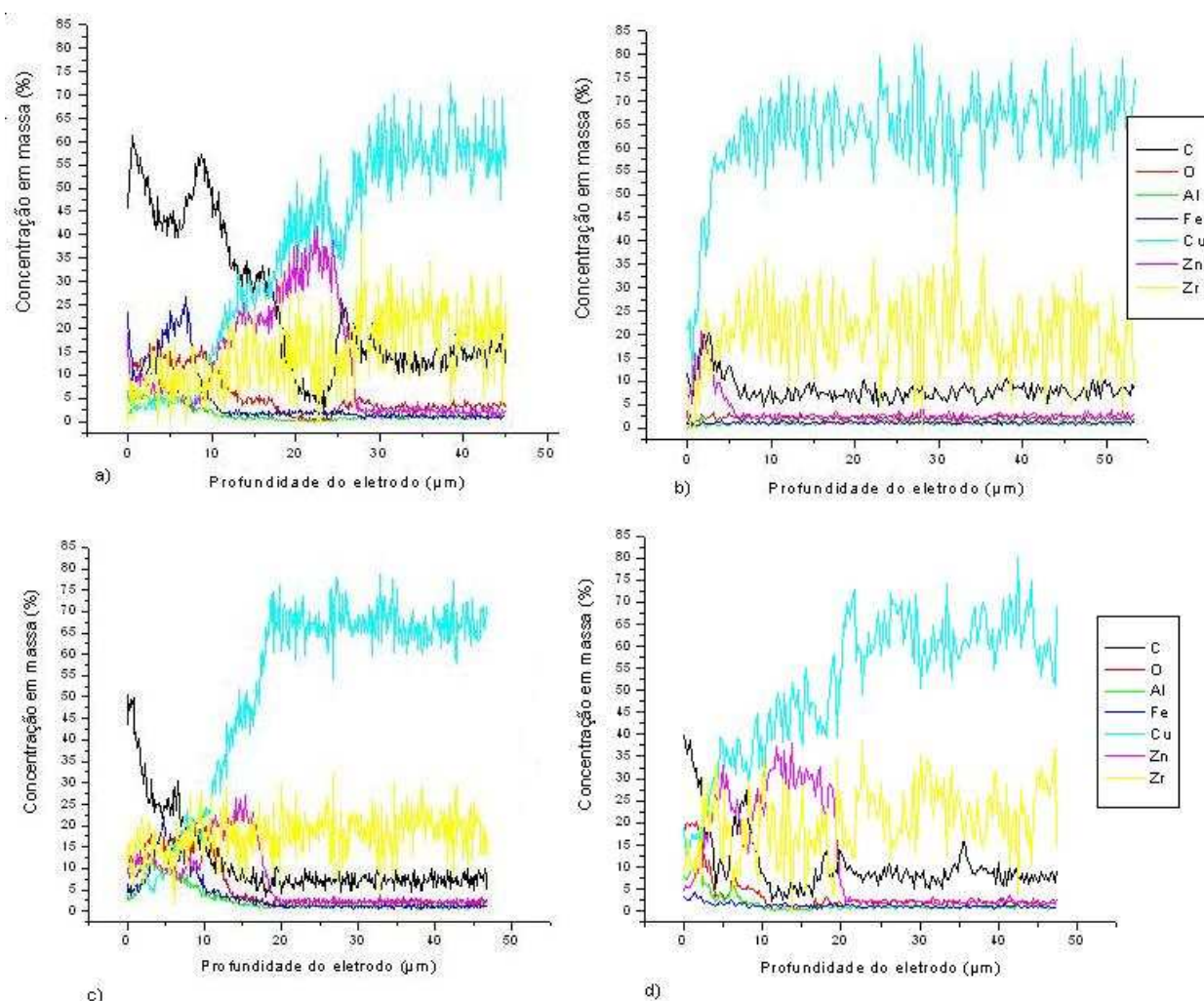


Figura 4 – Composição química por varredura em linha por EDS no eletrodo Cu/Zr com 25% (a); 50% (b); 75% (c); 100% (d) da vida útil.

Na Figura 4-a), pode-se confirmar uma mudança brusca na composição química a aproximadamente 30 μm de profundidade, que identifica a espessura da camada de liga frágil formada na ponta do eletrodo. O mesmo ocorre nas Figuras 4-b) a 3 μm ; 4-c) a 19 μm ; e 4-d) a 22 μm de profundidade. A variação da composição química começa a ocorrer na ponta do eletrodo e fica aproximadamente estável a partir de aproximadamente na mesma região da interface verificada e medida na micrografia da Figura 3. A concentração C, Zn, Cu, Zr se estabiliza apenas a partir de 30 μm (a), 3 μm (b), 19 μm (c), 22 μm (d). Valores residuais de oxigênio também foram encontrados nas regiões mais profundas do eletrodo, contudo, devemos lembrar que esta informação tem caráter apenas qualitativo em função da técnica de microanálise utilizada. Dessa forma, sugere que houve um aumento da temperatura na superfície do eletrodo, o que acelera a erosão do mesmo.

O Zn presente no revestimento da peça soldada pode formar camadas de liga com o Cu do eletrodo,⁽¹¹⁾ promovendo um aumento de sua resistividade elétrica. Isto faz com que ocorra um aquecimento local, elevando ainda mais a temperatura e acelerando o processo de formação de liga Cu-Zn no eletrodo.⁽¹¹⁾ Além disso, também ocorre um decréscimo na densidade de corrente promovendo, desta forma, uma diminuição do diâmetro da lente e prejuízo para as propriedades da solda.

Observa-se, ainda, a presença de Fe em regiões consideravelmente profundas de praticamente todas as amostras analisadas, exceto na amostra com



50% de vida útil, a qual como já foi dito anteriormente, sugere a ocorrência de desprendimento da liga frágil formada na superfície do eletrodo durante os sucessivos pontos de solda. Há um processo cíclico de formação, crescimento e desprendimento da camada de liga frágil localizada sobre a superfície do eletrodo⁽¹²⁾. A presença de Fe se deve à sua difusão do revestimento do aço para o eletrodo de Cu. Comprova-se como sugerido por Mansur,⁽¹²⁾ que ocorreu a formação de uma camada de uma liga completamente diferente do material do eletrodo sobre a superfície do mesmo. Essa liga é formada por Fe, Zn e muito pouco Cu e é a responsável pelo desprendimento de massa do eletrodo.⁽¹²⁾

Como foi observada uma camada de liga frágil de cerca de 3 μm de profundidade na amostra em que se sugere desprendimento, não é possível afirmar se este desprendimento expôs novamente a superfície do contato do eletrodo ou se o desprendimento foi parcial.

Pode-se verificar que os teores de Zn e de Al variam de amostra para amostra e aumentam quando se observa os eletrodos de Cu/Zr nas regiões mais profundas, chegando a um ponto onde voltam a diminuir.

O desprendimento pode ocorrer pelo esboroamento causado pelas trincas dos ciclos térmicos, bem como pela variação do parâmetro de rede da matriz de Cu por elementos substitucionais,⁽¹¹⁾ tais como o Fe, o Zn e o Al. Além disso, a presença de fases de baixo ponto de fusão pode contribuir para a formação de trincas, sendo estas chamadas de trincas de liquação.

Os eletrodos de Cu-Al₂O₃ caracterizados são vistos na Figura 5.



Figura 5 - Macrografia dos eletrodos de Cu/Al₂O₃ em dispersão caracterizados.

Observa-se macrograficamente a formação de uma superfície crescente ligeiramente convexa ao longo da vida do eletrodo, o que já era esperado de acordo com a literatura,⁽¹¹⁾ pois a camada de liga formada muitas vezes se adere a chapa e não ao eletrodo, gerando crateras na superfície do mesmo. A ampliação crescente do diâmetro da ponta do eletrodo também é observada, juntamente com a alteração contínua da coloração das regiões mais próximas ao centro, o que sugere a formação de uma camada de liga frágil na ponta do eletrodo maior em extensão de área.

A Figura 6 mostra a micrografia da seção longitudinal dos eletrodos Cu-Al₂O₃ utilizados na soldagem de aço com revestimento de Zn, com 25%, 50%, 75% e 100% da vida útil atingida, ou seja, 1.200 pontos, 2.400 pontos, 3.200 pontos e 4.400 pontos de solda.

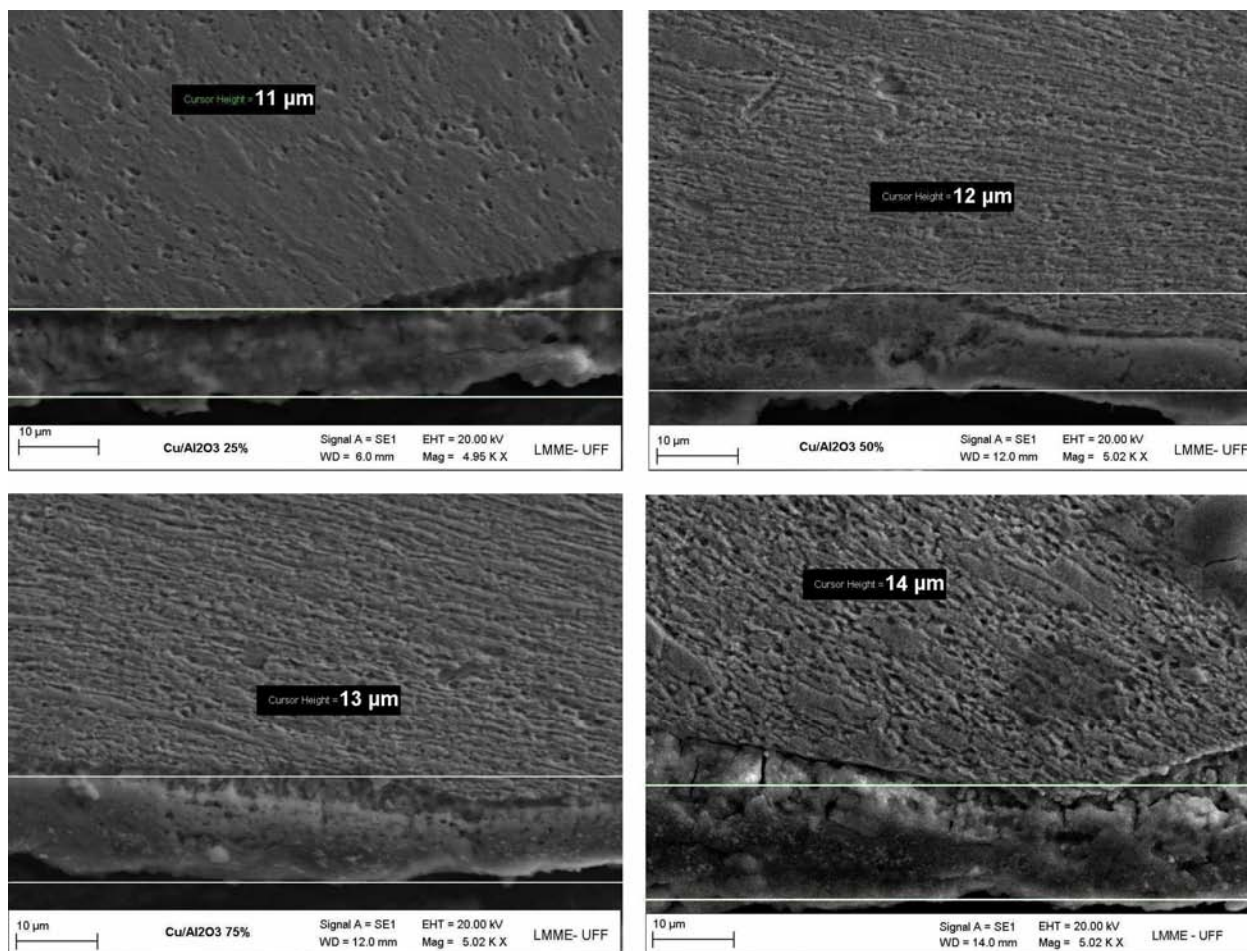


Figura 6 - Micrografia da seção longitudinal do eletrodo Cu-Al₂O₃ com 25%; 50%; 75%; e 100% da vida útil atingida. MEV, imagem no modo de elétrons secundários, 20 KV.

Nas micrografias da Figura 6, pode-se observar a formação nítida de uma camada de liga frágil na ponta do eletrodo, com aproximadamente 11 μm (a), 12 μm (b), 13 μm (c), 14 μm (d) de espessura. Há uma interface homogênea, linear e bem definida entre a liga de Cu-Al₂O₃ que compõe o eletrodo inicial e a liga frágil que se forma ao longo dos pontos de solda executados na ponta do eletrodo. Nota-se ainda que a liga na ponta do eletrodo é homogênea. A interface com a baquelite também é aproximadamente plana, o que indica que o desgaste gerado pela liga formada na ponta do eletrodo deve ser aproximadamente uniforme.

A Figura 7 mostra a evolução da composição química em relação à profundidade a partir da ponta do eletrodo de Cu-Al₂O₃ com 25%, 50%, 75%, e 100% da vida útil atingida, obtida pela varredura em linha do EDS.

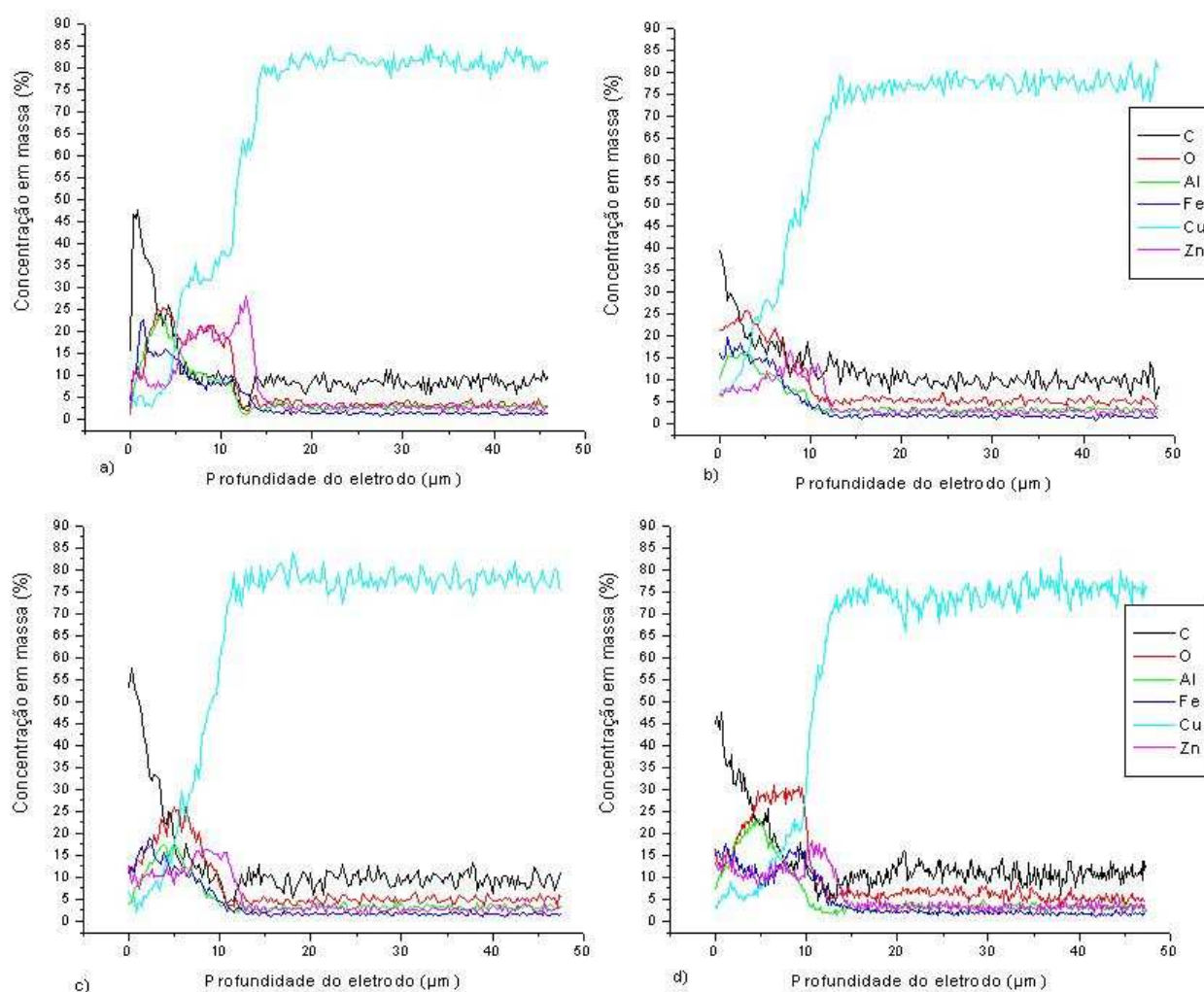


Figura 7 - Composição química por varredura em linha por EDS no eletrodo Cu-Al₂O₃ com 25% (a); 50% (b); 75% (c); 100% (d) da vida útil atingida.

Verificou-se que a mudança brusca na composição química permite que seja identificada na Figura 7 o ponto referente a espessura da camada de liga frágil formada na ponta do eletrodo. A região da interface verificada e medida na micrografia da Figura 7 se encontra a 11 µm, 12 µm, 13 µm, e 14 µm de profundidade, perfeitamente de acordo com a Figura 8.

A espessura da camada de liga frágil formada na ponta do eletrodo era em geral muito menor no eletrodo de Cu-Al₂O₃, o que explica sua maior vida útil, além de a camada a ser removida na dressagem ser muito menor.

Verifica-se a presença de Al em todas as amostras analisadas, porém em níveis mais profundos e em maiores proporções que no eletrodo de Cu/Zr. A presença do Al foi discutida anteriormente, no eletrodo de Cu/Zr, em que todo o Al presente é oriundo do revestimento que está sendo soldado. Porém, neste caso, trata-se de um eletrodo cuja composição química contém Al₂O₃, assim, parte do Al encontrado é oriundo do revestimento e parte é oriunda do próprio eletrodo. Diferente do eletrodo de Cu/Zr não foram verificadas camadas de liga muito menores em nenhuma das amostras, logo não é possível afirmar que para o eletrodo de CuAl₂O₃ há um desprendimento de massa da camada da liga frágil formada na superfície do eletrodo, como previsto na literatura.⁽⁴⁾

Da mesma forma que no eletrodo de Cu/Zr, o Zn do revestimento se evapora ou forma ligas com o Cu do eletrodo, aumentando-se a concentração de Al em relação ao Zn. Contudo, acredita-se que em função da presença de partículas de



Al_2O_3 no eletrodo, é menor a velocidade de formação e os efeitos do filme rico em Al na superfície do revestimento e do óxido⁽⁵⁾ responsável pelo aumento da resistência na interface eletrodo/chapa, justificando assim o aumento da vida útil deste eletrodo quando comparado ao de Cu/Zr.

Considerando-se qualitativamente em relação ao oxigênio medido nos *linescans*, percebe-se em todas as amostras analisadas maiores níveis a maiores profundidades em relação ao eletrodo de Cu/Zr foram detectados. Podemos atribuir a presença de oxigênio em virtude composição química inicial do eletrodo e também de efeitos de contaminação da atmosfera.

A camada de liga frágil empobrecida de Cu formada na superfície do eletrodo foi confirmada em todos os casos nos espectros obtidos. Além da camada de liga frágil demorar mais para se formar, visto que o intervalo entre as dressagens era maior, a camada formada também foi menor. Assim, além de diminuir a frequência e o intervalo entre dressagens, a espessura de dressagem foi menor nos eletrodos de CuAl_2O_3 .

Pode-se verificar que os teores de Al, O e Fe eram elevados na extremidade do eletrodo, mas aumentam ainda mais em função da profundidade do eletrodo, chegando a um ponto onde voltam a diminuir.

A diferença de dureza entre o material e a camada de liga formada na ponta do eletrodo e o material original do eletrodo foi confirmada por medições de dureza Vickers nas duas regiões dos eletrodos com maior camada de liga formada, com 25% de vida útil atingida (Cu/Zr); e com 100% de vida útil atingida (CuAl_2O_3). O eletrodo de CuAl_2O_3 apresenta em média uma dureza de 145HV no núcleo e 350HV na liga formada em sua extremidade, enquanto o eletrodo de Cu/Zr apresenta em média 160HV no núcleo e 215HV na extremidade. Explicando o a diferença de desgaste entre os eletrodos com a maior dureza do núcleo e da liga formada na ponta do eletrodo de CuAl_2O_3 .

O Zn do revestimento reagiu com o Cu do eletrodo, formando uma liga frágil de Cu-Zn que se depositou na extremidade de contato do eletrodo e que formou um processo cíclico de desgaste com o crescimento e desprendimento desta camada pela nucleação e crescimento de trincas.

4 CONCLUSÕES

Os eletrodos de CuAl_2O_3 apresentam vida útil superior a quatro vezes (4,19) a vida útil do eletrodo de Cu/Zr. O tempo de ciclo por ponto do eletrodo de CuAl_2O_3 foi menor que a metade do tempo de ciclo (0,42) do eletrodo de Cu/Zr, logo conclui-se que o eletrodo de CuAl_2O_3 apresenta vantagens em substituição ao eletrodo de Cu/Zr.

O eletrodo de CuAl_2O_3 permitiu trabalho com correntes mais baixas que o eletrodo de Cu/Zr, assim, os eletrodos de Cu/Zr apresentam menor vida útil devido a um aquecimento maior na interface eletrodo/chapa. As análises químicas realizadas através do EDS, bem como as imagens do MEV foram fundamentais para o entendimento do mecanismo de formação da camada de liga frágil e seu desprendimento.

Agradecimentos

Ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica (LMME) da UFF e à FAPERJ (Processo nº. E-26/110.664/2009) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 8th ed. Miami: AWS, 1991. V.2. cap 17: Spot, Seam, and Projection, p. 532-579.
- 2 CARVALHO, J. E. R. **Comportamento à Corrosão de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Zincadas de Alta Resistência**. Rio de Janeiro, 1990. 233p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- 3 BAKER, J. C., MEITZNER, C. F. Resistance welding of galvalume sheet steel. **Welding Journal**, p.21-28, Jun. 1982.
- 4 HOWE, P., KELLEY, S.C. Coating weight effect on the resistance spot weldability of electrogalvanized sheet steels. **Welding Research Supplement**, New Orleans, p. 271-280, Dec.1988.
- 5 HOWE, P., KELLEY, S. C. A comparison of the resistance spot weldability of bare, hot-dipped, galvanized, and electrogalvanized DQSK sheet steels. **SAE Technical Paper Series 880280**, USA, p. 1-15, Mar.1988.
- 6 BAKER, J. C. E MEITZNER, C. F., Resistance welding of galvalume sheet steel, **Welding Journal**, vol. 61, june, pp21 – 28, 1982.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**, 9th ed., Ohio: ASM, 1983, V.6: Welding, Brazing, and Soldering.
- 8 KIMCHI, M., GOULD, J. E. The evaluation of resistance spot welding electrode materials for welding galvanized steels. In: **The Sheet Metal Welding Conference**, 3, 1988, Detroit. Anais... Ohio: The Nippert Company, 1988. Separata.
- 9 SENKARA, J.; ZHANG, H.; HU, S.J. Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding. **Welding Journal**, April 2004, p 123S – 132S.
- 10 NATAL, Y. D. e BARCELOS, E. J. - Otimização dos gráficos de soldabilidade de soldas a ponto por resistência elétrica - Especial referência a soldagem de chapas zincadas - **Revista soldagem e materiais** - Vol 3, nº 3 - Jul/Set 1991. Pág 27-31.
- 11 NÉGRE, J., **Le soudage électrique par resistance**, 4^{ème} edition – Publications de la soudure autogène, 1972, apud MANSUR (2002).
- 12 NAKANO, R. K., **Influência da taxa de deformação na falha de uniões por ponto de solda**. 2005, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.