

## MONITORAÇÃO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA E AVALIAÇÃO DA SUA RELAÇÃO COM A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO PONTO

**Eduardo O. T. da Fonseca, M. Sc.**

eduardo@demec.ufmg.br

**Alexandre Q. Bracarense, Ph. D.**

queiroz@vesper.demec.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: (031) 499-5245 - Fax.: (031) 443-3783

***Resumo.** Neste trabalho foi usada a técnica de monitoração da resistência dinâmica durante a soldagem por resistência elétrica para depois relacioná-la com a resistência mecânica do ponto de solda. Foi desenvolvido um sistema para monitorar a corrente e a tensão de soldagem e a força aplicada pelos eletrodos. A resistência dinâmica foi obtida da relação entre as duas primeiras variáveis e a força foi usada como variável auxiliar. A resistência mecânica das soldas foi avaliada através do ensaio de tração-cisalhamento. Verificou-se que as soldas de baixa resistência mecânica apresentavam uma queda brusca da resistência dinâmica em seus gráficos. Pode-se concluir que um sistema de controle baseado na resistência dinâmica, tendo a força como variável auxiliar, é capaz de garantir a qualidade da solda.*

***Palavras-chave:** Soldagem por resistência elétrica, Monitoração, Resistência dinâmica, Resistência mecânica*

### 1. INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto por resistência elétrica é um processo de alta velocidade, de fácil operação e possui uma grande adaptabilidade à automação. Pode-se dizer que sua maior área de aplicação é a indústria automobilística, pois a soldagem de muitos de seus componentes, inclusive a carroceria, requer um grande número de pontos de solda.

O ponto de solda é fabricado pela aplicação coordenada da corrente elétrica e da força exercida pelos eletrodos. A força garante a continuidade da corrente e restringe a área de contato da solda. A resistência da peça à passagem da corrente gera o calor necessário à fusão de um pequeno volume de metal. Entretanto, durante a soldagem, a corrente e a resistência variam continuamente enquanto o metal é aquecido e se funde (Dickinson et al., 1980).

A avaliação da solda pode se dar por meios destrutivos ou não destrutivos. Atualmente, porém, tem sido dada uma atenção aos métodos não destrutivos, principalmente aqueles que

podem ser aplicados em tempo real, ou seja, durante a fabricação do ponto. O motivo principal se deve à necessidade de reduzir os custos de fabricação. Através da monitoração do processo pode-se prever sua qualidade e corrigir os desvios pela utilização de um sistema de controle.

Um dos métodos de monitoração é o da resistência dinâmica (Broomhead & Dony, 1990). Ele consiste na medição dos valores instantâneos da resistência elétrica entre os eletrodos. Pode-se calcular a resistência dinâmica dividindo-se os valores de pico instantâneos da tensão e da corrente de soldagem em cada meio ciclo (Savage et al., 1978). A “Figura 1” apresenta uma curva de resistência dinâmica para um aço de baixo carbono e suas respectivas fases.

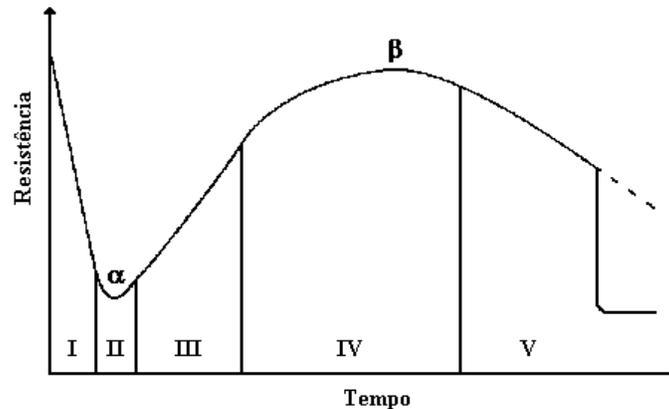


Figura 1- Curva de resistência dinâmica

Quanto à forma desta curva, Bhattacharya & Andrews (1974) relacionaram as seguintes características: A resistência cai subitamente no início da soldagem. Logo após, aparece uma depressão (ponto  $\alpha$ ). Depois, a resistência cresce quase linearmente até alcançar um pico (ponto  $\beta$ ). Após atingi-lo, ela cai gradualmente até o fim do ciclo. A queda final será abrupta no caso de ocorrer expulsão de material fundido da região de soldagem.

Dickinson et al. (1980), com base nos trabalhos de Bhattacharya & Andrews (1974) e Savage et al. (1978), fizeram uma análise mais abrangente da curva e relacionaram os principais fenômenos que ocorrem durante as fases de formação da lente. Estas fases podem ser descritas da seguinte forma:

#### *Fase I - Quebra da superfície*

As peças são colocadas em contato sob a pressão produzida pelos eletrodos. Isto cria áreas de contato elétrico nos pontos onde as asperezas se tocam. A tensão é aplicada entre os eletrodos causando um fluxo de corrente nos pontos de contato. Em condições normais, películas superficiais, camadas de óxido ou outros contaminantes estão presentes. Desde que são essencialmente isolantes, a resistência de contato inicial será muito alta. Portanto, a geração de calor se concentrará nas superfícies, especialmente na de sobreposição, quebrando esses contaminantes e causando uma queda acentuada na resistência dinâmica.

#### *Fase II - Amolecimento das asperezas*

Imediatamente após a quebra dos contaminantes acontecerá o contato metal/metal. Entretanto, a resistência pode permanecer alta devido a área limitada para o fluxo de corrente. O aquecimento é então concentrado na superfície de sobreposição e a temperatura aumenta nesta região e no material. Como o aquecimento progride, as asperezas amolecem, a área de contato aumenta e a resistência diminui. Ao mesmo tempo, um acréscimo na temperatura resulta num aumento da resistividade gerando um efeito oposto na resistência. A competição entre esses dois mecanismos determinará se a resistência vai aumentar ou diminuir e,

portanto, determina a posição do ponto  $\alpha$ . Finalmente, o segundo efeito dominará a curva e a resistência começará a crescer.

#### *Fase III - Aumento da temperatura*

Durante este período, o aumento na resistividade resultante do aumento da temperatura domina a curva. O fim do estágio III corresponderia à fusão local começando a ocorrer nos contatos das asperezas. A transição para o estágio seguinte é próxima do ponto de inflexão da curva.

#### *Fase IV - Primeira fusão*

Três mecanismos influenciam este estágio: A temperatura da peça continua a aumentar, conseqüentemente a resistividade e a resistência aumentam. O calor gerado causa fusão adicional das superfícies, aumentando o tamanho da região fundida e da área transversal disponível ao fluxo de corrente, fazendo com que a resistência diminua. O amolecimento da região causará um colapso mecânico, encurtando o caminho para o fluxo de corrente e diminuindo a resistência. O pico  $\beta$  é a conseqüência da competição entre esses mecanismos. A partir desse ponto, o crescimento da lente e o colapso mecânico começam a dominar e, portanto, a resistência começa a diminuir.

#### *Fase V - Crescimento da lente e colapso mecânico*

Além de  $\beta$  o crescimento da lente fundida e o colapso mecânico continuam a abaixar a resistência. Ocorrerá expulsão se a lente crescer a tal ponto que não possa ser contida pelo metal que a circunda sob a pressão do eletrodo. Neste caso, a curva tem uma queda brusca.

Gedeon e Eagar (1986) propuseram uma curva generalizada de resistência ao estudar vários tipos de aço. Para isso, Gedeon et al. (1987) desenvolveram um aparato denominado *shunt resistivo* que possibilitou a monitoração da corrente de soldagem. Conhecendo-se a resistência do *shunt* e medindo-se a tensão entre seus terminais pode-se obter a corrente de soldagem. Esse *shunt* é construído no porta-eletrodo com o fim de se eliminar qualquer espécie de ruídos que possam mascarar os resultados. Maria et al. (1990) citam que esse é um método direto de se obter tal corrente.

A resistência do *shunt* é determinada fazendo-se passar por ele uma série de correntes conhecidas e medindo-se as respectivas tensões. Uma fonte de corrente contínua é usada para calibrá-lo. A resistência do trecho é calculada pela relação entre essas variáveis.

A tensão de soldagem é obtida através de cliques fixados nos porta-eletrodos. Utilizando-se um sistema de aquisição de alta velocidade é possível coletar simultaneamente os dados da corrente e da tensão de soldagem e calcular a resistência dinâmica.

## **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Para a realização deste trabalho foi usada uma máquina de soldagem estacionária com potência de 10 kVA, 7 taps de potência, corrente alternada e acionamento mecânico a pedal. Foi usado um eletrodo de cobre do tipo truncado, retificado com diâmetro 22,20 mm, ângulo de face 45° e diâmetro de face 6,25 mm conforme guia da AWS (The Professional's Advisor on Resistance Welding, 1998).

Usou-se um aço carbono automobilístico, laminado a frio, com espessura de 0,70 mm, empregado na fabricação de carrocerias de automóveis. A "Tabela 1" fornece a composição química e as propriedades mecânicas desse material.

Tabela 1- Composição química e propriedades mecânicas do aço

Composição química (% em peso)						Propriedades mecânicas			
C	Mn	P	S	Al	N	LE (MPa)	LR (MPa)	Along. (%)	Dureza (HRB)
0,0315	0,19	0,014	0,019	0,039	0,0054	180	294	38	39

Foram soldados 50 pares de chapas com dimensões de 0,70 x 100 x 50 mm. As amostras não sofreram qualquer tipo de tratamento superficial. Foi feito apenas um desengraxamento com acetona e água e secagem com ar quente.

Para se obter dados da força aplicada durante a soldagem, construiu-se um sensor de carga que foi fixado na haste de acionamento da máquina. Um circuito condicionador de sinais foi responsável pela alimentação do sensor e transmissão dos sinais obtidos para o sistema de aquisição.

A tensão de soldagem foi monitorada pelos cliques e a corrente pelo *shunt* resistivo citados anteriormente. Na ausência de uma fonte de corrente contínua foi usado um transformador de corrente alternada na calibração do *shunt*. No entanto, como a frequência da rede era baixa (60 Hz) e a impedância dos aparelhos usados na calibração era elevada, pode-se desprezar quaisquer efeitos indutivos na calibração.

O sistema de aquisição de dados consistiu de um computador com uma placa de aquisição e de um bloco de canais. A taxa de aquisição foi de 2 kHz. Foram usados cabos AWG 2x22 blindados para conectar todos os sensores ao sistema com a finalidade de reduzir a absorção de ruídos.

Para avaliar a resistência mecânica foi usado o teste de tração-cisalhamento nos corpos de prova selecionados, que foram ensaiados numa máquina de tração segundo uma velocidade constante de 10 mm/min. O dado representativo da resistência mecânica nesse teste é a carga máxima de ruptura da amostra.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de se fazer o experimento, foram fixados alguns parâmetros para se ter uma base de comparação entre as amostras. A tensão e a corrente de soldagem foram fixadas usando-se o tap 3 da máquina de soldagem. O tempo de soldagem foi fixado após o experimento, pois ele sofreu variações devido ao fato do acionamento ser mecânico. Foi usado um tempo médio de 37 ciclos.

Foram escolhidas 25 amostras para os testes mecânicos com base no tempo médio de soldagem. Sendo assim, foram tomadas 5 amostras no início, meio e fim do experimento para se ter uma noção da evolução da resistência dinâmica com o número de soldas. Depois foram escolhidas as outras 10. Em algumas dessas amostras foi observado um pequeno faiscamento entre os eletrodos.

A “Figura 2” mostra gráficos resultantes da monitoração da força durante o processo. É indicado também o intervalo correspondente ao tempo de soldagem. Verificou-se que a força se comportou da mesma maneira em todas as amostras. Ela partiu de um valor inicial e cresceu até o início do tempo de soldagem, quando manteve-se praticamente constante. Durante esse tempo, sofreu uma pequena queda em função da expansão térmica do material (Gedeon & Eagar, 1986). Concluído o tempo de soldagem ela atingiu um máximo no ponto onde a máquina se desarma, caindo a zero com o retorno do eletrodo à posição inicial.

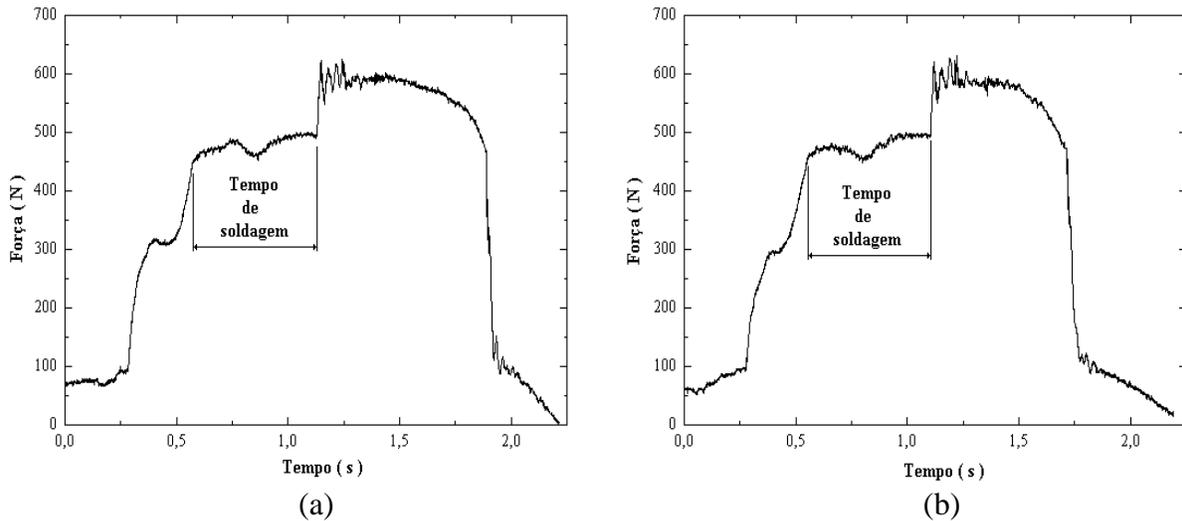


Figura 2-Gráficos da força aplicada  
 (a) Amostra 9  
 (b) Amostra 42

O *shunt* resistivo construído apresentou uma resistência de  $29,12 \mu\Omega$ . Com este resultado foi possível determinar a corrente de soldagem. Dividindo-se os valores de pico da corrente pelos valores correspondentes da tensão chegou-se aos gráficos de resistência dinâmica. A “Figura 3” apresenta os gráficos das amostras 9 e 42.

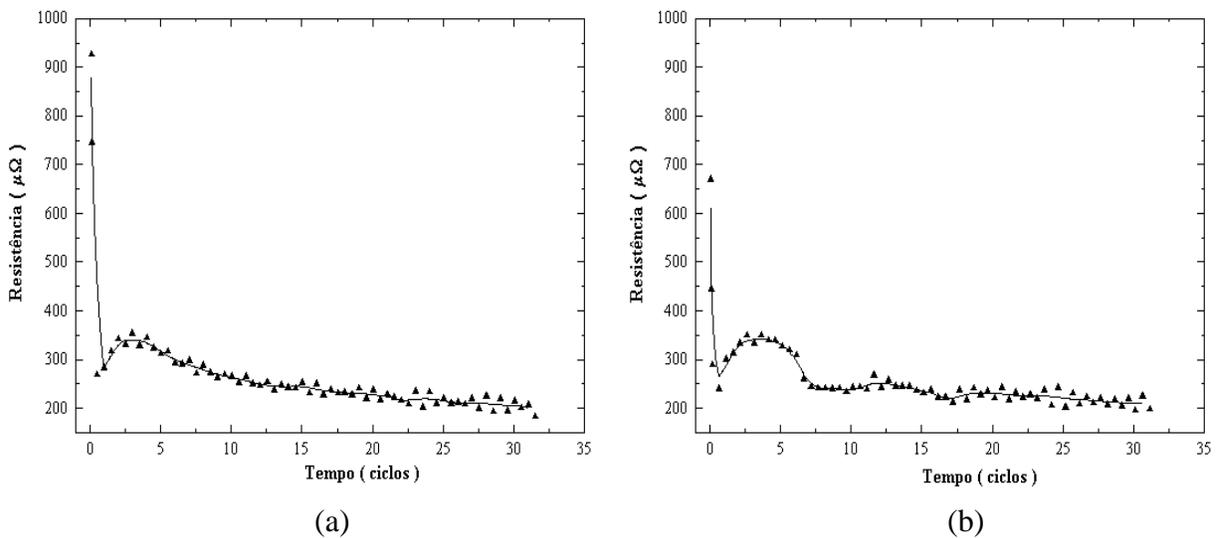


Figura 3- Gráficos de resistência dinâmica  
 (a) Amostra 9  
 (b) Amostra 42

Todos os estágios indicados na “Fig.1” foram obtidos experimentalmente. As condições de soldagem fixadas foram suficientes para que as curvas atingissem o ponto  $\beta$ , demonstrando que as lentes foram completamente desenvolvidas. Os altos valores de resistência dinâmica, se comparados com a literatura, são devidos às baixas forças e correntes empregadas e à ausência de tratamento superficial nas peças. Os pontos referentes ao estágio I corresponderam a valores próximos aos do primeiro pico das curvas de corrente e tensão.

Entretanto, a resistência mecânica da amostra 9 foi de 3540 N, enquanto que a amostra 42 apresentou uma resistência de 2995 N. Analisando-se então os gráficos de resistência dinâmica das amostras selecionadas, percebeu-se que as amostras de menor resistência mecânica apresentavam uma queda brusca de resistência dinâmica após atingirem o ponto  $\beta$ , enquanto que nas de maior resistência a queda era suave.

Um fato notável observado foi que as amostras de menor resistência mecânica foram aquelas em que houve faiscamento. Ao se examinar algumas dessas amostras após o ensaio de tração-cisalhamento, notou-se a existência de algumas partículas metálicas próximas à lente de solda. A presença destas partículas dá a indicação da ocorrência de expulsão, causada provavelmente pelo baixo valor da força aplicada.

A determinação final da relação entre as resistências dinâmica e mecânica foi concretizada tomando-se as curvas médias de resistência dinâmica das 4 amostras de maior resistência mecânica e das 4 de menor resistência mecânica. Essas curvas serão denominadas respectivamente de média superior e média inferior. A “Figura 4” apresenta essas curvas.

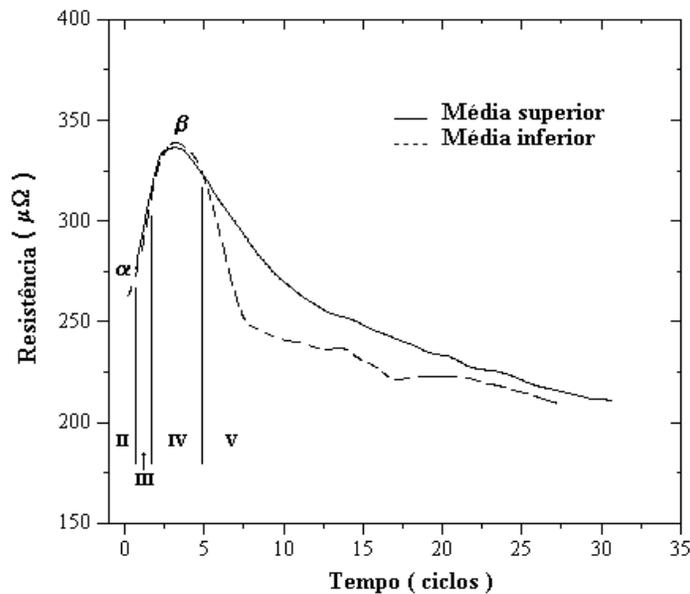


Figura 4- Curvas médias de resistência dinâmica

O estágio I das curvas foi eliminado por não corresponder a valores de pico e por ocorrer quase instantaneamente, sendo de difícil detecção para o sistema. Os estágios de II a IV apresentaram o mesmo comportamento, não influenciando na resistência mecânica. Já o estágio V foi notadamente o mais influente no processo. Para um tempo de 7,5 ciclos a resistência dinâmica caiu aproximadamente  $42 \mu\Omega$  a partir de  $\beta$  para a média superior, enquanto que para a média inferior caiu aproximadamente  $90 \mu\Omega$ . Portanto, o último estágio deve sofrer um controle rigoroso por parte do sistema de controle.

As curvas de força também foram analisadas com o intuito de aumentar o número de variáveis de controle. A “Figura 5” e a “Figura 6” mostram um gráfico comparativo entre as curvas de resistência dinâmica e de força para as amostras 9 e 42 respectivamente. Observa-se que a curva de força atinge um mínimo num ponto distante de  $\beta$ . Isto indica que a lente havia se formado mas continuava a se expandir, provocando uma reação no sentido contrário da força. A partir do momento em que a lente atinge o equilíbrio térmico as temperaturas se estabilizam e a sua expansão cessa. O calor será transmitido para as vizinhanças sem qualquer aumento na temperatura da zona de solda. Nesse ponto a força atinge o mínimo e depois volta a crescer.

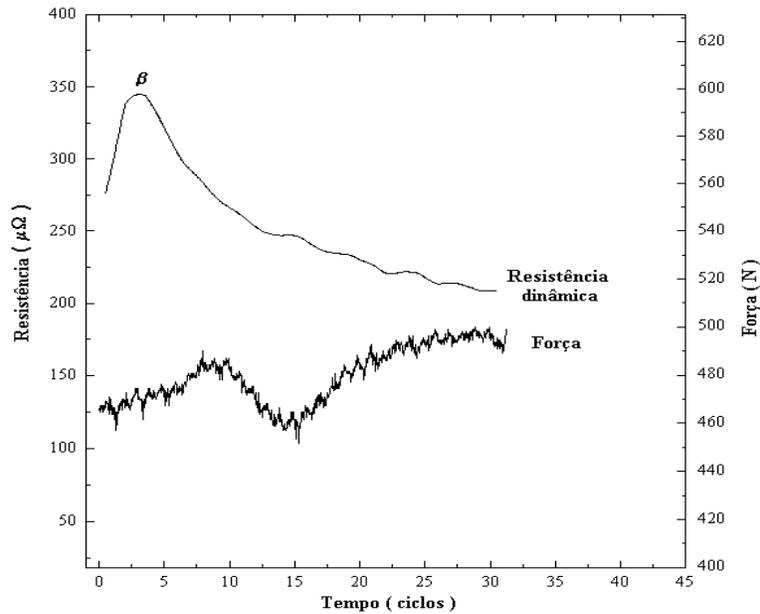


Figura 5- Gráfico comparativo entre a resistência dinâmica e a força para a amostra 9

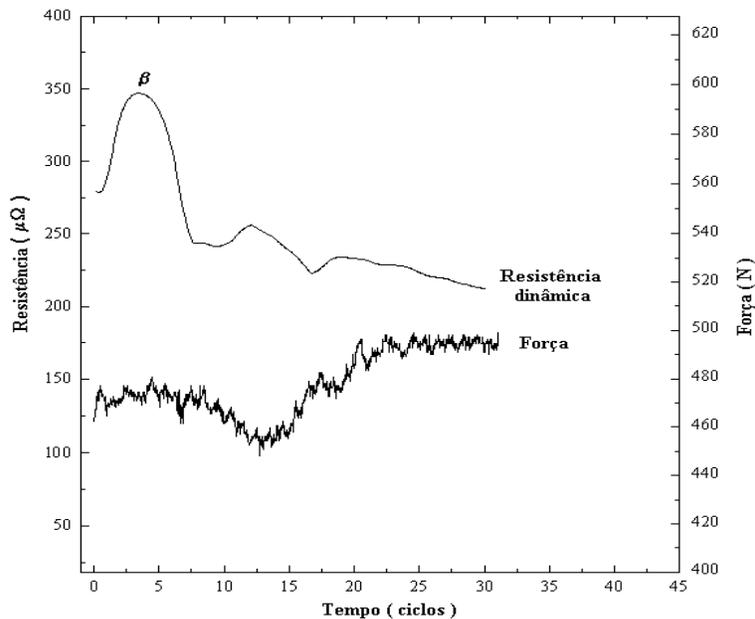


Figura 6- Gráfico comparativo entre a resistência dinâmica e a força para a amostra 42

Além disso, ocorre uma diferença quando se compara as duas figuras. Para a amostra 9, quando a resistência dinâmica atinge o pico  $\beta$ , a força está crescendo, enquanto que para a amostra 42 a força começa a cair. Este fato confirma a indicação de expulsão na amostra 42, sendo que a força aplicada não foi suficiente para reter o metal de solda. Portanto, um controle rigoroso do estágio IV também é importante durante a soldagem.

O controle da força torna-se importante quando se considera a queda abrupta da resistência após o ponto  $\beta$ . Atuando-se na força pode-se fazer que o estágio V apresente uma queda mais suave. Uma leve redução desse parâmetro durante um curto intervalo de tempo

fará com que as resistências de contato e do material cresçam, contrabalançando a tendência de queda anterior.

Portanto, um sistema de controle em tempo real baseado na resistência dinâmica e na força pode ser uma ferramenta eficiente na garantia da qualidade no processo de soldagem a ponto por resistência.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os dispositivos construídos para a medição direta dos parâmetros de soldagem apresentaram resultados satisfatórios, permitindo uma boa caracterização do processo.

Pode-se dizer que a queda súbita da resistência dinâmica após o ponto  $\beta$  foi a causa principal da baixa resistência mecânica apresentada por algumas amostras. Esta queda está relacionada, provavelmente, com o fenômeno de expulsão.

A força aplicada pode ser usada como parâmetro de controle. Sua variação, mesmo tendo sido pequena, pode indicar a maneira pela qual a lente está se desenvolvendo. O ponto de mínimo na curva da força equivale ao ponto de equilíbrio térmico da lente.

A resistência dinâmica é um parâmetro relevante na determinação da qualidade da solda. Monitorando-se em tempo real a resistência dinâmica e a força é possível prever a resistência mecânica da solda sem a necessidade de ensaios destrutivos.

#### ***Agradecimentos***

CAPES, CNPq, USIMINAS S/A e Depto. de Engenharia Elétrica UFMG.

#### **5. REFERÊNCIAS**

- A. W. S., 1998, The professional's advisor on resistance welding.
- Bhattacharya, S. & Andrews, D. R., 1974, Significance of dynamic resistance curves in the theory and practice of spot welding, *Welding and Metal Fabrication*, vol. 42, pp. 296-301.
- Broomhead, J. H. W. & Dony, P. H., 1990, Resistance spot welding quality assurance, *Welding and Metal Fabrication*, vol. 58, n. 6, pp. 309-314.
- Dickinson, D. W. et al., 1980, Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring, *Welding Journal*, vol. 59, n. 6, pp. 170-176.
- Gedeon, S. A. & Eagar, T. W., 1986, Resistance spot welding of galvanized steel: part II. Mechanisms of spot weld formation, *Mettallurgical Transactions B*, vol. 17B, pp. 887-901.
- Gedeon, S. A. et al., 1987, Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds, *Welding Journal*, vol. 66, n.12, pp. 378-385.
- Maria, C. R. et al., 1990, Contribuição ao estudo de soldagem a ponto por resistência elétrica através de sistema instrumentado, *Anais XVI ENTS - ABS*, pp. 419-434.
- Savage, W. F. et al., 1978, Dynamic contact resistance of series spot welds, *Welding Journal*, vol. 57, n. 2, pp. 43-50.

## **IN-PROCESS MONITORING OF DYNAMIC RESISTANCE ON RESISTANCE WELDING AND EVALUATION OF YOUR RELATIONSHIP WITH NUGGET'S MECHANICAL STRENGTH**

***Abstract.** In this work, a technique of dynamic resistance monitoring was used during weld production and related with its mechanical strength. A system was developed to monitor welding current, welding voltage and the force applied by the electrodes. Dynamic resistance was obtained by the relationship between the first two variables and the force was used as an auxiliary variable. Mechanical strength of the weld was evaluated by the tensile-shear test. It was verified that welds of lowest mechanical strength showed a sudden fall in the dynamic resistance curve. It was concluded that acting on the force would allow to correct this problem and obtain welds with higher mechanical strength. It was found that a control system based on dynamic resistance, having the force as auxiliary variable, would be capable to guarantee weld quality.*

***Key words:** Resistance welding, In-process monitoring, Dynamic resistance, Mechanical strength*