

ANÁLISE INICIAL DA SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA PARA CARACTERIZAR O DEFEITO POR INDENTAMENTO E ELETRODOS DESALINHADOS – PARTE 1.

Fábio Rodrigues da Silva (fabio.silva@mpsa.com)

José Rubens de Camargo (jcamargo@unitau.br)

UNITAU, Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli s/n, Jardim Morumbi, 12060-440, Taubaté/SP

Resumo. A altíssima competitividade do mercado automobilístico, cria nestas organizações uma busca incansável de reduções de custos aliados ao aumento dos índices de qualidade. O processo de soldagem a ponto por resistência é muito empregado na indústria automobilística, por possuir alta produtividade e qualidade. A indústria automobilística busca atualmente a garantia da qualidade dos pontos de solda por meio de ensaios não-destrutivos (END), motivados pelas reduções de custos e pela manutenção da produtividade. O que está sendo utilizado na atualidade é a “Qualificação do Processo” por meio do monitoramento da formação da lentilha de solda. O objetivo desta pesquisa é demonstrar uma abordagem sobre a prática no controle de qualidade na montadora, para a análise da solda a ponto. O foco será em 2 problemas oriundos do processo de soldagem: indentamento e desalinhamento de eletrodos. Os parâmetros de máquina de soldagem, como corrente e tensão de solda, foram monitorados e garantidos 100% em toda a fase experimental. Esta pesquisa irá demonstrar os problemas da qualidade do ponto de solda, baseado no teste de arrancamento e metalografia. A fase experimental desta pesquisa foi realizada por meio de 10 corpos de prova. Com os resultados obtidos pode-se concluir que o critério de arrancamento para a solda a ponto atende a um requisito laboratorial, com uma avaliação pontual se a solda rompeu na lentilha ou na chapa; e que para a análise metalográfica, há que definir critérios mais detalhada, com um estudo da morfologia da solda e sua periferia por estereoscopia. O controle visual deve ser melhor embasado na avaliação do controle da qualidade da solda, pois o controle visual além de ser pouco difundido, existe a dificuldade em viabilizar um método robusto de controle ou autocontrole, pois depende da formação de profissionais para esse fim e de programas estruturados de qualificação e de requalificação periódica.

Palavras-chave: Soldagem a Ponto, Qualidade superficial, Custos, Qualificação do Processo

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto por resistência (RSW – *Resistance Spot Welding*) é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria automobilística. A solda a ponto é um processo para soldar chapas finas, de alta confiabilidade, muito rápido de ser executado, sem adição de metal e não necessita alto grau de experiência do operador. Diferentes pesquisadores (KAISER, DUNN, EAGAR, 1982; CHO, RHEE, 2003) têm focado no monitoramento da formação da lentilha de solda sob diferentes condições, parâmetros e materiais, visando um entendimento do sentido físico da resistência dinâmica e do mecanismo de formação da lentilha.

2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO

No processo de soldagem a ponto por resistência (RSW), um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, através do material base, que este material base produz calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região seja fundida, e que recebe o nome de *lente de solda* (METALS HANDBOOK, 1983). Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na Fig. (1).

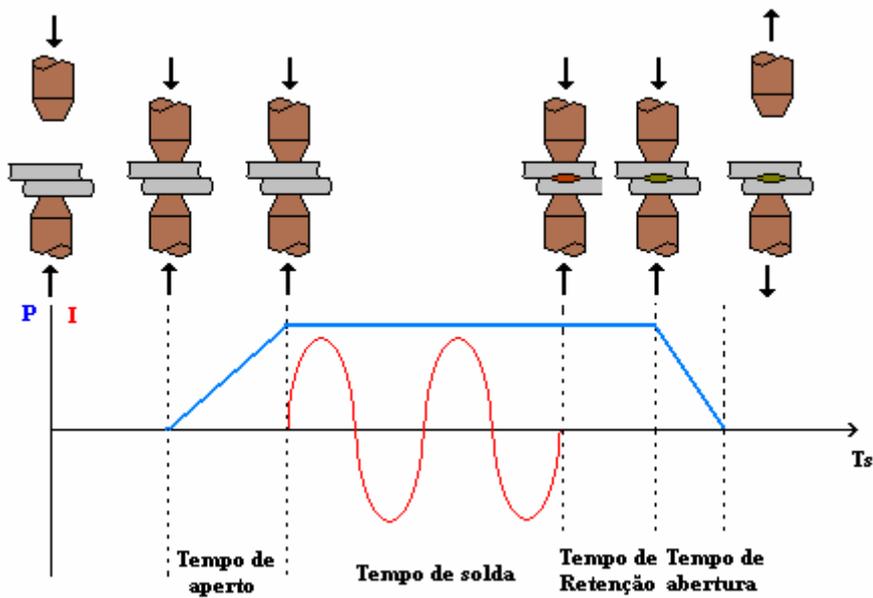


Figura 1. Ciclo de solda (BRANCO, 2004 - modificado).

Existe uma diversidade de formas de realizar pontos de solda: solda a ponto simples, solda múltipla, solda em série, solda em paralelo e soldas indiretas. Um corte transversal de uma típica solda a ponto é mostrado na Fig. (2).

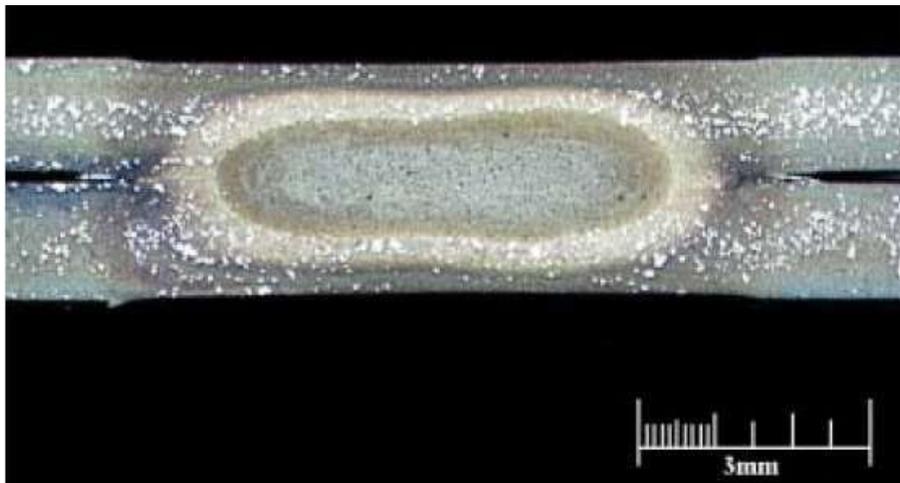


Figura 2. Corte transversal de uma junta de solda a ponto por resistência (TWI, 2005).

Os eletrodos são de cobre por ser um bom condutor elétrico e térmico, e possui 4 características geométricas : a face, o corpo, a conexão e a cavidade para refrigeração, conforme Fig. (3).

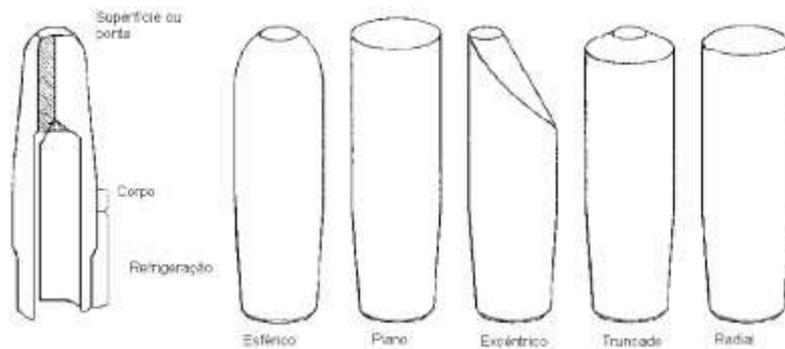


Figura 3. Tipos de eletrodos utilizados em soldagem a ponto (METALS HANDBOOK, 1983 - modificado).

A distância do final do furo de refrigeração à face do eletrodo é denominada “espessura da face”, para um dado nível de extração de calor devido ao líquido de refrigeração, corrente e ciclos de soldagem, demonstrado na Fig. (4).

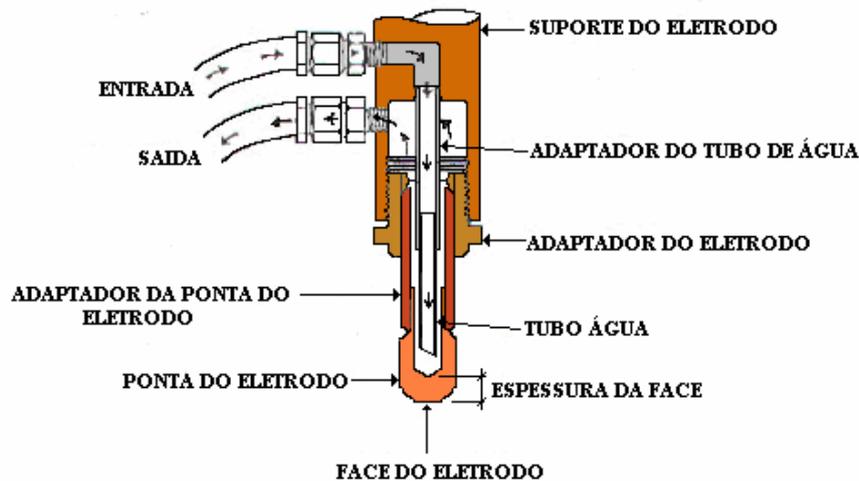


Figura 4. Sistema de refrigeração do eletrodo (INTERMACHINERY, 2002 - modificado).

Em um condutor elétrico, a quantidade de calor gerado depende de três fatores : corrente elétrica; resistência do condutor (incluindo resistência da interface) e duração da corrente. Estes três fatores afetam o calor gerado ou energia como expressa na equação:

$$E = I^2 R t , \text{ onde :}$$

E = calor gerado [J]

I = corrente em [A]

R = resistência do material [Ohms]

t = tempo de duração da corrente [s].

Parte do calor gerado é utilizada para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo (METALS HANDBOOK, 1983). Em soldagem a ponto por resistência existem três parâmetros principais : corrente de soldagem; força do eletrodo e tempo de soldagem em ciclo de soldagem (AWS, 1998).

3. PROBLEMAS DE QUALIDADE NA SOLDAGEM A PONTO

3.1. Indentamento

Ocorre quando a resistência compressiva do material diminui à medida que a fusão avança, permitindo que a face do eletrodo se movimente para dentro da superfície da peça de trabalho, conforme Fig. (5). Além de prejudicar o aspecto da superfície da peça de trabalho, a indentação excessiva pode diminuir a resistência mecânica da solda (WU, 1968).

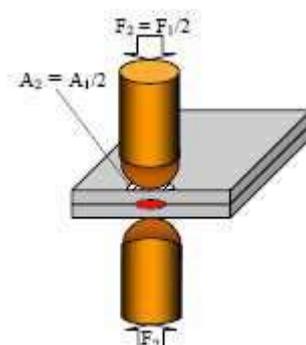


Figura 5. Esquema do defeito de Indentação (RWMA 1989, modificado).

3.2. Desalinhamento do Eletrodo

Idealmente, os eletrodos devem ser alinhados durante a soldagem visto que um desalinhamento induz uma característica desfavorável do processo e qualidade da solda. O desalinhamento, seja axial ou angular, pode causar formas irregulares e medidas reduzidas do ponto de solda resultado de assimétricas distribuições da aplicação da força do eletrodo e da passagem de corrente (TANG *et al.*, 2003). Karagoulis (1994) afirma que com um desalinhamento de 40% do eixo dos eletrodos a área de contato diminui aproximadamente 50% da área total da face do eletrodo, conforme Fig. (6).

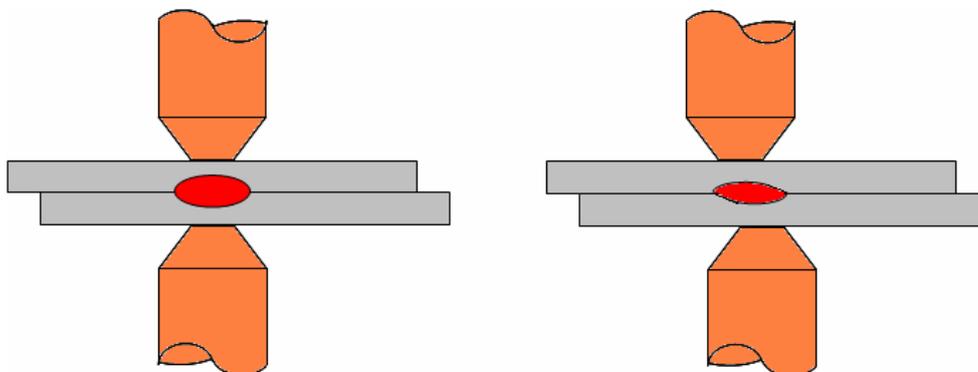


Figura 6. Esquema do defeito com Eletrodos desalinhados (RWMA, 1989 - modificado).

3.3. Parâmetros de Qualidade do Ponto de Solda

A resistência de uma junta por solda a ponto é geralmente relacionada às características físicas: medida do ponto de solda, da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), indentamento e propriedades do material. De qualquer forma, as medidas do ponto de solda têm sido extensivamente relacionadas com resistência da junta (ZHOU, ZHANG, HU, 2003). Existe uma diversidade de medidas recomendadas, usualmente a medida ótima do ponto de solda mais utilizada é considerar o diâmetro do ponto como $D = 5e$, sendo e = espessura da chapa.

A mínima profundidade (indentamento) é geralmente aceita como 20% da espessura da chapa mais fina. Se for menor que este valor, a solda é dita de “fria” por motivo do calor gerado na zona de solda ser muito baixo. Zhou, Zhang e Hu (2003), no seu trabalho de simulação computacional encontrou que a medida da ZAC tem um papel importante na análise da resistência da solda devido a altas concentrações de tensões dentro e ao redor da ZAC.

3.4. Inspeção Visual para Avaliação da Qualidade do Ponto de Solda

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plana e livre de fusão superficial, indentamento profundo dos eletrodos, trincas, descoloração ao redor da solda.

As empresas buscam atualmente a garantia da qualidade dos pontos de solda por meio de ensaios não-destrutivos (END), motivados pela redução de custos e minimização das paradas de máquinas.

Raios infravermelhos e emissões acústicas são técnicas que podem ser utilizadas, mas são muito caras e muito demoradas.

O que está sendo utilizado na atualidade é a “Qualificação do Processo”, isso quer dizer um monitoramento de parâmetros tais como: corrente e tensão de solda, tempo de solda e força do eletrodo, além do monitoramento do crescimento e da formação da lentilha de solda.

4. PROPOSIÇÃO

Esta pesquisa tem como objetivo demonstrar os 2 problemas de qualidade superficial em pontos de solda, oriundos de variações no processo, e suas respectivas conseqüências para a resistência dos pontos de solda, para o segmento automobilístico.

O foco será nos problemas de indentamento e desalinhamento de eletrodos, baseado nos ensaios mecânicos (arrancamento) e metalográficos (corte transversal da lentilha de solda).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

5.1.1. Corpos de prova - chapas de aço

As chapas utilizadas nesta pesquisa foram de aço galvanizado, específicas para construção automobilística, com dimensões de 50 mm x 100 mm, espessura de 0,7 mm e revestimento galvanizado de 10 µm. As chapas foram cortadas nas dimensões, foram retiradas as rebarbas e as superfícies foram lavadas com sabão para o desengraxe, e secas com soprador térmico.

5.1.2. Máquina de soldagem à ponto

As soldagens dos 10 corpos de prova foram executadas na fábrica da PSA Peugeot Citroen - unidade PMVB (Produção Mecânica e Veículos Brasil) em Porto Real/RJ. Foi utilizado um equipamento na própria linha de armação de carrocerias (bodyshop).

A máquina utilizada é uma pinça de fabricação especial, para trabalho suspenso por manipulador, fornecedor ARO, modelo V085821000F, com as seguintes características:

- Transformador : 48 KVA - 50% / 6.3 V - 5.400 A
- Pressão de solda máx. : 450 daN / 5.1 bar
- Corrente mínima de curto-circuito : 22.000 A
- Comando eletrônico dos intervalos de tempo, potência e corrente;

O fornecimento de utilidades foram os mesmos utilizados na planta para todos os processos:

- Água de refrigeração;
- Ar comprimido a 12 bar.

5.1.3. Máquina de ensaio de arrancamento

Os ensaios de “arrancamento” nos 8 corpos de prova foram executados no laboratório da fábrica da PSA Peugeot Citroen. Foi utilizado um equipamento do departamento LMM. Os ensaios de “arrancamento” foram realizados em máquina de tração modelo Zwick Z0101, adaptado com garras pneumáticas. Foi utilizado também 2 cilindros de aço idênticos, para servir de espaçadores entre as chapas quando fixados pelas garras pneumáticas, conforme Fig. (7).



Figura 7. Máquina de ensaio de arrancamento Zwick Z0101 com garras pneumáticas.

5.1.4. Preparação dos corpos de prova de metalografia

A preparação dos 2 corpos de prova para metalografia foram executados também no laboratório da fábrica da PSA Peugeot Citroen. Foram utilizados equipamentos e materiais do departamento LMM, como: arco de serra, disco de lixas (180, 220, 360, 400 mesh), pano de polimento para diamante 3 e 1 μm , pano de polimento para alumina, baquelite, solução de Nital 3% e álcool isopropílico 97%. Para as análises metalográficas da lentilha do ponto de solda, foram utilizados os equipamentos: máquina de lixamento e polimento rotativo.

5.1.5. Microscópio

As análises metalográficas da lentilha do ponto de solda foram realizadas em microscópio, modelo Olimpus BX80 - resolução de 12,5X, 100X e 200X.

5.2. Método

5.2.1. Denominação dos corpos de prova

Os corpos de prova selecionados são de aço galvanizado com espessura de 0,7mm, conforme apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Denominação dos Corpos de Prova

DEFEITO	ENSAIO	MATERIAL (blank 50 x 100 mm)		CP
		chapa #1	chapa #2	
Indentamento	Arrancamento	aço galvanizado e = 0,7 mm	aço galvanizado e = 0,7 mm	1.1
				1.2
				1.3
				1.4
	Metalográfico			1.5
Desalinhamento de Eletrodos	Arrancamento	aço galvanizado e = 0,7 mm	aço galvanizado e = 0,7 mm	2.1
				2.2
				2.3
				2.4
	Metalográfico			2.5

5.2.2. Preparação da máquina de solda

As soldagens foram executadas com o mesmo fornecimento de utilidades e set-up preparado pela equipe da armação de carrocerias da fábrica da PSA Peugeot Citroen. As modificações realizadas para a soldagem dos 10 Corpos de Prova se limitam à introdução de 2 programas no comando da pinça, sendo P1 e P2, conforme Tab. (2).

Tabela 2. Programas de Comando da pinça de soldagem

PROGRAMA	I_{solda} (KA)	t_{solda} (ciclos)	Impulso (unidade)	Força (daN)	Energia (J)
P1	11,2	12	1	230	250
P2	12	16	1	210	233

5.2.3. Preparação do processo com defeito de indentamento

Com a pinça de solda conforme set-up de fábrica, foi utilizado o “programa P2” (Tabela 2) para realização de 1 (um) ponto de solda em cada corpo de prova sucessivamente. Um corpo de prova, constituído de 2 (dois) blanks de chapas de mesma espessura.

A solda foi realizada por profissional habilitado e todos os parâmetros foram monitorados.

5.2.4. Preparação do processo com defeito de desalinhamento de eletrodos

Com a pinça de solda com o set-up de fábrica modificado, desalinhando os eletrodos em ~10 mm, foi utilizado o “programa P1” (Tabela 2) para realização de 1 (um) ponto de solda em cada corpo de prova sucessivamente. Um corpo de prova, constituído de 2 (dois) blanks de chapas de mesma espessura. A solda foi realizada por profissional habilitado e todos os parâmetros foram monitorados.

5.2.5. Ensaio mecânico de arrancamento

O ensaio de “arrancamento” é realizado através da fixação das 2 chapas pelas garras pneumáticas, utilizando 2 espaçadores, conforme Fig. (7). O resultado “OK” é dado quando há o rompimento da chapa em qualquer região, e o resultado “NOK” é dado quando há o rompimento no ponto de solda. A carga aplicada até o rompimento é registrada, porém desprezada nesta pesquisa.

5.2.6. Ensaio metalográfico do corte transversal da lentilha de solda

As análises metalográficas foram realizadas na amostra, contendo os corpos de prova cortados transversalmente. A amostra embutida no baquelite foi lixada, polida e atacada no Nital 3% por 1 minuto, e após lavados com álcool isopropílico 97%. A revelação da lentilha do ponto de solda se faz nítida após esta preparação, conforme Fig. (8).



Figura 8. Embutimento dos corpos de prova metalográficos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado desta pesquisa é embasado pelos ensaios de laboratório, conforme relatórios emitidos pelo LMM da PSA Peugeot Citroen, órgão certificado ISO9001 e ISO14001. A Tab. (3) sintetiza os resultados obtidos nos relatórios, de forma a auxiliar na conclusão:

Tabela 3. Síntese dos resultados embasados nos ensaios de laboratório.

DEFEITO	ENSAIO	MATERIAL (chapas 50 x 100 mm)		CP	RESULTADO	OBSERVAÇÃO
		chapa #1	chapa #2			
Indentamento	Arrancamento	aço galvanizado e = 0,7 mm	aço galvanizado e = 0,7 mm	1.1	NOK	Todos os CP's obtiveram o rompimento no ponto de solda. Observa-se falta da fusão nas extremidades e descontinuidade em uma das extremidades.
				1.2		
	1.3					
	Metalográfico			1.4		
				1.5		
Desalinhamento de Eletrodos	Arrancamento	aço galvanizado e = 0,7 mm	aço galvanizado e = 0,7 mm	2.1	NOK	Todos os CP's obtiveram o rompimento no ponto de solda. Observa-se falta da fusão nas extremidades e descontinuidade em uma das extremidades.
				2.2		
	2.3					
	2.4					
	2.5					
	Metalográfico					

6.1. Resultados dos Ensaios de Arrancamento

Nos corpos de prova de **indentamento** foram obtidos 4 sobre 4 resultados NOK, Fig. (9):



Figura 9. Corpos de prova de INDENTAMENTO após os ensaios de arrancamento

Nos corpos de prova de **eletrodos desalinhados** foram obtidos 4 sobre 4 resultados NOK, Fig. (10):



Figura 10. Corpos de prova de ELETRODOS DESALINHADOS após ensaios de arrancamento.

6.2. Resultados dos Ensaio de Metalografia

No corpo de prova de **Indentamento** a análise é NOK, conforme Fig. (11):

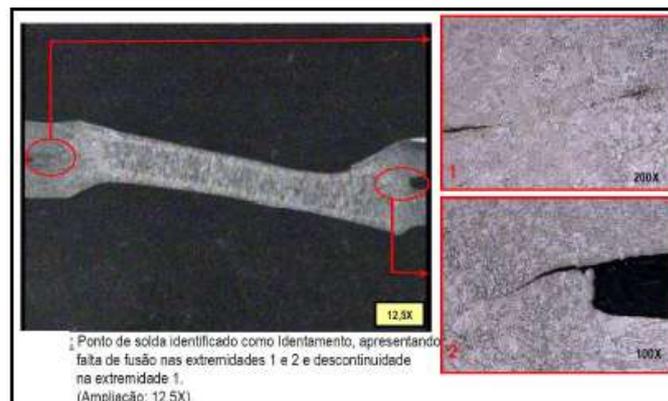


Figura 11. Fotomicrografia. Aumento 12,5x. Nital 3%. Observa-se a região da solda a ponto, para o defeito de indentamento. Na Figura 11.1 - Fotomicrografia. Observa-se com 200x o detalhe da faltade fusão e na Figura 11.2 com 100x, o mesmo tipo de defeito.

No corpo de prova de **eletrodos desalinhados** a análise é NOK, conforme Fig. (12):

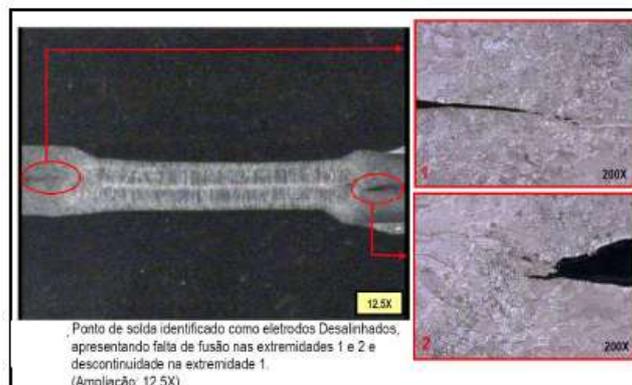


Figura 12. Fotomicrografia. Aumento 12,5x. Nital 3%. Observa-se a região da solda a ponto, para o defeito de eletrodo desalinhado.

Na Figura 12.1 - Fotomicrografia. Observa-se com 200x o detalhe da falta de fusão e na Figura 12.2 com 100x, o mesmo tipo de defeito.

7. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir:

- O critério de arrancamento para a solda a ponto atende a um requisito laboratorial, pois o inspetor de solda avalia pontualmente se a solda rompeu na lentilha ou na chapa.
- Para a análise metalográfica, a inspeção precisa definir critérios mais detalhada da morfologia da solda para os tipos de defeitos. Contudo, para o inspetor avaliar o tipo de defeito superficialmente, é necessário um estudo da morfologia da solda e sua periferia por estereoscopia. Portanto, este estudo mostra que o controle visual deve ser melhor embasado na avaliação do controle da qualidade da solda, pois o controle visual além de ser pouco difundido, existe a dificuldade em viabilizar um método robusto de controle ou autocontrole, pois depende da formação de profissionais para esse fim e de programas estruturados de qualificação e de requalificação periódica.

8. REFERÊNCIAS

- AWS (1998). *Welding Handbook. Vol. 2: Welding Process*, 8º ed. International Standard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society.
- 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 da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 113p.
- CHANG, H. S.; CHO, H. S. (1990). "A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding." *Welding Journal*, August, Vol. 69, Nº 8, pp. 308-s – 317-s.
- CHO, Y.; RHEE, S. (2003). "Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding." *Welding Journal*, August, pp. 195-s – 201-s.
- HOLLIDAY, R.; PARKER, J. D.; WILLIAMS, N. T. (1995). "Electrode deformation when spot welding coated steels." *Welding in the World*. Vol. 15, Nº 3, pp. 160-164.
- INTERMACHINERY (2002). *Manual de Soldagem por Resistência a Ponto*, 41 p.
- KAISER, J. G.; DUNN, G. J.; EAGAR, T. W. (1982). "The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding." *Welding Journal*, June, pp. 167-s – 174-s.
- KARAGOULIS, M. J. (1994). "A Nuts-and-Bolts Approach to the Control of Resistance Spot Welding." *Welding Journal*, July, pp. 27 – 31.
- MACHADO, I. G. (1996). *Soldagem & Técnicas conexas: Processos*. Porto Alegre, 477p.
- METALS HANDBOOK (1983). *Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering*. Ninth Edition. AMS: American Society for Metal. Metal Park.
- RWMA (1989). *Resistance Welding Manual*, Resistance Welder Manufacturing Association. U.S.A., 4th Ed., Nov., 443 p.
- TANG, H.; HOU, W.; HU, S. J.; ZHANG, H. Y.; FENG, Z.; KIMCHI, M. (2003). "Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality." *Welding Journal*, May, pp. 116-s – 124-s.
- TWI (2005) *Resistance Welding* (www.twi.org).
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H., (1992). *SOLDAGEM, processos e metalurgia*. (ed) Editora Edgard Blucher Ltda. pp 217 – 242.
- WU, K. C. (1968). "Electrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding". *Welding Journal*. Vol. 47, Nº 10, pp. 472-s – 478-s.
- ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, J. (2003). "Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds." *Welding Journal*, April, pp. 72-s – 77-s.

DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.