

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM JUNTAS DE TRÊS CAMADAS

Luiz Henrique Saraiva Tolentino, luiztolentino@gmail.com¹

Gilmar Ferreira Batalha, gilmar.epusp@gmail.com¹

Valdir Furlanetto, Valdir@weldingscience.com.br¹

Márcio Batista, marciobatista@usp.br¹

¹Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo – Avenida Professor Mello Moraes, 2231 – Vila Universitária - CEP: 05508-030.

Resumo: O estudo fundamentou-se em um caso de melhoria do processo produtivo. Objetivou-se a substituição do processo de secagem por indução da cola estrutural nas portas e capô, por um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Desta maneira, concentrou-se no estudo da influência da alteração dos parâmetros: força entre eletrodos, tempo, corrente, e inversão do sentido da corrente elétrica, partindo-se de um parâmetro referência. Com o objetivo de atendimento aos requisitos do processo de produção, a soldagem a ponto em amostras de três camadas (bordas de capôs e portas de automóveis) será realizada de maneira que marcas impressas pelo eletrodo não sejam visualizadas pelo cliente, ou seja, não deve se ter marcas impressas na face externa das portas e capô do veículo. Produziu-se 35 pontos, subdivididos em 5 grupos de parâmetros distintos e foram submetidos aos seguintes ensaios: visual, dimensional, micrografia e resistência à tração. Após coleta de informações nos ensaios, avalia-se comparativamente os efeitos da mudança de parâmetros com relações ao parâmetro referência adotado na aplicação.

Palavras-chave: Solda a ponto, Parâmetros de solda, Capô, Portas Automotivas, Grafagem.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da solda a ponto por resistência é largamente usada na indústria automobilística, devido ao custo benefício, excelente produtividade e valor do investimento. (RUIZ e BATALHA, 2005) A importância deste processo é evidente na indústria automobilística, onde os carros em média possuem 4.000 pontos de solda e que baseado na produção brasileira de veículos em 2016 com 2,2 milhões de carros que resulta em 24 milhões de pontos de solda diariamente.

O processo é amplamente utilizado, pesquisado em universidades e possui dificuldades na medição das grandezas, o que foi sempre uma barreira para a melhoria. Muitos problemas na produção provocam perdas de insumos, desperdício de energia, retrabalho, sucateamento de peças e as consequências são a falta de segurança e durabilidade dos automóveis. Portanto a investigação à respeito do processo, seus insumos, máquinas, dentre outros fatores geram mais conhecimento e possibilidades de aplicações específicas com maior confiabilidade.

Este estudo visa gerar informações relevantes para uma aplicação utilizando-se a soldagem a ponto, esta foi recentemente desenvolvida para união de portas e capôs. Atualmente, para união o painel externo e interno de um capô ou portas laterais aplica-se cola estrutural, realiza-se a operação de grafagem, conhecida por hemming e posteriormente faz-se a cura da cola estrutural por um processo de indução magnética. O objetivo do estudo é dar informações iniciais para viabilizar a substituição do processo de cura por indução magnética por um processo de soldagem a ponto.

1.1 Objetivos

Estudar comparativamente as alterações dos parâmetros de soldagem (corrente de soldagem, do tempo, da força entre eletrodos e sentido da corrente elétrica) com relação ao parâmetro de referência adotado.

Estudar as características dimensionais, mecânicas e micro estruturais de juntas soldadas, a fim de identificar o conjunto de parâmetros mais adequado para a fabricação dos pontos de solda.

1.2 Formação do Ponto de Solda em Configuração de Três Camadas

Na formação do ponto de solda em casos de chapas similares em configuração de três camadas, conforme Figura (1), ocorre redução muito rápida da resistência de contato e as chapas revestidas se comportam como se fossem uma única peça. No início da formação do ponto há concentração de calor nas interfaces peça-peça, conseqüentemente o ponto de solda se posiciona no centro geométrico da espessura governante, vide Figura (3). Que está localizado na

chapa intermediária e expande para as chapas periféricas, apresentando-se de forma simétrica em estado final. (CHAOUCH e ROGEON, 2013)

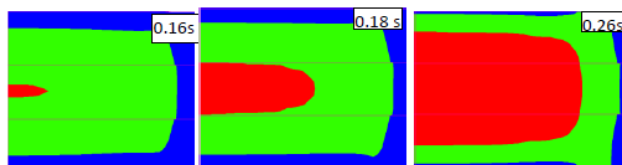


Figura 1 – Desenvolvimento do ponto de solda com três chapas similares: ESG 0.8/ ESG 0.8/ ESG 0.8 mm (CHAOUCH e ROGEON, 2013)

O desafio em soldar juntas com espessuras diferentes é o posicionamento da zona de fusão. Em casos de soldagem de chapas finas com chapas grossas, há tendência da não formação do ponto próximo à região da chapa fina, devido à proximidade do eletrodo refrigerado e a resistência, que é proporcional à espessura, é baixa. No caso de amostras de materiais dissimilares, vide Figura (2), posicionar a zona fundida é uma tarefa mais complexa. A combinação dos efeitos das espessuras e diferença de condutividade térmica impacta no atendimento dos requisitos mínimos de projeto. (CHAOUCH e ROGEON, 2013)

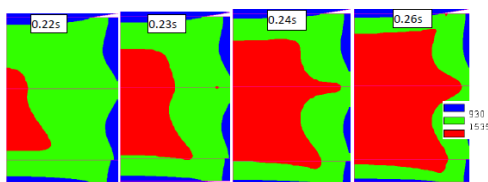


Figura 2 - Desenvolvimento do ponto de solda com três chapas dissimilares: ESG 0.8/DP6G 2.5/DP6G 2.5 mm, I = 11.2 kA (CHAOUCH e ROGEON, 2013)

1.3 Ponto Característico em Juntas de Três Camadas

As amostras que foram soldadas são de três camadas, de mesma espessura, material similar, sendo a terceira camada é proveniente de uma operação de grafagem. Neste caso, a formação do ponto de solda ocorre próxima ao centro geométrico do conjunto de chapas, conforme ilustrado na Figura (3). (ABAD e BISBE, 2009)

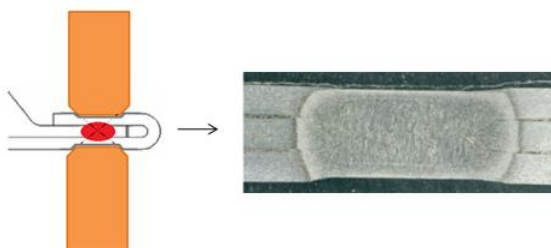


Figura 3 – Posicionamento da zona fundida na solda à ponto para amostra de três camadas, espessuras iguais e eletrodos com área de contato igual.

1.4 Localização do Ponto de Solda Alterada por Densidade da Corrente Elétrica

O posicionamento da zona fundida na solda à ponto é resultado da relação das espessuras da chapas e resistências elétricas. Ao se alterar o diâmetro de um eletrodo têm-se diferentes densidades de corrente elétrica atuando na junta soldada, onde há maior densidade de corrente há maior gradiente de calor, assim verifica-se que a zona termicamente afetada é deslocada, Figura (4). A Equação (1) descreve a densidade de corrente (J) é descrita pela corrente (I) atravessando um condutor com determinada área (A). (TARIMER, ARSLAN, *et al.*, 2011)

$$J = \frac{I}{A} \quad (1)$$

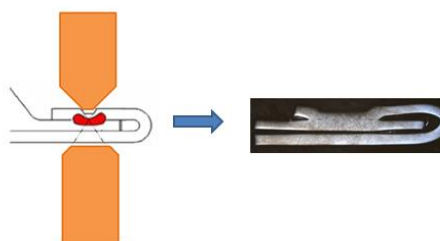


Figura 4 – Posicionamento do ponto de solda para amostra de três camadas, espessuras iguais e eletrodos com diferentes áreas de contato.

2. MODELAGEM DA ENERGIA TÉRMICA DE SOLDAGEM E EFEITO DOS PARÂMETROS

2.1 Energia Térmica de Soldagem

A energia de aquecimento gerada em um ponto de solda é relacionada com três fatores, onde a corrente é o fator principal. Esta é quantificada pelo fluxo de elétrons que atravessa um material num dado período. A energia térmica é descrita pela Equação (2). (TARIMER, ARSLAN, *et al.*, 2011)

$$Q = I^2 f(R)t \quad (2)$$

Onde o Q é a energia, I é a corrente, $f(R)$ é função da resistência e t é o tempo. Quando a corrente ou a resistência não é constante, integrando-a, esta resulta em uma quantidade de energia térmica em um intervalo de tempo t . O calor gerado não é uniforme na solda, a taxa de aquecimento é mais importante que o aquecimento total, portanto o gradiente de temperatura aplicado durante a soldagem determina a microestrutura. (ZHANG e SENKARA, 2006)

2.2 Efeito do Tempo de Soldagem

A taxa de geração de calor deve ser adequada, sem excessivo aquecimento, para não resultar em desgaste prematuro dos eletrodos. O calor é dissipado por condução na interface metal base e eletrodos, e uma pequena parte por radiação, as perdas aumentam proporcionalmente com o tempo de soldagem e a temperatura do metal. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007)

Um tempo mínimo é requerido para atingir a temperatura de fusão, quando se tem uma densidade de corrente adequada. Se a corrente é mantida por longo tempo, a temperatura na formação do ponto irá exceder muito a temperatura de fusão, gerando acréscimo da pressão interna e ocorre expulsão do material do ponto de solda. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007)

À medida que se reduz demasiadamente o tempo, incrementando proporcionalmente a corrente irá produzir uma condição de dissipação térmica na interface de contato causando uma severa expulsão, ou respingo. O calor deve ser adequado para que haja a formação do ponto de solda. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007)

2.3 Efeito da Força Aplicada Entre Eletrodos

A força entre eletrodos é um fator que determina a resistência elétrica de contato entre as chapas. Se a força for alta, se tem baixa resistência de contato, no caso inverso, aumenta-se a resistência de contato. Indiretamente afeta a quantidade de energia na amostra soldada. (SANTOS, 2006)

O ideal é que a força seja mantida constante durante todo o período de soldagem, entretanto ocorrem variações de força durante a soldagem devido ao fato do material coalescer. Ao mesmo tempo, se tem a força de expulsão agindo no sentido contrário. (SANTOS, 2006)

2.4 Efeito da Corrente Elétrica

A corrente elétrica é a variável crítica do processo, que determina a taxa de calor gerado na soldagem, uma vez que na Equação de Joule é a única variável elevada à segunda potência.

Tanto a corrente alternada quanto a corrente contínua podem ser utilizadas no processo de solda a ponto. A corrente contínua reduz as perdas no circuito secundário e é normalmente utilizada em aplicações que requerem alta intensidade de corrente. (BATISTA, 2011)

O tamanho do diâmetro do ponto de solda tem relação com a taxa de calor gerado por dissipação que ocorre nos eletrodos. Fixando os parâmetros de tempo e pressão, tem-se que o diâmetro da solda e sua resistência mecânica são

funções diretas da corrente de solda. Correntes baixas produzem zonas de fusão muito pequenas e soldas de baixa resistência mecânica, enquanto que corrente elevadas produzem aumento uniforme do diâmetro e da resistência até o ponto em que se inicia a expulsão de metal, pela qual se formam vazios internos e trincas na solda. (FINZETI, 2008)

A densidade de corrente pode ser alterada pela variação do diâmetro do eletrodo, o aumento da área projetada diminui a densidade de corrente e, conseqüentemente, o calor gerado. (BATISTA, 2011)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi o aço carbono de classificação DIN EN 10346, galvanizado por imersão a quente (Usiminas, 2013). Segue a Tabela (1) com a respectiva composição química.

Tabela 1 - Composição química do aço.

Especificação	C	Si	Mn	P	S	Ti
DIN EN 10346 / DX54D Z100	0,12	0,5	0,6	0,1	0,045	0,3

3.1 Corte dos Corpos de Prova

O aço é aplicado em partes móveis dos veículos (Figura 5) e se cortou um capô nas dimensões indicadas. Cada amostra cortada recebeu três pontos de solda, igualmente espaçados e posteriormente dividiu-se esta amostra em três novas amostras, com um ponto cada uma. O fato de soldar três pontos e depois dividir a peça em três amostras ocorreu devido à necessidade de se manter as partes do capô juntas e sem deslocamento durante o corte das amostras na preparação. O que seria inviável caso não houvesse o ponto de solda para manter fixas as partes unidas, vide Figura (5).

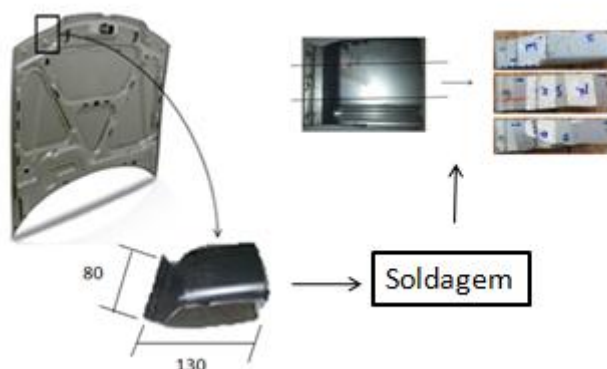


Figura 5 - Ilustração da origem das amostras, soldagem e corte da junta soldada. (TOLENTINO, SAHATDJIAN, *et al.*, 2013)

Para cada mudança de parâmetro de soldagem, as forças entre os eletrodos foram calibradas e monitoradas por um dinamômetro digital da Aids Development, com capacidade de até 1330 daN. Com o objetivo de registrar os parâmetros de soldagem durante o processo e garantir a adequação ao procedimento de soldagem previamente elaborado.

Foram utilizados eletrodos de classe 1, conforme norma RWMA, composição cobre – zircônio (0,15% Zr), endurecido por trabalho a frio, com dureza de 70 HB e condutividade elétrica de 90% IACS. Para as soldagens, foi utilizado o equipamento da marca During, em corrente contínua e média frequência 1000 – 1200 Hz.

Realizaram-se experimentos preliminares para escolha de parâmetros que atendam os requisitos de diâmetro mínimo, realizaram-se testes de arrancamento e visual cuja observação foi à ausência de indentação na face externa do capô.

Definiu-se o parâmetro recomendado para iniciar os experimentos (Força = 0,8 kN, Tempo = 45 ms e Corrente = 6,2 kA). Os demais parâmetros foram definidos alterando: força (parâmetro 2), tempo (parâmetro 3), corrente elétrica (parâmetro 4) e sentido da corrente elétrica (parâmetro 5). Cada grupo de parâmetros tem um fator alterado, baseado no parâmetro recomendado para iniciar os experimentos. (TOLENTINO, SAHATDJIAN, *et al.*, 2013)

Tabela 2 - Tabela de parâmetros de soldagem.

Parâmetro	Pontos de solda	Força [kN]	Tempo [ms]	Corrente [kA]	Sentido da corrente
1	1 a 11	0,8	45	6,2	+
2	12 a 17	1,4	45	6,2	+
3	18 a 23	0,8	90	6,2	+
4	24 a 29	0,8	45	7	+
5	30 a 35	0,8	45	6,2	-

O posicionamento e a execução dos pontos de solda no dispositivo de soldagem ocorreram de maneira manual e está representado nas Figuras 6 e 7 para as duas condições de sentido da corrente elétrica estudadas.

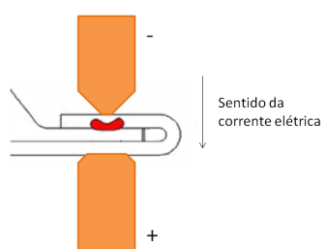


Figura 6 - Ilustração do processo de solda a ponto para a condição de sentido positivo da corrente elétrica (+). (Tolentino, et al. 2013)

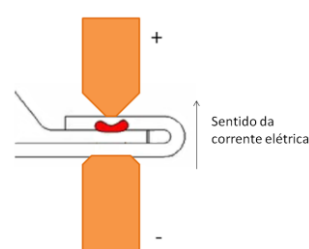


Figura 7 - Ilustração do processo de solda a ponto para a condição de sentido negativo da corrente elétrica (-). (Tolentino, et al. 2013)

3.2 Preparação do Corpo de Prova

O ensaio de micrografia foi realizado para verificação da presença de descontinuidades, tais como, falta de penetração, falta de fusão, contração de volume (rechupe), porosidade e visualizar a zona afetada pelo calor (ZAC). Além disso, objetivou-se caracterizar as microestruturas presentes na zona fundida e na zona afetada pelo calor dos pontos de solda.

Para isso as amostras foram cortadas, lixadas, polidas, e atacadas quimicamente para estudo via microscópio ótico.

Utilizou-se Nital 2% como reagente para a revelação da microestrutura e microscópio ótico modelo BX-51 da marca Olympus com câmera fotográfica acoplada. (BRAMFITT e LAWRENCE, 2004)

3.3 Ensaio de Resistência à Tração

As amostras foram desdobradas manualmente e fixadas nas garras da máquina de tração, vide Figura (8). O ensaio de cisalhamento ocorreu por meio da máquina Kratos, modelo K500/2000, com taxa de deformação de 5 mm/min até o ponto de ruptura total dos pontos de solda.



Figura 8 - Ensaio de cisalhamento executado nas juntas soldadas.

A Figura (9) mostra como determinar o diâmetro do ponto (d_p), onde é obtido com a medição de duas medidas perpendiculares entre si, obtida por meio do cálculo da média entre os valores. Esta medição é realizada após a execução do ensaio de resistência à tração, do diâmetro resultante do tracionamento da amostra, que é o material fundido proveniente da operação de solda. Este parâmetro é um indicador de qualidade da solda, usado em ambientes fabris como critério de aceitação do ponto de solda.

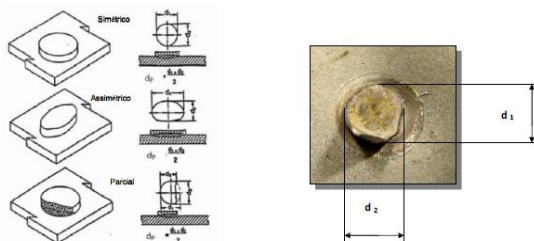


Figura 9 – Ilustração dos modos de falha e medição do diâmetro do ponto após rompimento da amostra no ensaio de tração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação Visual

O aspecto visual das amostras é importante para a aceitação do ponto produzido em fase produtiva, sendo assim primordial neste caso específico que não se encontrem marcas do eletrodo impressas na face externa das amostras. O processo foi desenvolvido com este objetivo e garantir o acabamento final após a soldagem.

Nas Figuras (10) e (11) visualizam-se os acabamentos na face externa da junta, portanto as faces foram lixadas de maneira leve, somente com o objetivo de ter uma superfície melhor perceber-se qualquer mínima marca impressa. As amostras dos parâmetros 1 e 2 atendem a condição do requisito visual.



Figura 10 – Aspecto visual da parte externa da junta com a utilização do parâmetro 1 $F = 0,8$ kN; $t = 45$ ms; $I = 6,2$ kA; sentido corrente(+)).



Figura 11 – Aspecto visual da parte externa da junta com a utilização do parâmetro 2 ($F = 1,4$ kN; $t = 45$ ms; $I = 6,2$ kA; sentido corrente(+)).

Observam-se que as amostras soldadas nas condições delimitadas pelo parâmetro 3, vide Figura (12), não atendem ao quesito visual. E ao lado, vide Figura (13), apresenta-se uma das amostras realizadas com as configurações do parâmetro 4 e não se visualiza imperfeições na superfície.



Figura 12 - Aspecto visual da parte externa da junta com a utilização do parâmetro 3 ($F = 0,8$ kN; $t = 90$ ms; $I = 6,2$ kA; sentido corrente(+)).



Figura 13 - Aspecto visual da parte externa da junta com a utilização do parâmetro 4 ($F = 0,8$ kN; $t = 45$ ms; $I = 7$ kA; sentido corrente (+)).

A configuração do parâmetro 5 gerou amostras na qual o aspecto visual foi satisfatório, não se encontram marcas de impressão do eletrodo na face externa da amostra, conforme Figura (14).



Figura 14 - Aspecto visual da parte externa da junta com a utilização do parâmetro 5 ($F = 0,8$ kN; $t = 45$ ms; $I = 6,2$ kA; sentido corrente(-)).

4.2 Ensaio de Micrografia

As amostras soldadas têm três regiões conhecidas, dentre elas são:

1. Metal Base: Região não afetada termicamente, características do material as mesmas antes e depois da soldagem. Constituído de ferrita predominantemente e carbeto em pequenas quantidades nas regiões de contorno de grão.
2. Zona Afetada pelo Calor: Região que não derreteu durante o processo, mas sofreu alterações micro estruturais devido ao gradiente de temperaturas.
3. Zona fundida: Área que foi derretida durante o processo de soldagem. Constituída de ferrita proeutetóide e ferrita Widmanstatten.

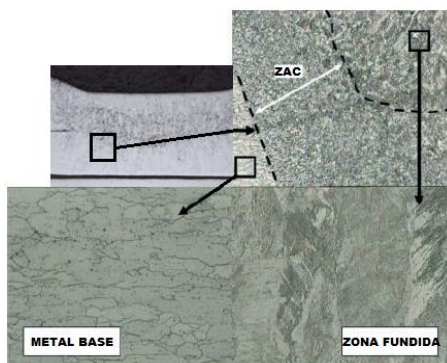


Figura 15 – Zonas micro estruturais características das soldagens executadas.

4.3 Influência da Força Entre Eletrodos

Na Tabela (3) apresentam-se os dados comparando os parâmetros 1 e 2, nas Figuras (16) e (17) visualizam-se as relações entre os resultados obtidos, onde se alterou a força entre eletrodos (de 0,8 para 1,4 kN).

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação. (alterar exibição dos resultados)

Ensaio	Tração [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1176,3 ≤ 1216,7 ≤ 1257,1	2,79 ≤ 3,19 ≤ 3,59	0,42 ≤ 0,50 ≤ 0,57
Parâmetro 2	818,2 ≤ 1173,3 ≤ 1528,5	1,91 ≤ 2,84 ≤ 3,78	0,31 ≤ 0,43 ≤ 0,54

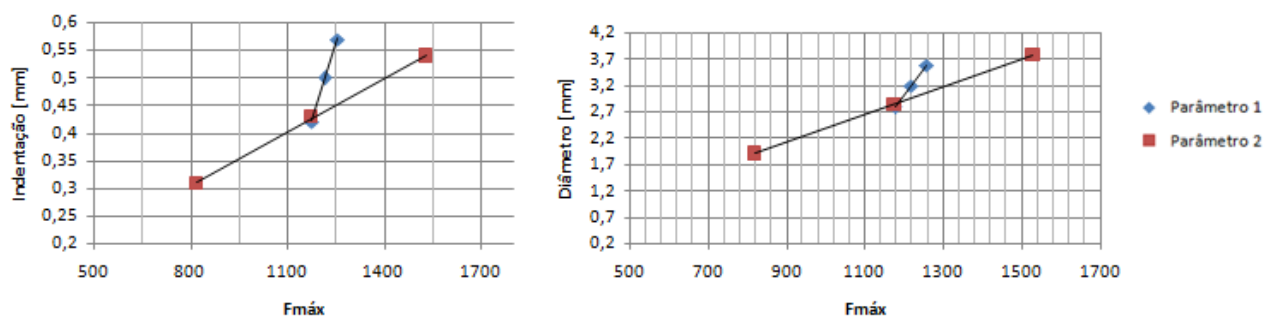


Figura 16 – Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Força Máxima de Resistência à Tração e Diâmetro versus Força Máxima de Resistência à Tração.

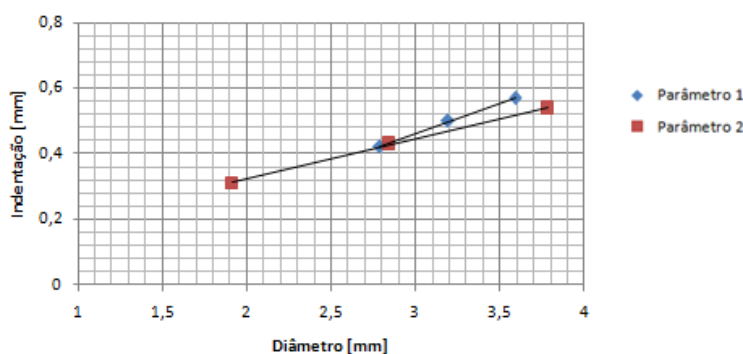


Figura 17 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Diâmetro do ponto.

Os valores de resistência à tração, indentação e o diâmetro tem relação direta e proporcional. Porém se visualiza que a amplitude de valores da configuração do parâmetro 2 são superiores a do parâmetro 1. O fato da indentação se apresentar menor nas soldagens realizadas na configuração do parâmetro 2, se evidencia que houve menor aporte térmico, menor energia na soldagem. Mas verifica-se que a amplitude dos valores encontrados tem causas específicas, como a possibilidade da geometria da amostra não ser muito uniforme, pois é obtida por meio de um processo de conformação, sujeito à variações dimensionais.

A configuração do parâmetro 2 devido à menor energia empregada, apresenta comportamento não esperado quanto à variação de seus parâmetros. Pois na proporção medida que se aumenta a força entre os eletrodos proporcionalmente incrementa-se a área de contato. E se considerando a 2ª lei do Ohm, vide equação (3), resulta em menor resistência de contato.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3)$$

Portanto para áreas maiores ($\uparrow A$), o resultado é menores resistências de contato ($\downarrow R$). E assim, analisando a equação (2), verifica-se menor quantidade de energia na soldagem. O que resultaria em um menor ponto de solda, menor força de resistência à tração e menor indentação.

4.4 Influência do Tempo

A relação entre parâmetros 1 e 3, conforme Tabela (4), Figuras (18) e (19) visualizam-se as relações entre os resultados obtidos, onde se alterou o fator tempo (de 45 segundos para 90 segundos).

Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação.

Ensaio	Tração [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	$1193,3 \leq 1216,7 \leq 1240$	$2,79 \leq 3,19 \leq 3,59$	$0,42 \leq 0,50 \leq 0,57$
Parâmetro 3	$1197,4 \leq 1378,3 \leq 1559,2$	$3,38 \leq 4,34 \leq 5,30$	$0,71 \leq 0,77 \leq 0,83$

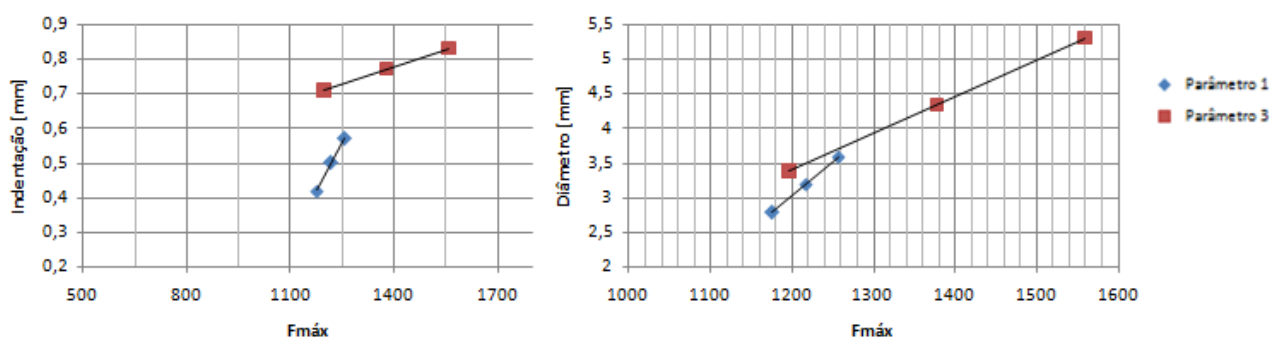


Figura 18 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Força Máxima de Resistência à Tração e Diâmetro versus Força Máxima de Resistência à Tração.

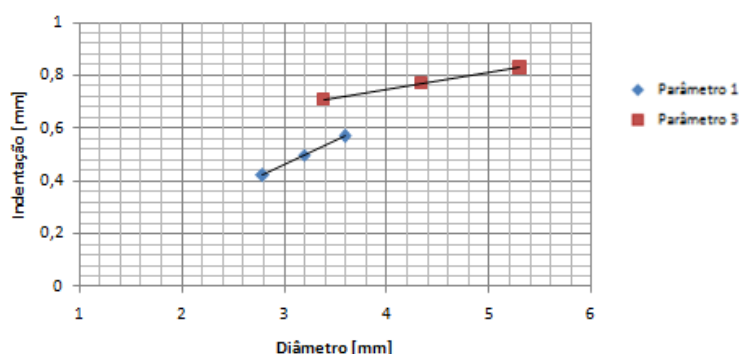


Figura 19 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Diâmetro do ponto.

Visualiza-se que a força de resistência à tração, diâmetro do ponto e indentação foram superiores em grande parte das amostras da configuração do parâmetro 3. Os resultados apresentados mostram que há maior quantidade de energia nas soldagens da configuração do parâmetro 3, devido ao tempo ser superior, como pode-se concluir ao analisar usando a equação (2).

4.5 Influência da Corrente Elétrica

A partir dos resultados apresentados na Tabela (5), Figuras (20) e (21) visualizam-se as relações entre os resultados obtidos, onde se alterou a corrente elétrica (de 6,2 kA para 7 kA).

Tabela 5 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação.

Ensaio	Tração [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	$1193,3 \leq 1216,7 \leq 1240$	$2,79 \leq 3,19 \leq 3,59$	$0,42 \leq 0,50 \leq 0,57$
Parâmetro 4	$1109,9 \leq 1371,7 \leq 1633,4$	$2,83 \leq 3,41 \leq 4,43$	$0,48 \leq 0,66 \leq 0,83$

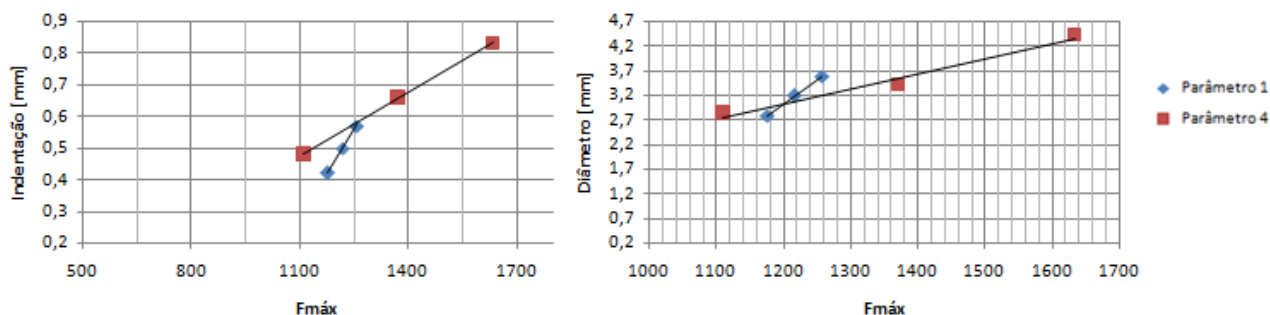


Figura 20 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Força Máxima de Resistência à Tração e Diâmetro versus Força Máxima de Resistência à Tração.

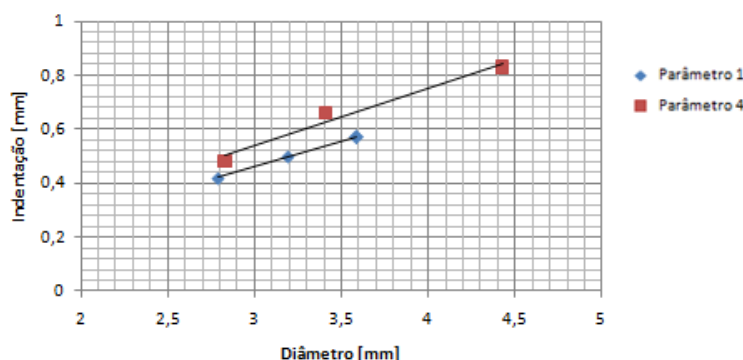


Figura 21 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Diâmetro do ponto.

Apresentam-se maiores amplitudes nos valores para a configuração do parâmetro 4, se verifica que a força de resistência à tração tende a ser superior, assim como o diâmetro e a indentação. Porém os diâmetros mínimos encontrados são muito próximos ao do parâmetro 1, esperava-se que o diâmetro mínimo encontrado utilizando-se a configuração do parâmetro 4 apresentasse valores superiores.

O fato da corrente elétrica estar aumentada resulta em maior energia aplicada na soldagem, conforme equação (2). E a amplitude dos resultados pode ser atribuída à falta de uniformidade das peças quanto ao seu aspecto dimensional (após grafagem).

4.6 Influência da Inversão do Sentido da Corrente Elétrica

Os resultados apresentados na Tabela (6), nas Figuras (22) e (23) visualizam-se as relações entre os resultados obtidos, onde se alterou o sentido da corrente elétrica.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação.

Ensaio	Tração [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1193,3 ≤ 1216,7 ≤ 1240	2,79 ≤ 3,19 ≤ 3,59	0,42 ≤ 0,50 ≤ 0,57
Parâmetro 5	749,6 ≤ 795 ≤ 840,4	2,36 ≤ 3,25 ≤ 4,14	0,39 ≤ 0,51 ≤ 0,62

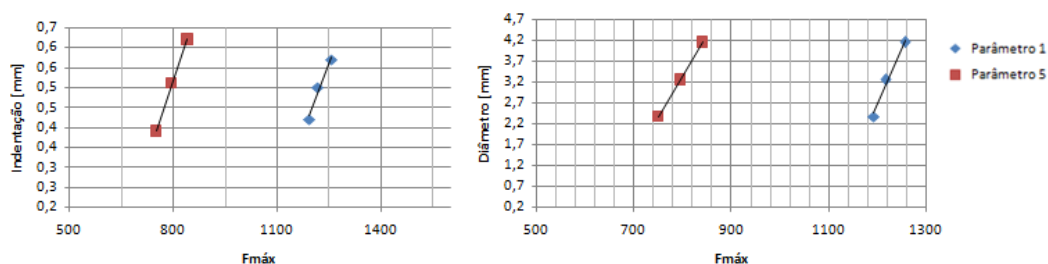


Figura 22 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Força Máxima de Resistência à Tração e Diâmetro versus Força Máxima de Resistência à Tração.

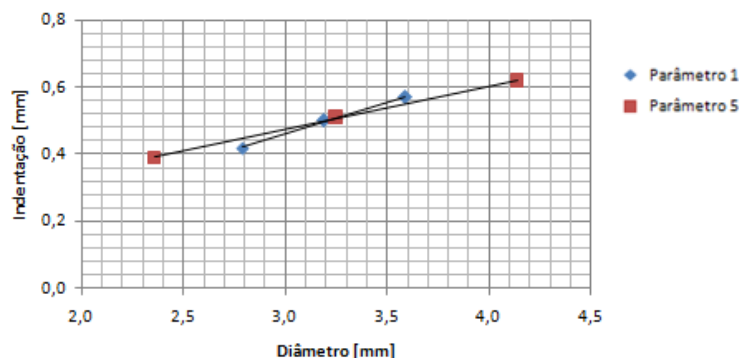


Figura 23 - Comportamento das variáveis medidas, Indentação versus Diâmetro do ponto.

Os valores obtidos de força de resistência à tração são superiores para as amostras do parâmetro 1. Com relação aos valores de diâmetro do ponto e da indentação, a configuração do parâmetro 5 contém dados mais dispersos, com amplitude maior que os da configuração do parâmetro 1.

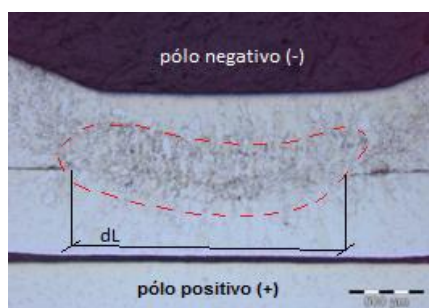


Figura 24 – Micrografia do Ponto feito com a utilização do parâmetro 1 ($F = 0,8 \text{ kN}$; $t = 45 \text{ ms}$; $I = 6,2 \text{ kA}$; sentido corrente(+)).

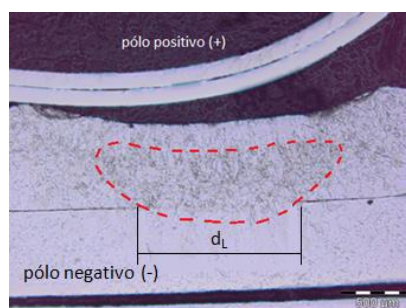


Figura 25 – Micrografia do ponto feito com a utilização do parâmetro 5 ($F = 0,8 \text{ kN}$; $t = 45 \text{ ms}$; $I = 6,2 \text{ kA}$; sentido corrente(-)).

Comparando-se as Figuras (24) e (25), se verifica que há diferença na interface soldada entre as duas chapas, o que se denomina diâmetro do ponto (d_L). A configuração do parâmetro 1 (Figura 24) apresenta maior diâmetro do ponto (d_L), para o sentido da corrente elétrica adotado como positivo. E se observa que o diâmetro do ponto (d_L) é menor para o sentido negativo (Figura 25), porque a maior parte da zona fundida está posicionada na chapa superior da amostra. Este material que está posicionado de maneira assimétrica na amostra do parâmetro 5, ao ser rompimento durante o ensaio de resistência à tração, ficará aderido no ponto estourado (Figura 26). Concluindo que ao se medir o diâmetro após o estouro da amostra, o valor tende a ser maior.

A configuração do parâmetro 5 apresentou grande amplitude com relação à indentação comparando-se com a configuração do parâmetro 1. A variação deste fator pode se atribuir à variações dimensionais resultantes do processo produtivo.

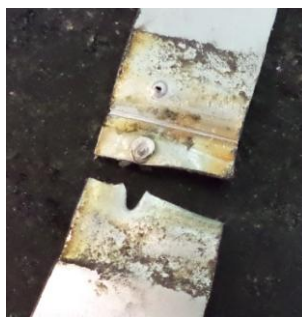


Figura 26 – Amostra após Ensaio de tração, amostra soldada na configuração do parâmetro 5.

5. CONCLUSÕES

A partir dos materiais, processos, parâmetros empregados e das técnicas experimentais adotadas neste estudo, foi possível concluir que:

1. O requisito visual cujo objetivo é de não apresentar marcas impressas do eletrodo na face externa das amostras, somente a configuração do parâmetro 3 não atendeu ao requisito.
2. Verificou-se que o aumento da força entre eletrodos, de 0,8 kN para 1,4 kN, não se resultou em decréscimo da resistência mecânica, diâmetro do ponto e da indentação. Os valores encontrados utilizando-se 0,8 kN, obtiveram amplitudes maiores.
3. O aumento do tempo de soldagem, de 45ms para 90ms, foi assertivo quanto à garantia de maior resistência mecânica, diâmetro do ponto e da indentação.
4. O aumento da corrente de soldagem, de 6,2kA para 7,0kA, observa-se que os valores encontrados tendem a ser superiores para a força de resistência à tração, diâmetro do ponto e da indentação. Valores têm maior amplitude e nos limites mínimos intersecciona os valores encontrados na soldagem para a configuração do parâmetro 1.
5. Para a condição de inversão do sentido da corrente elétrica, as amostras soldadas no sentido adotado como negativo, resultou em força de resistência à tração é inferior que encontrada no sentido positivo da corrente elétrica.
6. A mudança de sentido da corrente elétrica de positiva para negativa gerou um deslocamento da massa fundida, e visualizou-se que foi na direção à chapa superior da amostra, na região indentada. Resultou em alterações do diâmetro do ponto após a realização do ensaio de resistência à tração, estes tendem a ser maiores para a condição do sentido negativo da corrente elétrica.
7. As variações dimensionais das amostras influenciaram significativamente nos resultados medidos. Pode-se visualizar que as amplitudes dos valores obtidos para os parâmetros têm variações grandes. E há parâmetros que tendem a ter um determinado comportamento, porém devido à grandes variações dos valores encontrados se aproximaram aos valores encontrados para a configuração do parâmetro 1 (parâmetro de referência).

6. REFERÊNCIA

- ABAD, F.; BISBE, J. M. “Manual de soldadura”. Valladolid: Junta de Castilla y León, 2009. 565 p.
- AWS. Welding Handbook. 9. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2007.
- BATISTA, M. “Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência”. São Paulo. 2011.
- BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. “Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels”, In: INTERNATIONAL, A. Metallography and Microstructures. [S.l.]: ASM Handbook, v. 9, 2004. p. 608-626.
- CHAOUCH, K. T.; ROGEON, P. “Development of weld nugget in dissymmetric assemblies”, Bordeaux. 2013.
- FINZETI, A. R. “Solda a ponto por resistência”, São José dos Campos, 2008. 239.
- RUIZ, D. C.; BATALHA, G. F. “Estudo de um critério de modo de falha para a solda a ponto por resistência”, Joinville. 2005.
- SANTOS, F. B. “Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica utilizado na Indústria Automobilística”, Niterói. 2006.
- TARIMER, I. et al. “A case study of a new spot welding which has the best current density by magnetic analysis solution”, Journal of Electrical Engineering, 62, 2011. 233-238.
- TOLENTINO, L. H. S. et al. “Influência dos parâmetros na soldagem a ponto com efeito Peltier em juntas de três camadas”, São Caetano do Sul: Instituto m, 2013.
- ZHANG, H.; SENKARA, J. “Resistance Welding”, [S.l.]: Taylor & Franics Group, 2006.

7. DIREITOS AUTORAIS

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso no trabalho.