

# O COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA COM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO DO ELETRODO NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA<sup>1</sup>

*Leandro Cardoso Venceguerra<sup>2</sup>*

*Márcio Batista<sup>3</sup>*

*Valdir Furlanetto<sup>4</sup>*

*Sérgio Duarte Brandi<sup>5</sup>*

## Resumo

A indústria automotiva é considerada um dos principais pilares econômicos do país, notadamente devido à sua grande capacidade de demanda de empregos e pela cadeia de fornecedores. Nas últimas décadas, em função da competitividade do setor, as indústrias automotivas vêm passando por grande reestruturação, principalmente na área de manufatura, onde é exigida desta área grande flexibilidade, capacidade de mudança e, cada vez mais, aumento de produtividade, para suprir o mercado interno e as exportações. O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica vem sendo utilizado na indústria automobilística há várias décadas, sendo atualmente o processo mais aplicado na união dos variados tipos de conjuntos de peças em chapas de aço, que compõem a carroceria do automóvel. O presente trabalho será voltado para o comportamento da resistência dinâmica, com relação à deformação do eletrodo em chapas de aço sem revestimento, de espessura de 0,8 mm, utilizando equipamento de corrente alternada. Foram feitos gráficos de resistência dinâmica, potência ativa, energia dinâmica e gráfico de compensação do eletrodo para 1 ponto, 200 pontos e 400 pontos. Posteriormente foram analisadas as dimensões geométricas destes pontos através das macrografias e da resistência mecânica com ensaio de tração do ponto. Os resultados mostraram que a resistência dinâmica diminui com a diminuição da densidade de corrente, devido à deformação do eletrodo, apesar do acréscimo de corrente com a compensação. A energia dinâmica e a potência ativa aumentam com o aumento da densidade de corrente elétrica. Existe um limite de compensação de corrente devido à assimetria entre a passagem da corrente.

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

## Abstract

The automotive industry is considered one of the main economic pillars of the country, mainly due to its great capacity to demand jobs, and supply chains. In recent decades, according to the competitiveness of the sector, the automotive industries have undergone major restructuring, mainly in manufacturing processes, which requires flexibility, ability to change and increasing productivity to supply the internal and external markets. The resistance spot welding process has been used in the automotive industry for decades, being the most applied nowadays, in the joining of various types of steel plates, which makes the car bodies. This work is based upon the behavior of dynamic resistance concerning deformation of the electrode when welding uncoated steel sheet of thickness 0.8mm, using welding equipment with alternating current. Graphs of dynamic resistance, active power, dynamic energy and graphic compensation of the electrode for one point, 200 points and 400 points were made. Afterwards the geometrical dimensions of these points were analyzed by macrography and strength with tensile test. The results showed that the dynamic resistance decreases with the decrease in current density due to deformation of the electrode, in spite of the addition of the compensation current. The dynamic power and active power increases with increasing density of electric current. There is a current compensation limit due to the asymmetry between the passages of current.

**Key words:** Spot welding; Dynamic resistance; Electrode deformation; Automotive industry.

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

<sup>2</sup> *Especialista em Planejamento, Alcatel, Lucent, SP, Brasil.*

<sup>3</sup> *MSc., Engenheiro, Volkswagen do Brasil S.A., SP, Brasil.*

<sup>4</sup> *MSc., Diretor, Welding Science, SP, Brasil.*

<sup>5</sup> *Prof. Dr., Titular do Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, SP, Brasil.*

## **1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 Introdução**

“Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo”.<sup>(1)</sup>

A soldagem por resistência elétrica compreende um grupo de processos no qual a união de peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado na junta através de resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) e pela aplicação de pressão.<sup>(2)</sup>

Uma carroceria de veículo requer milhares de pontos de solda, usando sistemas robóticos a fim de que as uniões possam ser feitas em poucos segundos. O tempo mínimo de soldagem e a habilidade mínima do operador são as principais vantagens deste processo. A principal desvantagem é a necessidade dos eletrodos terem acessibilidade em ambos os lados da peça a ser soldada.<sup>(3)</sup>

Os eletrodos usados na soldagem a ponto não somente conduzem a corrente para as peças a serem soldadas, mas também transmitem a força e dissipam o calor da zona de solda. Os eletrodos são tipicamente feitos de liga de cobre e refrigerados com água.<sup>(3)</sup>

O equipamento básico usado na soldagem a ponto por resistência consiste de um circuito elétrico, equipamento de controle e um sistema de aplicação de força.<sup>(2)</sup>

A formação de um ponto de solda e o seu comportamento durante a soldagem, em geral, são diretamente dependentes de vários fatores. Dentre os mais relevantes incluem-se: materiais, eletrodos, equipamentos, desenho da junta, planejamento e condições de soldagem.

Portanto, o presente trabalho será voltado para o estudo do comportamento da resistência dinâmica com relação à deformação do eletrodo na soldagem a ponto por resistência, utilizando equipamento de soldagem com corrente alternada (CA), em chapas de aço para indústria automotiva sem revestimento.

As variáveis estudadas foram: Resistência Dinâmica, Energia Dinâmica, Potência Ativa, a Geometria e a Propriedade Mecânica de Tração do ponto de solda, a fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante a soldagem, mas também o atendimento aos requisitos mínimos de norma para a qualificação de um procedimento de soldagem.

### **1.2 Princípios de Funcionamento da Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica**

Através da circulação da corrente elétrica entre os eletrodos de contato com as peças, é gerada, por efeito Joule, uma quantidade de calor na resistência de contato entre as superfícies, provocando a elevação de temperatura e iniciando a fusão dos metais.<sup>(4)</sup> Como ilustra a Figura 1, os eletrodos aplicam força entre as peças e a massa metálica que está se fundindo fica sob pressão, evitando sua expulsão pela superfície de contato.<sup>(5)</sup>

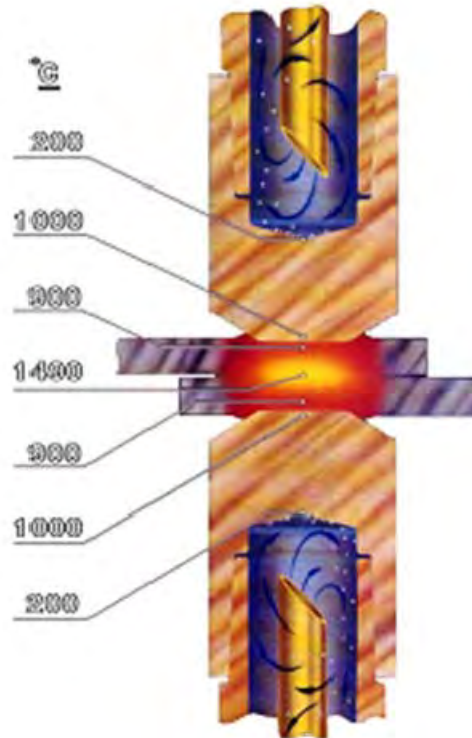


Figura 1. Formação do ponto de solda.<sup>(6)</sup>

### 1.3 Fundamentos do Processo

Com as chapas unidas mecanicamente através da pressão exercida pelos eletrodos, pode-se dizer que a resistência ( $R$ ) entre eletrodos é um conjunto de resistências elétricas.<sup>(3)</sup> Conforme mostra a Equação 1 existem na realidade pelo menos cinco resistências conectadas em série, que produzem o aquecimento da junta.

$$R = R_{\text{eletrodo-peçaA}} + R_A + R_{\text{solda}} + R_B + R_{\text{eletrodo-peçaB}} \quad (1)$$

### 1.4 Resistências Elétrica Dinâmica de Contato

A resistência elétrica de contato muda rapidamente durante o período de soldagem, devido a resistividade do material alterar com a temperatura conforme pode-se observar na Equação 2, portanto, é de natureza dinâmica.<sup>(7)</sup>

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (2)$$

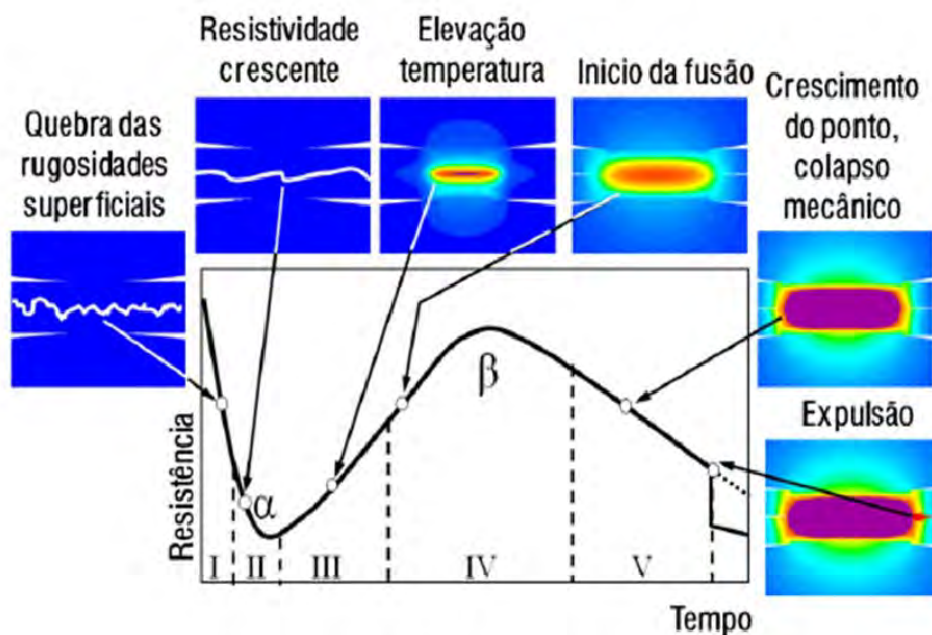
Onde:

- $\rho$  = Resistividade do material à temperatura  $\theta$  °C;
- $\rho_0$  = Resistividade do material a temperatura ambiente;
- $\alpha$  = Constante do material (coeficiente de temperatura °C<sup>-1</sup>);
- $\theta$  = Temperatura de trabalho; e
- $\theta_0$  = Temperatura ambiente.

## 1.5 Estágios da Resistência Dinâmica Durante a Formação do Ponto de Solda

Com base na Figura 2 têm-se os diferentes estágios da existência dinâmica durante a soldagem a ponto:<sup>(8)</sup>

- estágio I: quebra das rugosidades superficiais nas interfaces das chapas;
- estágio II: com o contato metal-metal há um aquecimento concentrado na interface entre as duas chapas. Este fato faz com que a área de contato aumente, diminuindo a resistência elétrica. Em contra partida a resistividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura e a competição entre estes dois mecanismos define o ponto  $\alpha$ ;
- estágio III: aumenta a resistividade com o aumento da temperatura; transição para o estágio IV na inflexão da curva (IC); começa a fusão;
- estágio IV: fusão por três mecanismos:
  - aumento da temperatura do material, aumentando a resistividade;
  - a fusão na interface aumenta a área da seção transversal, diminuindo a resistência elétrica;
  - a resistência mecânica do material diminui com o aumento da temperatura. Devido a este fato ocorre um aumento da área de contato pelo colapso das chapas pelos eletrodos. Por consequência disso, a resistência elétrica diminui. Ponto  $\beta$  indica início do crescimento do ponto;
- estágio V: o ponto cresce e pode ocorrer o colapso mecânico e a expulsão.

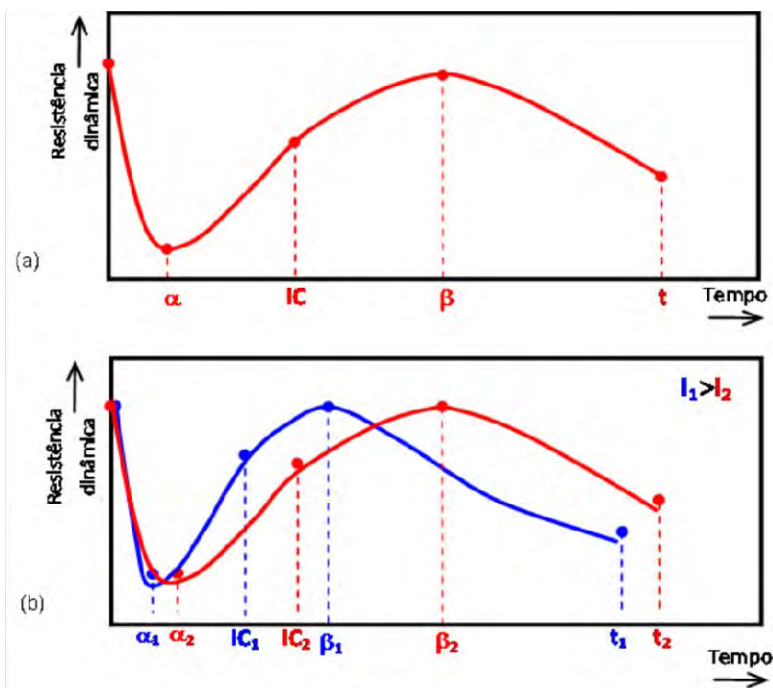


**Figura 2.** Esquema dos principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda.<sup>(8)</sup>

## 1.6 O Efeito do Aumento da Corrente no Posicionamento da Curva da Resistência Dinâmica

A Figura 3a mostra parâmetros característicos para comparação entre duas curvas e a Figura 3b mostra o aumento da corrente de soldagem, mantendo-se os outros parâmetros de soldagem constantes. Com o aumento da corrente, os pontos  $\alpha$  e  $\beta$

são formados em tempos menores, devido à maior energia com o aumento da corrente de soldagem.<sup>(8)</sup>



**Figura 3.** Curva de resistência dinâmica esquemática com os parâmetros importantes para a soldagem (a). Em (b) efeito do aumento da corrente na curva da resistência dinâmica.<sup>(9)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Eletrodos

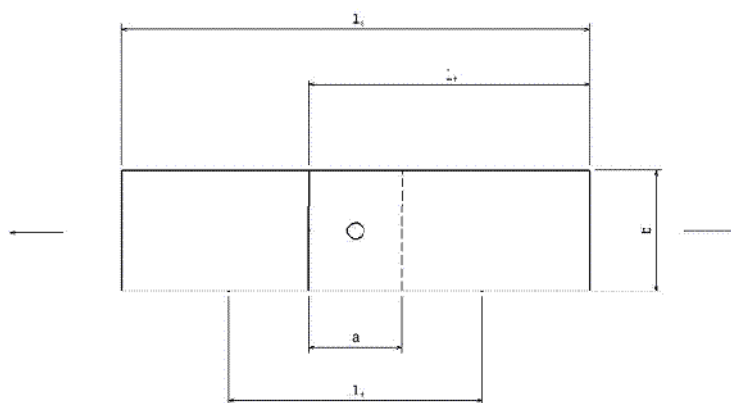
Os eletrodos utilizados nos experimentos são da classe 1 segundo RWMA e fabricados em cobre – zircônio (0,15% Zr) endurecido por trabalho a frio com dureza de 70 HB e 90% de condutividade IACS. As pontas dos eletrodos apresentam um raio esférico de 8 mm, a Figura 4 mostra o eletrodo utilizado no experimento.



**Figura 4.** Eletrodo utilizado no experimento.

### 2.2 Corpos-de-Prova

Chapa de aço em espessura de 0,8 mm, sem revestimento com limite de escoamento de 180 N/mm<sup>2</sup>, limite de resistência de 315 N/mm<sup>2</sup> e alongamento de 42%. As dimensões dos corpos-de-prova especificadas pela norma EN ISO 14273 de acordo com sua espessura utilizadas neste trabalho estão mostradas na Figura 5.



Dimensões dos corpos-de-prova conforme Norma - EN ISO 14273

t (espessura)	a	b	$l_s$	$l_f$	$l_t$
$0,5 < t \leq 1,5$	35	45	175	95	105

Figura 5. Dimensões do corpo-de-prova de acordo com a norma EN ISO 14273 e espessura de 0.8mm.

### 2.3 Equipamentos de Medições

A resistência dinâmica foi gerada por um programa de tratamento de dados, a fim de se observar e comparar o comportamento da resistência dinâmica, a energia dinâmica e a potência ativa durante a soldagem dos pontos. Na Tabela 1 e Figura 6 mostram-se os equipamentos detalhados para medições da tensão e corrente durante o experimento.

Tabela 1. Equipamentos usados nas medições de tensão e corrente

Item	Equipamento	Descrição
1	Osciloscópio - TiePie HS4	DSO, 4 canais diferenciais, 20 MHz
2	Computador - asus EEEPC	Software Windows XP
3	Equipamento de leitura de corrente	Weld Test Miyachi - MM315
4	Sensor para captura da corrente	Bobina de Rogowski do tipo flexível
5	Porta eletrodo	Ponta de prova diferencial

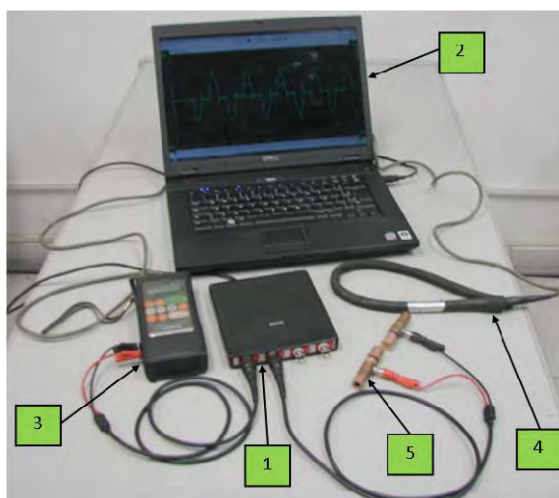
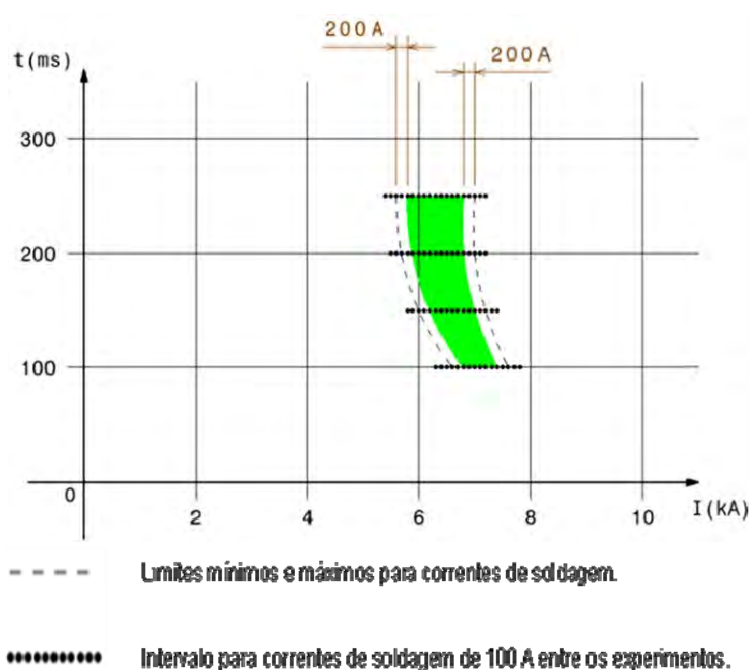


Figura 6. Foto dos equipamentos utilizados para medições da tensão e corrente durante os experimentos [adaptado da referência.<sup>(9)</sup>

## 2.4 Determinação do Diagrama de Soldabilidade

Para determinação do diagrama tempo versus corrente, como apresentado na Figura 7 foi necessário definir a janela operacional. Para tal, fixou-se a força aplicada na soldagem e o tempo em 100ms. Aumentou-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A, 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 especificação. Fixou-se o limite mínimo da corrente de soldagem a partir deste ponto e acrescentou-se 200 A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem. Com o limite mínimo estabelecido aumentou-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A até ocorrer a expulsão de material, neste ponto diminuiu-se 200 A e encontrou-se o limite máximo. Repetiu-se o mesmo procedimento acima para os outros três tempos – 150, 200 e 250 ms.



**Figura 7.** Exemplo de método de determinação dos limites mínimos e máximos de correntes de soldagem para os diagramas de soldabilidade durante os experimentos.<sup>(9)</sup>

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 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 valores de 4,2 kA e 5,4 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 180 kgf. Portanto os parâmetros do ponto ótimo foram: corrente 4,8 kA, tempo de soldagem 200 ms (12 ciclos) e força constante 180 kgf.

O diagrama de soldabilidade foi obtido levando-se em conta o diâmetro do ponto e a força mínima da junta após ensaio de cisalhamento. No diagrama de soldabilidade estão representados o diâmetro do ponto em mm e a força mínima em kgf, respectivamente. Por exemplo, para a Figura 8, no parâmetro de aproximadamente

4,8kA e 100 ms, os dados mostrados foram (3,2 - 343), onde 3,2 indica um ponto de 3,2 mm de diâmetro e a força do ensaio de tração de 343 kgf. Tanto o diâmetro quanto a força de tração são valores médios de três corpos-de-prova, ou seja, para cada ponto do gráfico foram feitos 6 corpos de prova, num total de 48 corpos de prova.

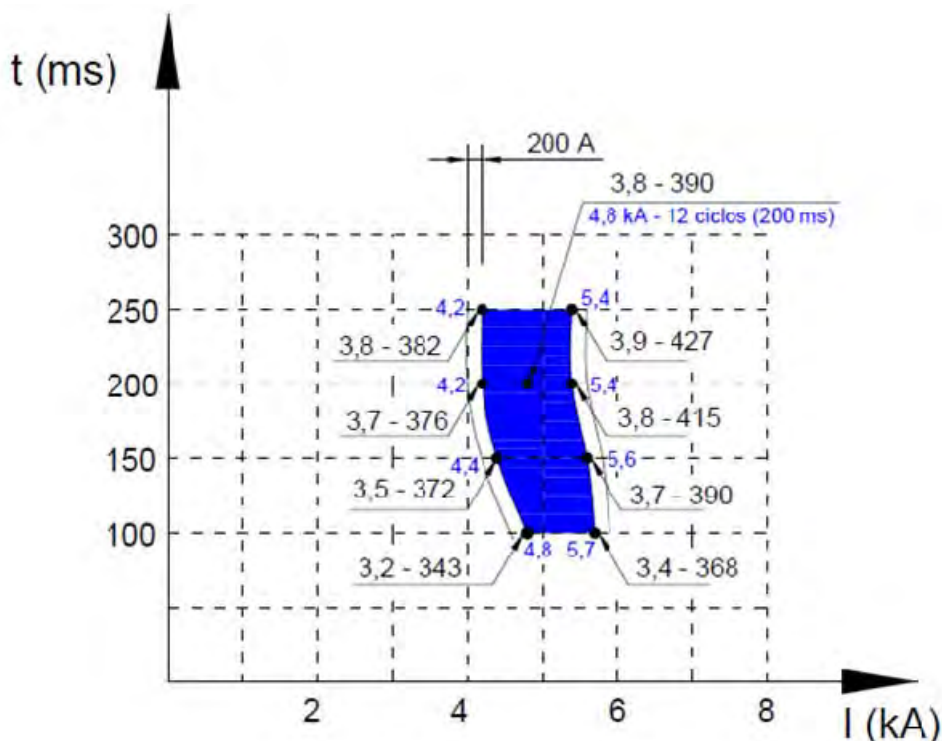


Figura 8. Diagramas de soldabilidade tempo versus corrente com força constante de 180 kgf.

### 3.2 Gráfico de Compensação Elétrica de Desgaste dos Eletrodos

Com os parâmetros obtidos na janela operacional (ponto ótimo) no diagrama de soldabilidade (item 3.1) iniciou-se o 1º ponto com uma corrente de 4,8 kA. Com o acréscimo da corrente de solda a cada ponto executado, chegou-se a 200 pontos (Meia Vida) com 7,5 kA e a 400 pontos (Fim) com 8,1 kA (Figura 9). Porém observou-se que a partir de 400 pontos há um limite de ajuste da curva de compensação definido por dois fatores principais, a capacidade de fornecimento de corrente do transformador do equipamento e as condições de trabalho do eletrodo, que se limita a deformações, trincas, camadas de impurezas e a refrigeração. Desta forma em 550 pontos ocorreu o fim da compensação e tornou-se necessário a 1ª frezagem do eletrodo.



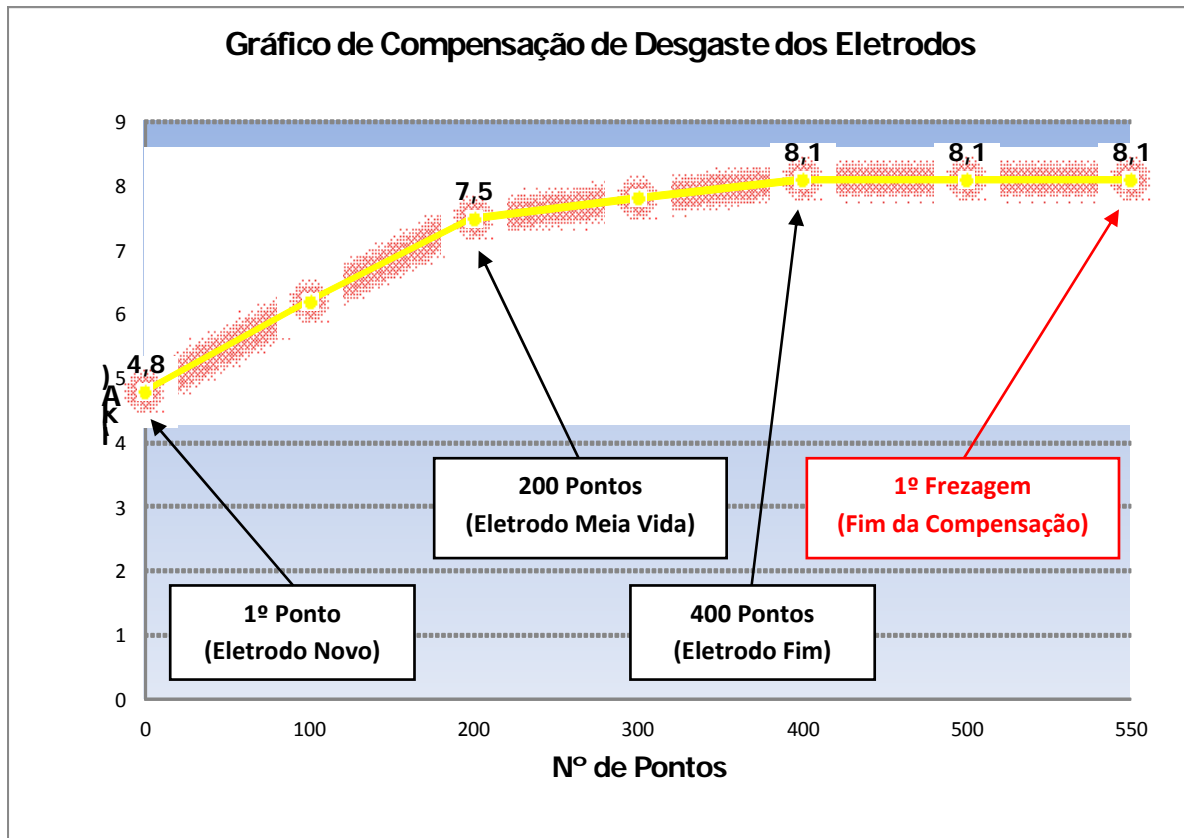


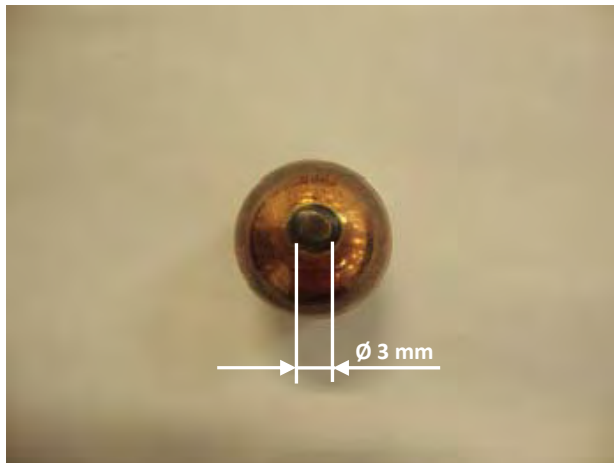
Figura 9. Gráfico de compensação elétrica de desgaste dos eletrodos.

### 3.3 Deformação do Eletrodo de acordo com o Número de Pontos

Na sequência ilustrou-se a deformação do eletrodo com o aumento do número de pontos, observa-se na Figura 10 o eletrodo novo e nas Figuras 11, 12 e 13 o aumento do diâmetro da ponta do eletrodo com o avanço do número de pontos. E ao lado de cada figura os valores de densidade de corrente que diminuem exponencialmente conforme a deformação do eletrodo.



Figura 10. Eletrodo novo.



**Densidade de corrente**

**679 A/ mm<sup>2</sup>**

**Figura 11.** Eletrodo com 1 ponto e diâmetro da ponta com 3 mm.



**Densidade de corrente**

**195 A/ mm<sup>2</sup>**

**Figura 12.** Eletrodo com 200 pontos e diâmetro da ponta com 7 mm.



**Densidade de corrente**

**127 A/ mm<sup>2</sup>**

**Figura 13.** Eletrodo com 400 pontos e diâmetro da ponta com 9 mm.

### 3.4 Análise do Gráfico da Resistência Dinâmica

Com relação aos pontos  $\alpha$  e  $\beta$ , mostrados na Figura 3b da revisão bibliográfica, com o aumento da corrente, estes pontos são deslocados para tempos um pouco menores. Se compararmos com as curvas obtidas no ensaio de resistência dinâmica da Figura 14 nota-se que o comportamento dos pontos  $\alpha$  e  $\beta$  são diferentes, ou seja, eles se deslocam para tempos maiores e resistências dinâmicas menores. Este fato

está relacionado com a diminuição da densidade da corrente devido à deformação do eletrodo. Com isso, a geração de calor será menor e inversamente proporcional ao aumento da corrente.

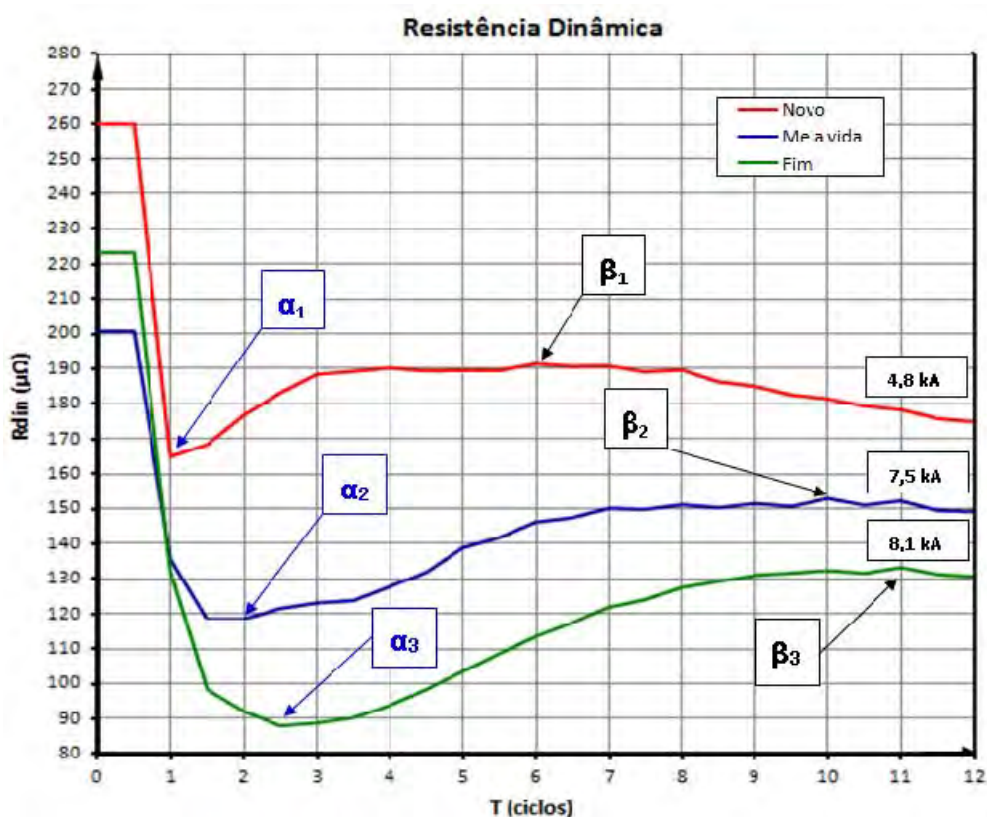


Figura 14. Gráfico da resistência dinâmica.

### 3.5 Análise dos Gráficos de Potência Ativa e Energia Elétrica

Na Equação 3 podemos dizer que a energia elétrica é diretamente proporcional a corrente elétrica. Comparando-se o gráfico potência ativa mostrado na Figura 15 com o da energia elétrica mostrado na Figura 16, observamos a correlação entre ambos no experimento. O eletrodo na condição Novo utiliza a menor corrente, portanto o menor consumo de energia elétrica, enquanto que na condição Fim utiliza a maior corrente, portanto o maior consumo de energia elétrica.

$$E = R \cdot I^2 \cdot T \quad (3)$$

Onde:

- E = Energia dinâmica (kJ);
- R = Resistência elétrica ( $\Omega$ );
- I = Corrente (A); e
- T = Período.

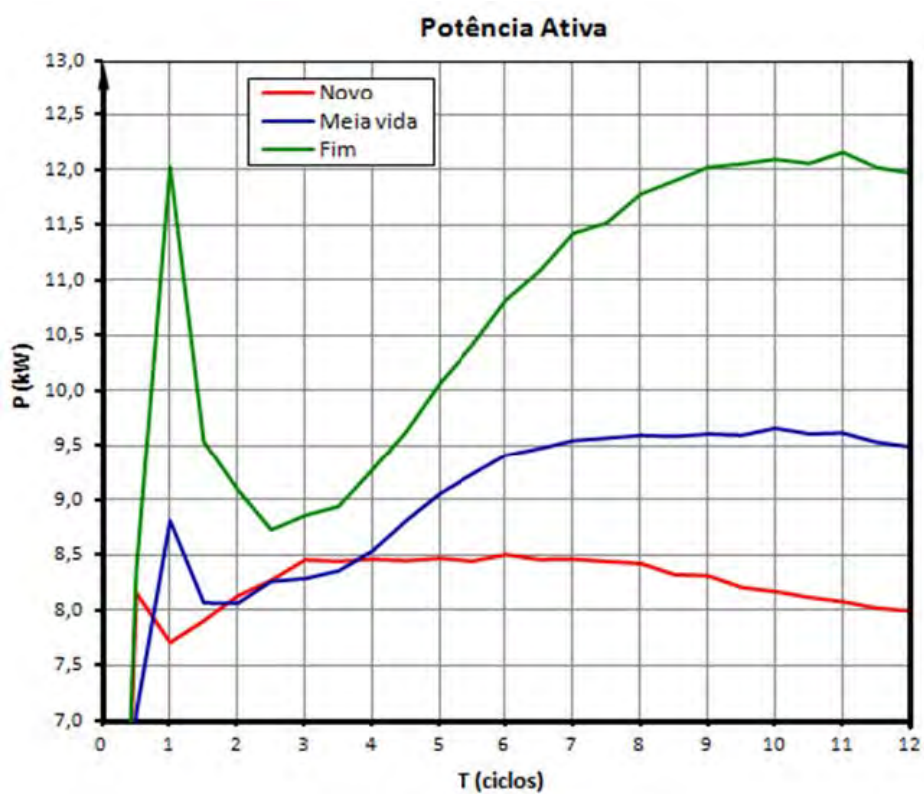


Figura 15. Gráfico da Potência Ativa.

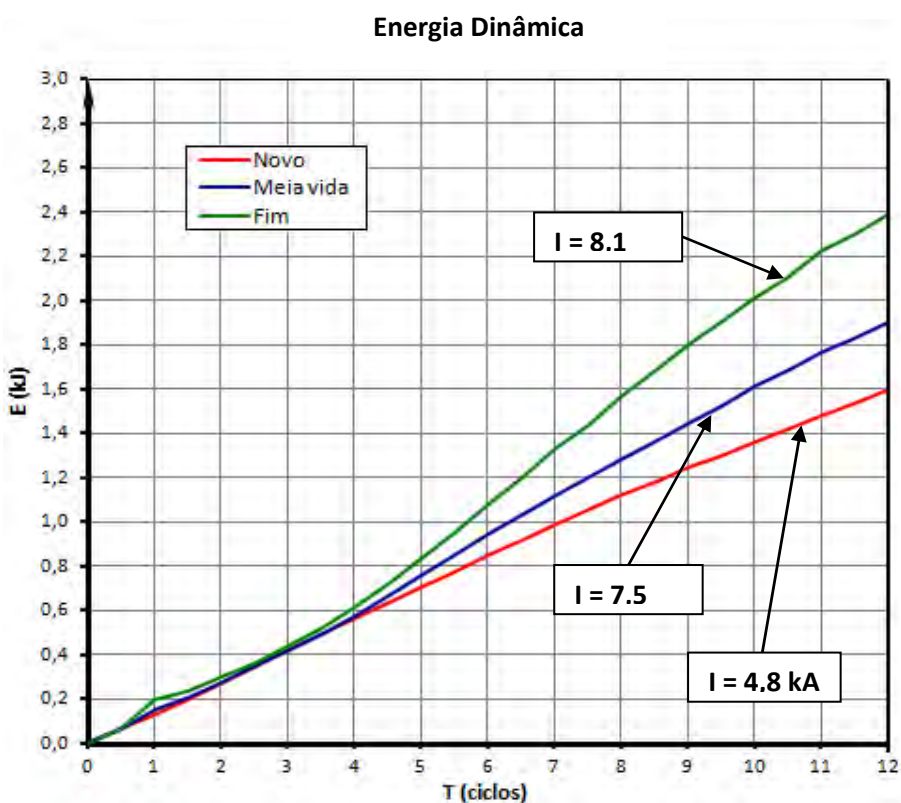


Figura 16. Gráfico de Energia Elétrica.

### 3.6 Dimensões dos Pontos de Solda

A Figura 17 mostra as indicações dos dados  $d$  (diâmetro),  $p$  (penetração) e ind. (indentação) nos pontos de solda em relação ao número de pontos executados.

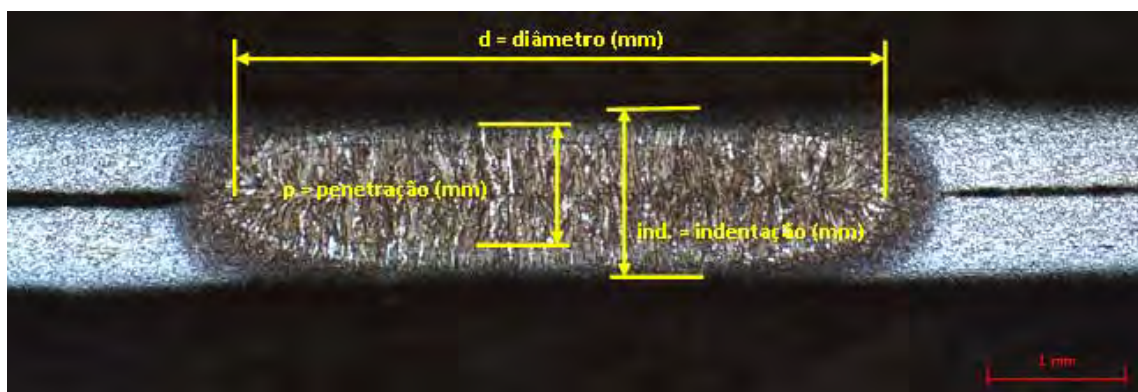


Figura 17. Dimensões dos pontos de solda coletados através das macrografias.

Na Tabela 2 com os dados dos experimentos observou-se que o diâmetro do ponto aumenta devido ao aumento da área do eletrodo. Da mesma maneira; a penetração aumenta devido ao aumento da geração de calor, ocasionada pelo aumento da corrente elétrica para a compensação do desgaste do eletrodo. É possível observar também que a indentação aumenta devido ao aumento da área da ponta do eletrodo, que por sua vez diminui a pressão nas chapas.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem e dados obtidos no experimento

Número de pontos	$d$ (mm)	$p$ (mm)	ind.(mm)	Corrente (kA)	Tempo (ciclos)	Força (kgf)
1	3.80	1.00	1.50	4.80	12.00	180.00
200	5.20	1.20	1.50	7.50	12.00	180.00
400	5.40	1.30	1.60	8.10	12.00	180.00
550	4.80	1.20	1.75	8.10	12.00	180.00

## 4 CONCLUSÕES

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

- a resistência dinâmica diminui com o aumento da deformação do eletrodo apesar do aumento da compensação da corrente. Com isto pode-se concluir que o aumento da área do eletrodo reduz a resistência dinâmica. Fato este que pode ser observado no deslocamento para tempos maiores dos pontos  $\alpha$  e  $\beta$ ;
- a energia dinâmica e a potência ativa aumentam com a deformação do eletrodo, devido ao aumento da compensação da corrente elétrica. Pode-se concluir que quanto menor a densidade da corrente, maior será a energia dinâmica e potência ativa gasta no ponto de solda; e
- a área do ponto de solda a partir de 400 pontos começa a diminuir, este fato está relacionado com a excessiva deformação do eletrodo. Pode-se concluir que com a irregularidade de contato entre um eletrodo e outro, não há uma simetria para passagem da corrente entre ambos e entre as chapas, por isso a geração de calor não será homogênea na interface das mesmas.

## REFERÊNCIAS

- 1 BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.1-8.
- 2 MARQUES, P. V.; MODENESI, J. Q.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.
- 3 JENNEY, C.L. (Editor), O'BRIEN, A. (Editor) – “AWS Welding Handbook, Vol. 1 - Welding Science and Technology”, 9<sup>o</sup> Ed. American Welding Society, EUA, 2001. 918 p.
- 4 KEARNS, W.H. Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes. Miami: American Welding Society, 1984.
- 5 ZHANG, H; SENKARA, J. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 1. ed. London: Taylor & Francis, 2006. 431 p.
- 6 FURLANETTO, V. Proposta e validação experimental de um modelo para máquina de solda a ponto CA. USP, 2005. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 7 SHOME, M. Effect of dynamic contact resistances on advanced high strength steels under medium frequency DC spot welding conditions. Science and Technology of Welding and Joining, Índia, v. 14, n .6, p.533-541, Dec. 2008.
- 8 DICKINSON, D. W.; FRANKLIN. J.E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring Welding Research Council, New York, v. 59, n.6, p. 170-176, June 1980.
- 9 BATISTA, MÁRCIO. Estudo Comparativo da Soldabilidade de Chapas para Indústria Automotiva Utilizando Dois Equipamentos de Soldagem a Ponto por resistência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 194 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.