

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS ELETRODOS COM MATERIAIS DIFERENTES NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA¹

Edson Luiz Nakamura²
Márcio Batista³
Valdir Furlanetto⁴
Sérgio Duarte Brandi⁵

Resumo

Na indústria automotiva, vem sendo utilizadas chapas revestidas de zinco com dupla face de revestimento na construção de carroçarias, podendo chegar até cinco anos de garantia contra a corrosão. A área de manufatura enfrenta grande desafio na soldagem a ponto por resistência em chapas zincadas. Citando uma das peculiaridades, que é de obter características de materiais de eletrodos com maior vida útil. Neste trabalho foi avaliado o desempenho de dois eletrodos com igual geometria e materiais diferentes, Cu-Al₂O₃ e CuZr na soldagem de duas chapas revestidas de zinco nas duas faces, ambas com 0,85mm de espessura. Os eletrodos foram testados em uma máquina tipo estacionária de CA. Foi feito o diagrama de soldabilidade para encontrar os parâmetros de soldagem ótimos, de forma a atender o critério do diâmetro mínimo do ponto de solda, conforme a norma. Os resultados mostraram maior deformação do eletrodo A (Cu-Al₂O₃) se comparado ao eletrodo B (CuZr), no decorrer dos 1.300 pontos executados por eles. Em contra partida, o eletrodo A (Cu-Al₂O₃), teve o melhor desempenho quanto ao número de pontos executados até o limite mínimo do tamanho do ponto de solda conforme norma.

Palavras-chave: Soldagem a ponto; Soldagem por resistência; Deformação do eletrodo; Indústria automotiva.

COMPARISON BETWEEN TWO DIFFERENT MATERIALS ELECTRODE IN THE RESISTANCE SPOT WELDING

Abstract

In the automotive industry, sheet steel blanks with double-sided zinc plating have been utilized in the production of vehicle bodies with up to five years of warranty against corrosion. The manufacturing area is faced with a big challenge in the spot welding of zinc-plated sheet steel as far as it concerns to finding out electrode materials with such characteristics that will allow them to have a longer useful life. In this work, the performance of two electrodes with equal geometry but different materials (Cu- Al₂O₃ and CuZr) has been evaluated in the spot welding of two double-sided, zinc-plated sheet steel blanks, each with a thickness of 0.85mm. The electrodes were tested on a stationary-type CA machine. A weldability diagram was created to identify the parameters that would allow meeting the minimum welding spot diameter criterion as per standard. The results pointed out at a larger deformation of electrode A (Cu- Al₂O₃) as compared to electrode B (CuZr) along the 1,300 spot welds made by each one of them. On the other hand, according to the norm mentioned above, electrode A (Cu- Al₂O₃) had a better performance as to the number of welds executed until the minimum limit of the welding spot range was reached.

Key words: Spot welding; Resistance welding; Electrode deformation; Automotive industry.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Especialista em Engenharia de Soldagem pela USP, Engenheiro, Man Latin América Ltda., Brasil.

³ MSc., Engenheiro, Volkswagen do Brasil SA, SP, Brasil.

⁴ MSc., Diretor, Welding Science, SP, Brasil.

⁵ Prof. Dr., Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, SP, Brasil.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Introdução

A junção de duas peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor, devida à passagem da corrente elétrica, e da aplicação de pressão. Durante o processo, as peças aquecem-se e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas.⁽¹⁾ A geração de calor é devida à resistência do conjunto à passagem de corrente. Neste processo de soldagem, essa resistência é composta de resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça.⁽²⁾ A soldagem a ponto por resistência é o processo mais usado na montagem de estruturas, tais como: eletrodoméstico, automóveis, caminhões, vagões de trem, etc. Para se atingir os melhores resultados em qualquer operação de soldagem a ponto, é necessário utilizar os eletrodos adequados para a aplicação. Cada um dos eletrodos é fabricado usando um número de ligas diferentes ou processo de fabricação diferente, com o objetivo de fornecer a melhor combinação de propriedades elétricas e mecânicas para uma operação de soldagem.⁽³⁾ Durante a operação de soldagem, os eletrodos estão sujeitos a grandes tensões compressivas em elevadas temperaturas, fazendo com que sua face se deforme progressivamente, necessitando de restauração ou substituição à medida que os pontos de solda obtidos não sejam satisfatórios.⁽³⁾ Além dos parâmetros de soldagem influenciar no desgaste do eletrodo, a formação de ligas entre o material do eletrodo e o metal de trabalho aumenta intensamente a velocidade de desgaste da face do eletrodo.⁽⁴⁾ O presente trabalho será voltado para o estudo comparativo de dois eletrodos com materiais diferentes na soldagem a ponto por resistência, na junção de duas chapas revestidas de zinco, ambas com 0,85 mm de espessura, utilizando uma máquina estacionária de CA, com parâmetros de soldagem constantes, força, tempo e corrente, definidos através do diagrama de soldabilidade. As variáveis estudadas para cada tipo de eletrodo foram: o aumento progressivo da área (mm²) na ponta do eletrodo em função do desgaste, a diminuição do diâmetro (mm) do ponto de solda até o limite da falta de fusão, a profundidade das indentações, a fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante a soldagem.

1.2 Resistências Elétricas no Ponto de Solda

As chapas a serem soldadas constituem numa série de resistências, existem na realidade pelo menos cinco resistências conectadas em série que produzem o aquecimento da junta; a mais importante resistência requerida para formação da solda esta localizada na interface das chapas a serem soldadas.⁽⁵⁾ A Figura 1 mostra a localização da cada resistência.

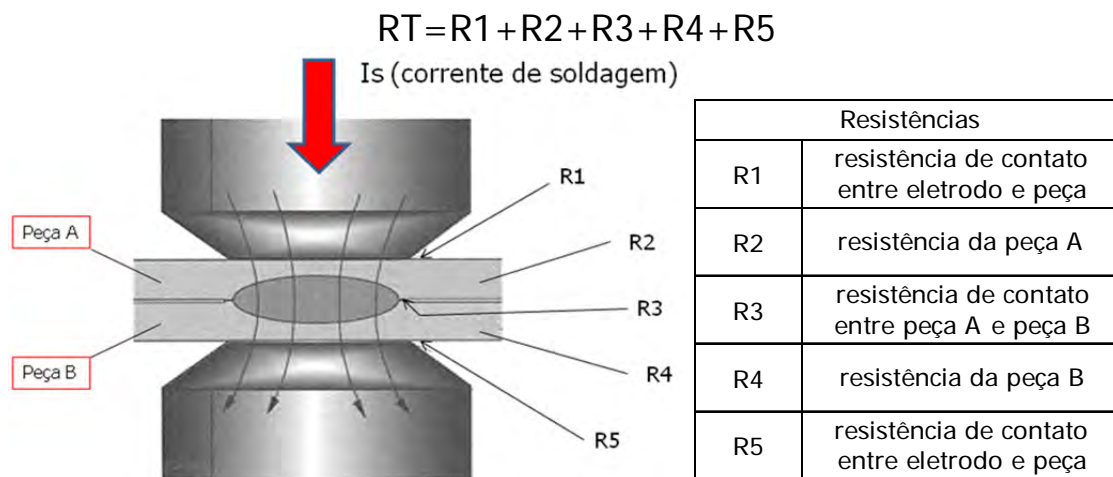


Figura 1. Resistência elétrica entre eletrodos.⁽²⁾

1.3 Geração de Calor

Aquecimento por efeito Joule, esse fenômeno ocorre devido o encontro dos elétrons da corrente elétrica com átomos do condutor. Os elétrons sofrem colisões com átomos do condutor, parte da energia cinética (energia de movimento) do elétron é transferida para o átomo aumentando seu estado de agitação, conseqüentemente sua temperatura,⁽⁶⁾ conforme mostra a Equação 1. Assim, a energia elétrica é transformada em energia térmica.⁽¹⁾ É importante ressaltar que a resistência elétrica muda com o aumento da temperatura, portanto a resistência elétrica é de natureza dinâmica.⁽⁷⁾

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

Onde:

- Q= calor gerado (cal);
- K= 1/ 4,185 (constante);
- R(t)= conjunto de resistência elétrica variando em função do tempo de soldagem (Ω);
- t=Intervalo de tempo de passagem de corrente (s); e
- I= Corrente de soldagem (A).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Característica dos Corpos de Prova Utilizados nos Experimentos

Os eletrodos utilizados nos experimentos são das classes 1 e 20 segundo RWMA:⁽⁸⁾

- Classe 1 - eletrodo em cobre zircônio (CuZr – 0,15% Zr), estampado a frio;
- Classe 20 - eletrodo com cobre resistente (Cu-Al₂O₃ - 1,1% Al₂O₃), estampado e usinado. As pontas dos eletrodos tem um raio esférico de 8 mm x 16 mm de comprimento, a Figura 2 mostra os eletrodos utilizados nos experimentos.

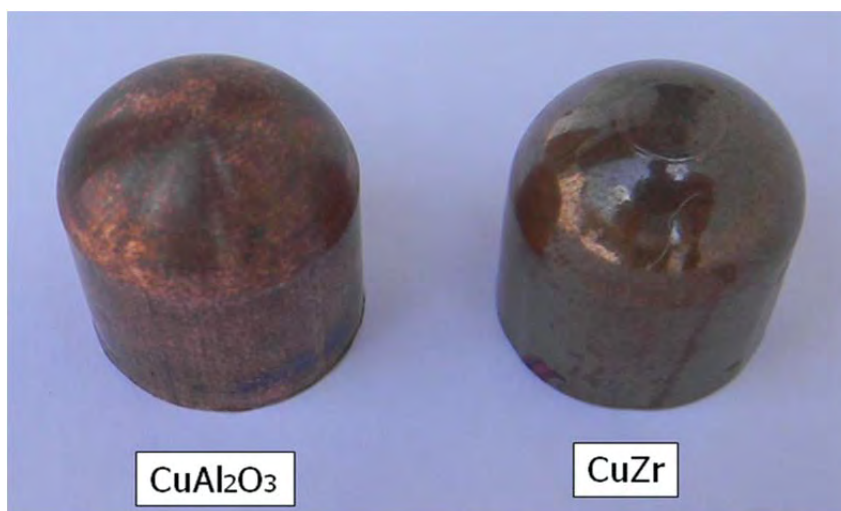


Figura 2. Eletrodos utilizados nos experimentos.

2.2 Chapa de Aço Utilizada nos Experimentos

As chapas de aço utilizada nos experimentos são revestidas de zinco por deposição numa solução aquosa de sal de zinco, sob influência de um campo elétrico numa superfície de aço, devidamente preparada. O material conforme DIN EN 10152 DC04 ZE 75/75 B0,⁽⁸⁾ com espessura de 0,85 mm.

2.3 Determinação do Diâmetro do Ponto de Solda Através do Diagrama de Soldabilidade

Antes de iniciar a soldagem nas chapas de trabalho, foi necessário definir a janela operacional ou área de soldagem através do diagrama de soldabilidade e tempo versus corrente. A área compreende os parâmetros ideais para o processo, que variam conforme a intensidade da corrente e o tempo, já que a força é constante. A janela operacional situa-se entre os limites mínimos, que são pontos não soldados ou pequenos (corrente baixa) e os limites máximos, que são determinados pela expulsão do material da junta soldada (corrente alta). No experimento utilizou-se o seguinte método:

Fixou-se força aplicada na soldagem em 340 kgf e o tempo em 100 ms. Iniciou-se o primeiro teste com uma corrente de 6 KA, aumentando-se gradualmente a corrente em intervalos de 100A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o menor diâmetro do ponto atingível, igual ou acima do valor mínimo especificado no teste de arrancamento de acordo com a norma. Desta forma o limite mínimo da corrente foi pré-fixada a partir desde ponto e acrescentou-se 200 A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem, conforme apresentado na Figura 3.

Com o limite mínimo estabelecido aumentou-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A até ocorrer a expulsão de material, neste ponto diminui-se 200A e encontrou-se o limite máximo, também mostrado na Figura 3.

Repetiu-se o mesmo procedimento acima para os outros três tempos, 150, 200 e 250 ms.

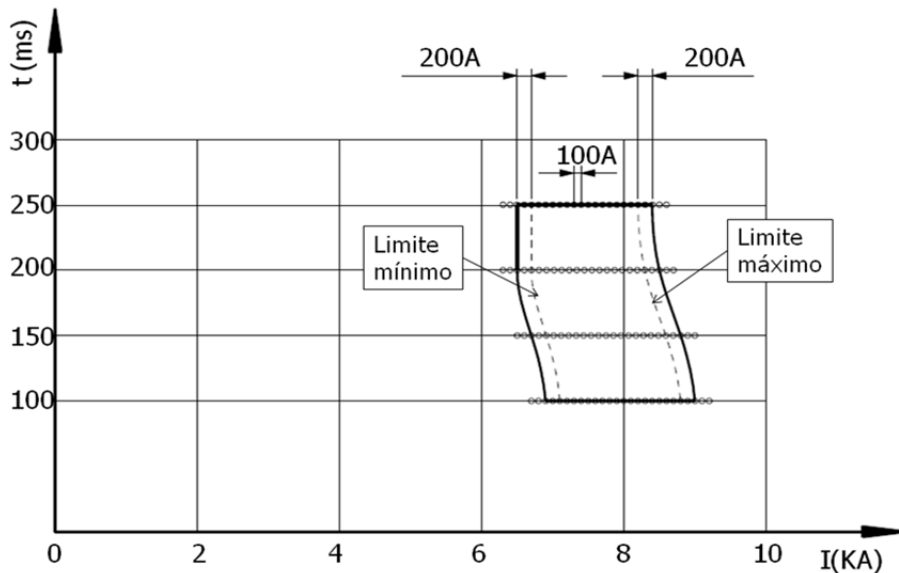


Figura 3. Diagrama de soldabilidade.

2.4 Soldagem das Chapas de Trabalho

Para produzir a sequência de 1.300 pontos de solda, foram utilizadas chapas revestidas com zinco de 200x300mm com 0,85mm de espessura, como mostra na Figura 4. Os espaçamentos entre pontos foram referenciados conforme norma.

$$dLmin \geq 3,5\sqrt{t^1} \quad Vmin = 1,25 \times dLmin \quad e = 5 \times dLmin$$

- dLmin = diâmetro mínimo do ponto de solda
- t¹ = espessura da chapa;
- V min.= distancia mínima entre o centro do ponto de solda e a borda;
- e= distância mínima entre centros dos pontos de solda;
- f = distância mínima entre pontos.

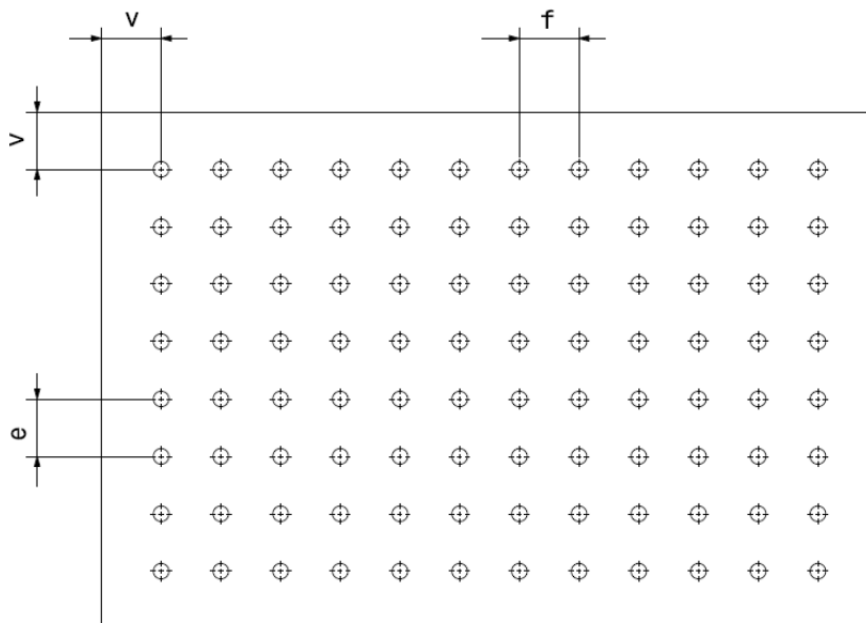


Figura 4. Chapa de trabalho para o experimento.

2.5 Equipamentos de Medição e Calibração

A máquina de solda passou por processo de calibração para atingir o ponto ótimo de soldagem, foram definidas as medições de tempo, corrente e força. Para medição do tempo e corrente de soldagem, foi utilizado o medidor de corrente FASE HCM 4300 HHT, mostrado na Figura 5 e Tabela 1. Para calibração da força foi utilizado o dinamômetro digital com capacidade de carga 1.000 kg.

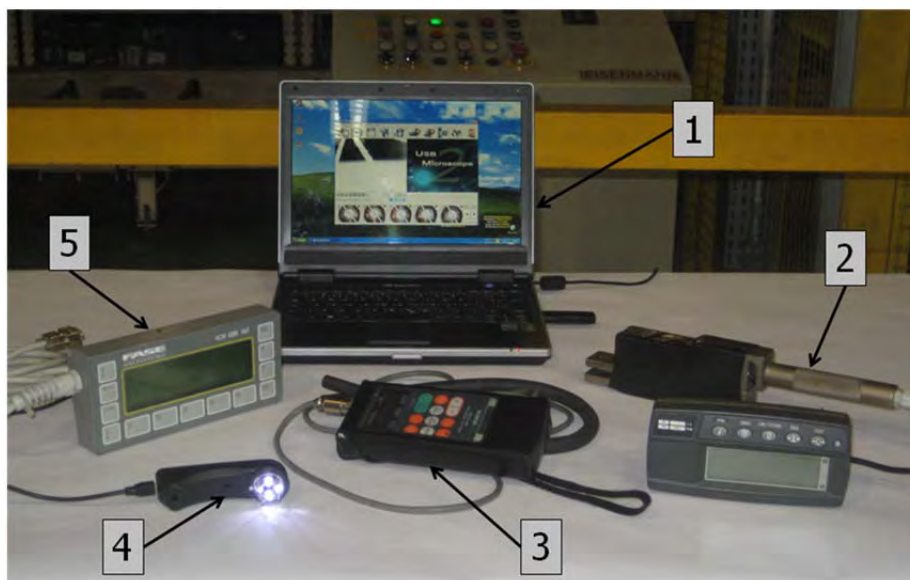


Figura 5. Equipamentos utilizados no experimento.

Tabela 1. Descritivo dos equipamentos utilizados nos testes de avaliação dos eletrodos, relativos à Figura 5

Item	Equipamentos	Descrição
1	Computador	Com programa instalado USB Microscope
2	Dinamômetro digital	Capacidade 1000kg
3	Equipamento de leitura de corrente	WELD TESTER MM-3158 MIYACHI
4	Mini câmera	Adaptada pela Welding Science
5	Calibrador de tempo e corrente	FASE HCM 4300 HHT

2.6 Medição do Desgaste dos Eletrodos

A cada cem pontos de solda eram medidas as áreas das superfícies desgastadas dos eletrodos inferior e superior, através do congelamento de imagem gerada pela mini câmera, adaptada pela Welding Science, ligado a um programa chamado USB Microscope, que se permite fazer eletronicamente um círculo no contorno da área de desgaste do eletrodo, após o congelamento da imagem (Figura 6), obtendo assim o valor da área calculada pelo programa.

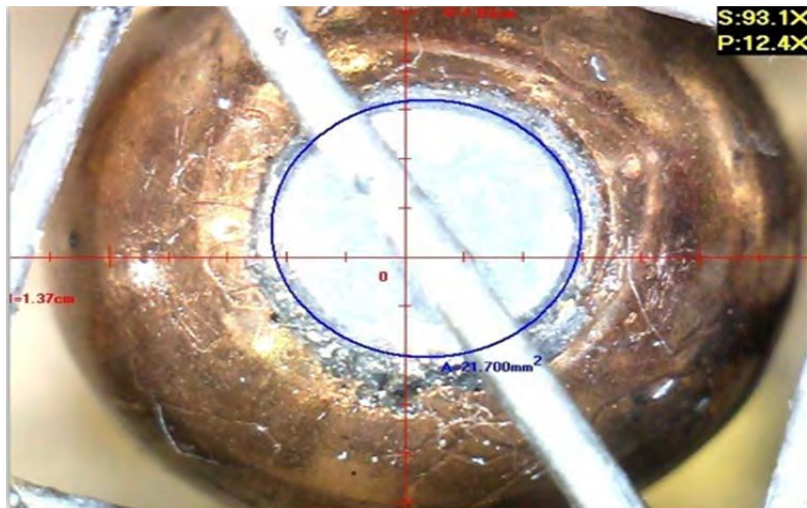


Figura 6. Congelamento da imagem para medir a área do desgaste.

A vantagem deste processo de medição, é que não há necessidade de retirar os eletrodos da máquina, mantendo-os na mesma posição durante os testes, obtendo assim maior garantia nos resultados medidos, além do equipamento ter maior precisão. A Figura 7 mostra o posicionamento manual na mini câmera para captação da imagem.



Figura 7. Posição da mini câmera para captação de imagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Diagrama de Soldabilidade Tempo Versus Corrente

No experimento pode-se notar que o diâmetro do ponto para o limite mínimo e o diâmetro do ponto para o limite máximo se estabilizam em 200 ms, respectivamente, com os valores de 6,5 KA e 8,5 KA. Os parâmetros para o experimento foram localizados a partir do ponto de maior grau de liberdade, no começo da estabilização do diâmetro do ponto, utilizando-se uma força constante de 340 Kgf. Portanto os parâmetros do ponto ótimo foram: corrente 7,5 KA, tempo de soldagem 200 ms (12 ciclos) e força constante de 340 kgf. No diagrama de soldabilidade, mostrado na

Figura 8, estão representados os diâmetros médio dos pontos. A média do diâmetro da cada do ponto foi determinado através de três corpos de prova pelo processo de arrancamento.

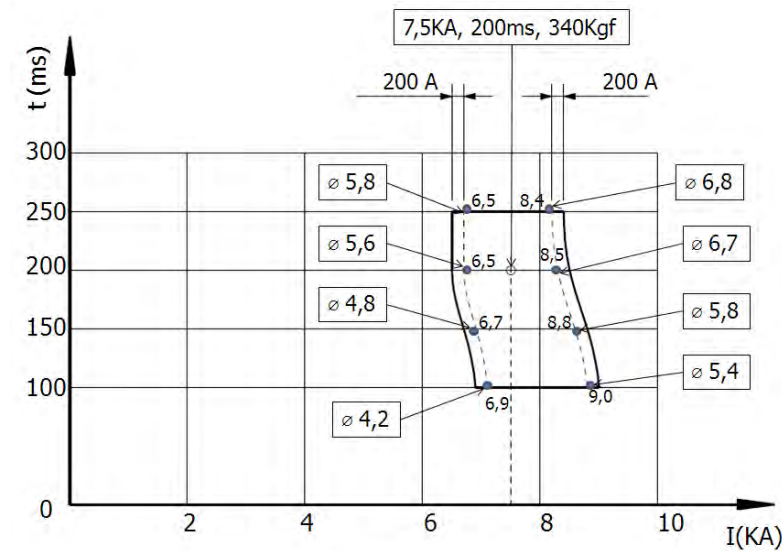


Figura 8. Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente.

3.2 Teste de Desempenho dos Eletrodos Cu-Al₂O₃ e CuZr

A Figura 9 mostra o desempenho dos eletrodos superior e inferior para cada material (A e B). É possível observar que o par do eletrodo A (Cu-Al₂O₃) superior e inferior apresentam maiores médias de deformação 14,7% e 14,3% respectivamente, se comparado ao par do eletrodo B (CuZr) em função do número de pontos executados. Este resultado está relacionado à maior formação de latão devido a maior concentração de Zn na face do eletrodo A (Cu-Al₂O₃) se comparado ao eletrodo B (CuZr).

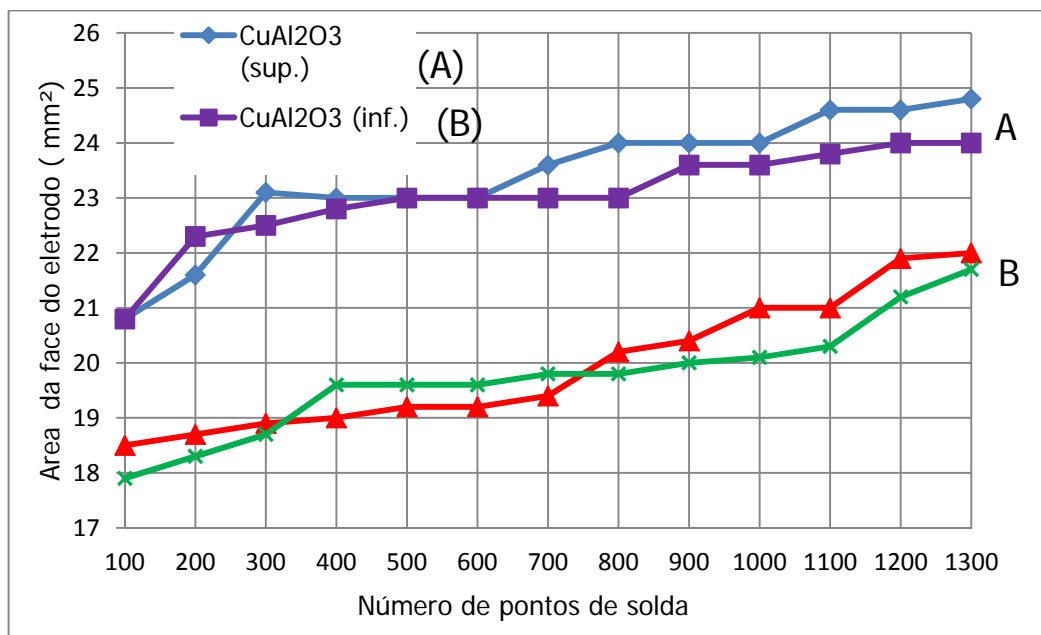


Figura 9. Variações das áreas das faces dos eletrodos superiores e inferiores versus número de pontos de solda.

A Figura 10 mostra o desempenho dos eletrodos A e B com relação à formação do diâmetro mínimo do ponto de solda, conforme a norma. O eletrodo A ($\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$), embora tenha maior deformação na face que o eletrodo B, visto na Figura 9, apresenta maior desempenho na soldagem. O eletrodo A ($\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$) mostra-se capaz de soldar 900 pontos de solda sem ter ainda atingido o diâmetro mínimo do ponto de 3,9 mm, conforme norma para chapas com revestimento.

Note-se também que apesar do eletrodo B (CuZr) ter menor deformação na face, apresenta menor desempenho na soldagem e mostra-se capaz de soldar 600 pontos antes de atingir o diâmetro mínimo, conforme norma.

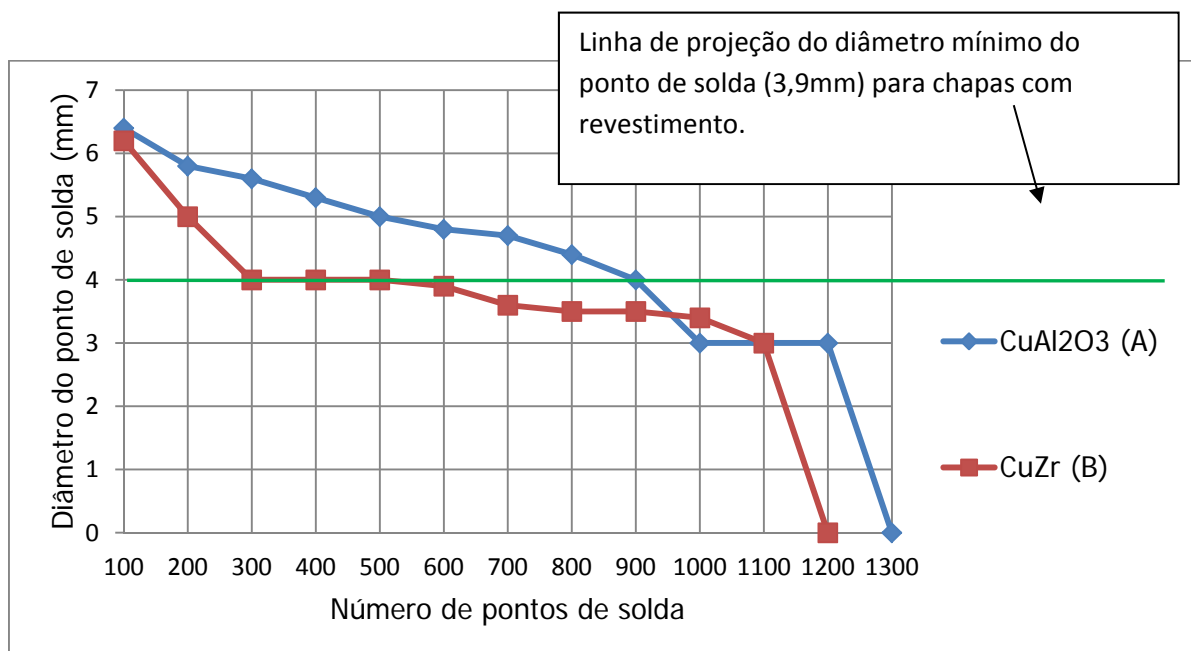


Figura 10. Variação do diâmetro médio do ponto de solda versus número de pontos de solda.

Ainda pela análise da Figura 10, é possível notar também que a diminuição do diâmetro do ponto de solda do eletrodo A ($\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$) apresenta-se numa tendência decrescente aproximadamente constante até 900 pontos de solda. Enquanto que, o eletrodo B (CuZr) apresenta até 300 pontos de solda, uma queda brusca do diâmetro do ponto. Este resultado faz com que o ponto de solda executado pelo eletrodo B (CuZr), com apenas 300 pontos de solda, se aproxime do diâmetro mínimo aprovado, conforme norma.

O fato do eletrodo B (CuZr) apresentar uma queda brusca no diâmetro do ponto de solda nos primeiros 300 pontos está relacionado com a maior indentação apresentada em comparação ao eletrodo A ($\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$) até os 300 pontos de solda, conforme mostra a Figura 11.

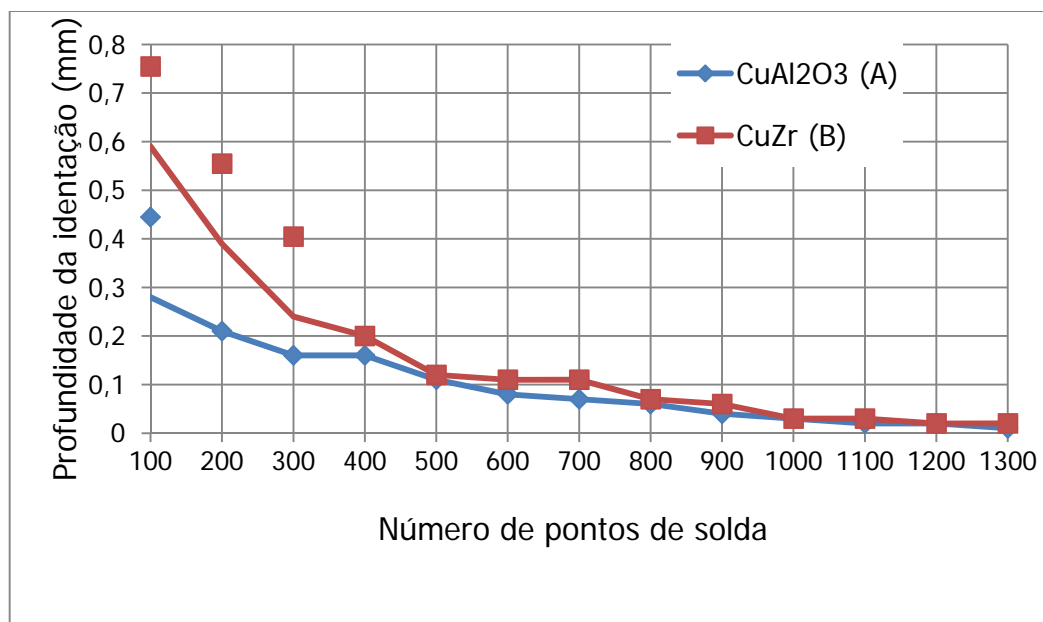


Figura 11. Número de pontos de solda versus profundidade das indentações.

Este resultado é devido ao eletrodo B apresentar menor aderência de Zn e deformação na ponta do eletrodo, ou seja, com menor aderência de Zn ocorrerá menor deformação na ponta do eletrodo se comparado ao eletrodo A e, por consequência, a geração de calor irá apresentar-se maior. Este fenômeno está relacionado com a deformação, que, quanto menor ela for, menor será a área de contato (eletrodo/peça). Assim, uma maior densidade de corrente elétrica e, por sua vez, uma maior geração de calor na face do eletrodo. Por este motivo, a maior indentação do eletrodo B está diretamente relacionada com a maior geração de calor apresentada na área de contato (eletrodo/peça). Este fato é devido a maior geração de calor na interface eletrodo/peça, que produzira uma menor resistência mecânica da chapa nesta região e, por consequência, maior será a indentação do eletrodo na chapa.

3.3 Ensaio de Composição Química e Dureza

A Tabela 2 mostra os resultados da composição química e dureza na face do eletrodo (Cu-Al₂O₃) consumida pelo desgaste após 1300 pontos de solda.

Tabela 2. Dados de composição química e dureza do material do eletrodo (Cu-Al₂O₃) após 1300 pontos de solda

Eletrodo superior (CuAl ₂ O ₃)	
Composição química %	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn >53,4%	Espectrômetro de emissão óptico 4480 0062
Fe 2,41%	
Al 0,108%	
Zr 0,0055%	
Cu 19,46%	
Dureza	Equipamento utilizado
194 HV 10 de 155 a 229	Microdurômetro HMV 4480 0016

A Tabela 3 mostra os resultados da composição química e dureza da face do eletrodo (CuZr) consumida pelo desgaste após 1300 pontos de solda.

Tabela 3. Informativo do material do eletrodo (CuZr) após 1.300 pontos de solda

Eletrodo superior (CuZr)	
Composição química%	
Encontrado	Equipamento utilizado
Zn >11,3%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Fe 0,444%	
Al 0,059%	
Zr 0,0070%	
Cu 86,0%	
Dureza	Equipamento utilizado
94,5 HV 10 de 88,8 a 102	Microdurômetro HMV 4480 0016

Nota-se que o eletrodo A (Cu-Al₂O₃) apresentou maior concentração de Zn e também maior dureza se comparada com o eletrodo B (CuZr) após 1.300 pontos de solda. Este resultado pode estar relacionado à formação de uma liga Cu-Zn na ponta do eletrodo. Esta liga tem um ponto de fusão mais baixo que o cobre, podendo acelerar a deformação do eletrodo.

4 CONCLUSÕES

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

- as faces dos eletrodos A (Cu-Al₂O₃) apresentaram maiores deformações se comparadas com as faces dos eletrodos B (CuZr). Este resultado está relacionado à formação de uma liga Cu-Zn, com maior concentração de Zn, encontrada na face do eletrodo A (Cu-Al₂O₃) se comparado ao eletrodo B (CuZr). Pode-se concluir que quanto maior a concentração de Zn na face do eletrodo maior será a deformação; e
- os eletrodos A (Cu-Al₂O₃) apresentaram melhor desempenho se comparado aos eletrodos B (CuZr), apesar das maiores deformações apresentadas nos experimentos. Este resultado está relacionado com a maior indentação apresentada pelo eletrodo B (CuZr) até 300 pontos de solda. Este fato é mostra que, quanto maior a indentação, maior será área de contato e, por este motivo, haverá uma diminuição da densidade da corrente que, por sua vez, diminui a geração de calor na interface das chapas, reduzindo o diâmetro do ponto de solda.

REFERÊNCIAS

- 1 BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processo e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda,1992.p.217-242.
- 2 ZHANG, H; SENKARA, j. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 2.ed. Taylor & Francis Group, 2012. P.54-70
- 3 BRANCO, H.L.O. (2004) Avaliação de Capas de Eletrodos utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas. Dissertação de Mestrado,

- departamento de Engenharia Mecânica. Setor de Tecnologia e Universidade federal do Parana, Curitiba, Brasil.p.20-104
- 4 KEARNS, W.H. Wending Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes. Miami: American Welding Society; 1984.
 - 5 BATISTA, MÁRCIO. Estudo Comparativo da Soldabilidade da Chapas para Indústria Automotiva Utilizando Dois Equipamentos de Soldagem a Ponto por Resistência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 194p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
 - 6 WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. São Paulo, 2009. 82p.
 - 7 VENCE GUERRA, LEANDRO CARDOSO. O comportamento da resistência dinâmica com relação à deformação do eletrodo na soldagem a ponto por resistência. Escola Politécnica da Universidade da São Paulo, 2012.61p. Especialização em Engenharia da Soldagem.
 - 8 RWMA- Resistance Welder Manufactures Association. Resistance Wending Manual. U.S.A., 4th ED.,Nov.,443p.