

ANÁLISE DA POROSIDADE EM JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO MIG/MAG ROBOTIZADO

Roseana da Exaltação Trevisan
roseana@fem.unicamp.br
DEF-FEM-UNICAMP
13083-970 – Campinas - SP

Ivan Gonçalves Maia
ivan.maia@aluminocba.com.br

Resumo. Porosidade é um dos defeitos mais comuns na soldagem de metais. Na indústria automobilística, a ocorrência desse tipo de defeito em componentes soldados pode comprometer a qualidade do produto; seja no aspecto de resistência da junta, seja no aspecto meramente estético. O principal objetivo deste trabalho é estudar a incidência de poros ao longo de um cordão de solda de um eixo automotivo e correlacionar essa incidência com os parâmetros de soldagem empregados. Tal cordão pertence a um eixo automotivo soldado pelo processo MIG/MAG robotizado. Durante a confecção dos cordões de solda, a tensão e a corrente do arco foram monitoradas. A velocidade de soldagem foi controlada por um programa instalado no próprio robô de soldagem. Os corpos de prova foram seccionados e as amostras preparadas metalograficamente para medição da porosidade. A porosidade foi analisada através de microscopia ótica. Os poros foram quantificados e os resultados mostraram que, levando em conta somente os parâmetros de soldagem, a formação de poros se deve a variação na velocidade de soldagem que ocorreu durante o processo de soldagem.

Palavras Chave: porosidade, soldagem, parâmetros de soldagem

1. INTRODUÇÃO

A presença de porosidade em cordões de solda de componentes de eixos automotivos compromete a qualidade do produto, podendo levar até mesmo ao sucateamento de todo o conjunto.

Porosidade trata-se de um defeito em forma de cavidade que surge devido ao aprisionamento de gases durante a solidificação do metal de solda. Existem várias maneiras de se prevenir a formação de poros em juntas soldadas. Os métodos mais importantes, porém menos investigados, são os métodos metalúrgicos, que buscam reduzir a porosidade através dos parâmetros de soldagem. (Ramirez, Han e Liu ⁽¹⁾).

De modo geral, na soldagem a arco, os principais parâmetros de soldagem são a tensão e corrente do arco, e a velocidade de soldagem. Esses parâmetros afetam a porosidade de diversas maneiras.

O uso de correntes muito elevadas leva a um aumento no nível de porosidade. Warren e Stout ⁽²⁾ atribuem isso ao fato de que valores elevados de corrente de soldagem levam a um aumento na temperatura da poça de fusão, o que aumenta a solubilidade do oxigênio e outros gases na poça.

Como a solubilidade dos elementos formadores de gases é bem menor no metal sólido, com o resfriamento e conseqüente solidificação do metal de solda, esses elementos são rejeitados no metal líquido à frente da interface de solidificação levando à formação de bolhas de gás que podem vir a ser aprisionadas, formando poros. Warren e Stout ⁽³⁾ afirmam ainda que aumentando a corrente de soldagem, aumenta-se a penetração, e quanto maior a penetração maior é a distância que as bolhas de gás têm que atravessar para escapar pela superfície. Isso aumenta a probabilidade destas serem aprisionadas e formar poros.

A influência da tensão do arco sobre a formação de poros pode ser explicada através de variações no comprimento do arco.

Marques ⁽⁴⁾ afirma que para uma dada corrente, um pequeno aumento na tensão implica em um grande aumento no comprimento do arco. Woods ⁽⁵⁾ através de medições do conteúdo de hidrogênio em soldas de alumínio verificou a tendência de absorção desse gás com o aumento do comprimento do arco. Ele atribuiu isso ao fato de que, quanto maior é o comprimento do arco, maior será a área da superfície da poça de fusão. Isso faz com que a zona susceptível à absorção de gases aumente. Se a proteção gasosa não for suficiente para suprir esse aumento, a ocorrência de porosidade é favorecida.

Estudando o efeito da velocidade de soldagem na ocorrência de poros, Woods ⁽⁵⁾ afirma que com um aumento na velocidade de soldagem obtém-se soldas com menor quantidade de poros. Atribuiu a redução do número de poros ao fato de com velocidades de soldagem maiores reduz-se o tempo disponível para a absorção de gases. Saperstein, Prescott e Monroe ⁽⁶⁾, relacionando velocidade de soldagem com o tamanho e a morfologia dos poros formados no metal de solda, afirmam que com altas velocidades de soldagem os poros tendem a ser refinados, enquanto com baixas velocidades eles tendem a se coalescer, tornando-se mais grosseiros. Os resultados obtidos por eles indicam fortemente que a distribuição e o tamanho dos poros é governado pelo tempo disponível para nucleação e crescimento durante a solidificação do metal de solda.

A quantidade de calor imposta durante a soldagem afeta diretamente a porosidade do cordão de solda. À essa quantidade de calor dá-se o nome energia nominal de soldagem, que representa a energia (calor) fornecida pelo arco por comprimento do cordão de solda. Quanto maior for a energia nominal de soldagem empregada no processo, maior é o tempo disponível para os gases escaparem para a atmosfera sem serem aprisionados pela frente de solidificação. Aumento na tensão e na corrente do arco e redução na velocidade de soldagem, aumentam a energia nominal de soldagem, ou seja, favorecem o escape dos gases.

Esta afirmação faz com que, à primeira vista, a literatura pareça contraditória. O fato é que cada um dos parâmetros (tensão, corrente e velocidade de soldagem) afeta a porosidade de uma maneira como aquela apresentada individualmente. Porém quando em conjunto, como acontece nos processos de soldagem, existe mais um fator a ser considerado, a energia nominal de soldagem.

O objetivo deste trabalho é estudar a incidência de poros ao longo de um cordão de solda de eixo automotivo e correlacionar esta incidência com os parâmetros de soldagem empregados.

2. MATERIAIS E METODOS

Os materiais soldados tratam-se de tubos de aço alta resistência baixa liga (ARBL), utilizados na confecção de eixos automotivos. A composição química dos metais base 1 e 2, é apresentada na Tabela 1. O metal base 1 refere-se a um tubo com dimensões originais de Ø115 x 2,8 mm. Este tubo foi conformado e, em seguida, cortado a plasma, atingindo uma geometria elíptica capaz de abraçar perfeitamente um tubo pré conformado de Ø70 x 3,75 mm, referente ao metal base 2. A complexa geometria dessa junta pode ser melhor visualizada na Figura 1.

Tabela 1: Composição química do metal base 1 e 2.

% em peso	C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Cr	B	Ti	Cu
Metal base 1	0,28	0,20	1,28	0,020	0,003	0,042	0,17	0,21	0,003	0,037	0,01
Metal Base 2	0,14	0,24	1,32	0,021	0,003	0,049	0,01		Nb: 0,026		

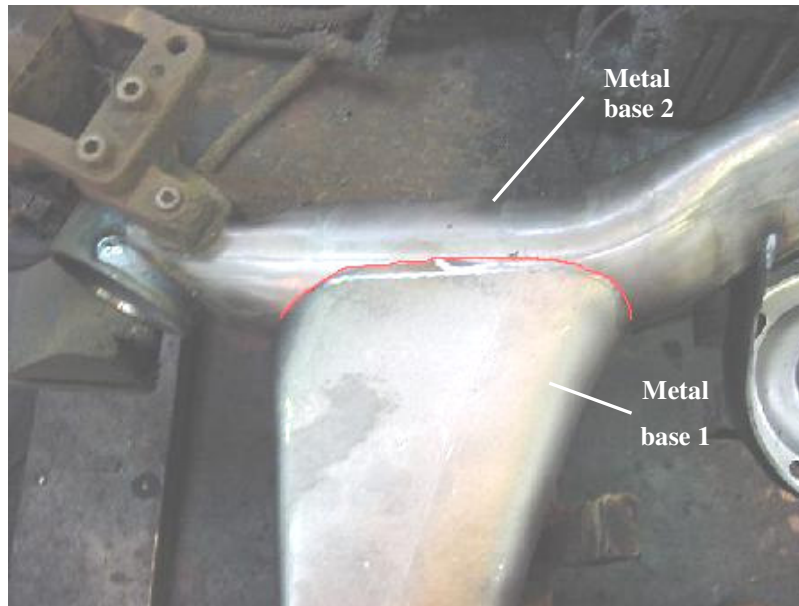


Figura 1: Ilustração real da junta, identificando o metal-base 1 e o metal-base 2.

A composição química do metal de adição utilizado é apresentada na Tabela 2. O diâmetro do arame do metal de adição utilizado foi de 1,2mm.

Tabela 2: Composição química do metal de adição utilizado (% em peso).

% em peso	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Cr	Cu
	0,09	0,86	1,40	0,015	0,01	0,01	0,004	0,001	0,03	0,025

A junta foi soldada pelo processo MIG/MAG robotizado. Para fixação da junta foi utilizado um dispositivo especial com grampos pneumáticos. Como gás de proteção foi utilizada uma mistura Ar-12%CO₂ com uma vazão de 16 l/min.

Durante a soldagem foi realizado o monitoramento da tensão e corrente do arco através de um sistema computadorizado composto de uma placa A/D e do software Oscilos4, ligado à saída analógica de uma máquina de solda Fronius TransPulsSynergic 5000. A obtenção de dados relativos à velocidade de soldagem empregada no processo foi extraída diretamente de um programa instalado no próprio robô de soldagem (ABB IRB 1400).

Para o presente estudo, três cordões de solda foram confeccionados. Cada cordão de solda foi dividido em quatro regiões a fim de se obter a variação da incidência de porosidade entre essas regiões. A definição destas regiões foi realizada levando em consideração a diferença de parâmetros de soldagem aplicados entre elas.

A partir de cada região do cordão de solda estudado, foram retiradas, de maneira aleatória, três secções transversais; sendo assim 12 secções por cordão de solda. No total foram retiradas 36 secções transversais para análise. Para a retirada das secções foi utilizada uma serra de fita circular e uma máquina policorte.

Em seguida, as amostras foram preparadas metalograficamente para medição da porosidade. Já preparadas, as amostras foram atacadas com Nital 2,5% por aproximadamente 20 s para revelar, nitidamente, a zona fundida.

O nível de porosidade foi medido em termos de quantidade de poros por região do cordão de solda. Foram contados somente poros maiores que 25µm. Segundo a norma AWS A5.20-95, o tamanho de um poro é determinado pela sua maior dimensão, incluindo qualquer prolongamento que apresente. Para isso foi utilizado um microscópio ótico Olympus BX60M. Os aumentos utilizados foram de 100x e 200x.

Para maior confiabilidade nos resultados, foi realizado um planejamento experimental por níveis aleatorizado por blocos, de acordo com Montgomery ⁽⁷⁾. O uso desse planejamento permitiu estudar a variação de incidência de porosidade entre as regiões do cordão de solda, sem que eventuais variações entre os próprios cordões de solda comprometessem os resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por se tratar de um processo robotizado de soldagem de eixos automotivos produzidos em escala industrial, os parâmetros de soldagem já estavam previamente estabelecidos e otimizados. Dessa maneira, esses parâmetros foram mantidos.

Através dos resultados obtidos no monitoramento dos parâmetros de soldagem, constatou-se que a tensão e a corrente do arco permaneceram constantes em toda a extensão do cordão de solda. A tensão do arco foi de 28 V, e a corrente do arco foi de 300A. Foi constatado também que durante a confecção dos cordões de solda, a velocidade de soldagem sofria variações. Em função destas variações na velocidade de soldagem, definiu-se que os cordões seriam divididos em quatro regiões. Com os resultados obtidos através do monitoramento pôde-se ainda delimitar as quatro regiões a serem analisadas. Para melhor visualização das regiões do cordão de solda, vide Figura 2.

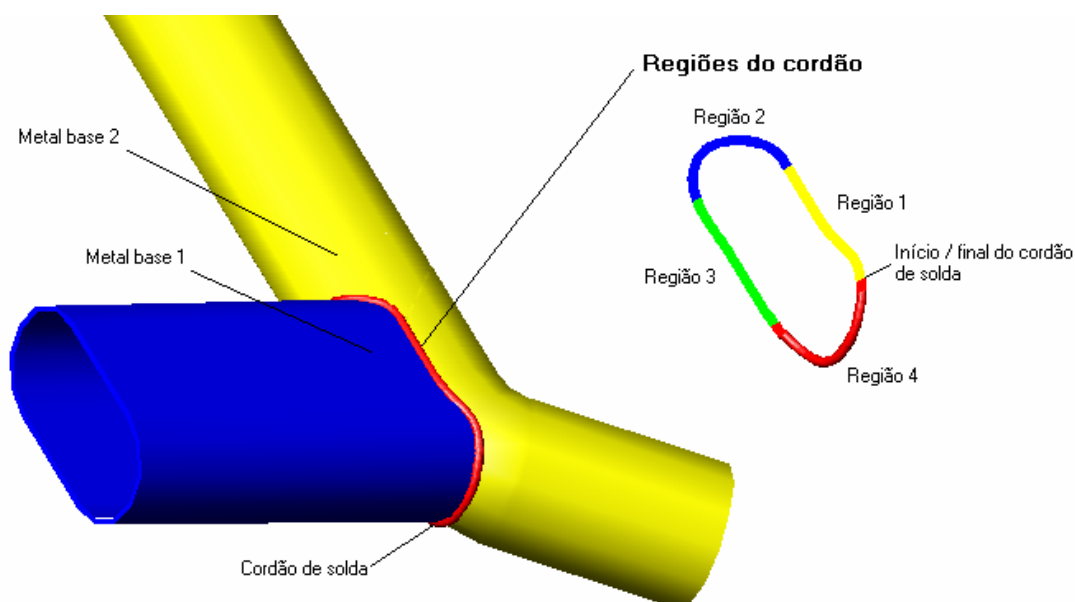


Figura 2: Ilustração da junta soldada e divisão do cordão de solda em regiões. ⁽⁸⁾

A Tabela 3 apresenta o comprimento das quatro regiões do cordão de solda, os valores da velocidade de soldagem, e a energia nominal de soldagem aplicada em cada trecho do cordão.

Como pode ser observado na Tabela 3, existe uma variação no comprimento das regiões, ou seja, as regiões não apresentam o mesmo tamanho. O comprimento destas regiões varia de 107 a 121 mm. Além disso, embora com valores distintos, dentro de cada região a velocidade de soldagem permaneceu constante, exceto na região 2, onde este parâmetro assumiu três diferentes valores.

Como citado no item 2, foram confeccionados três cordões de solda. Após a divisão de cada um dos três cordões de solda em 4 regiões, foi realizada a medição de porosidade. Para cada região de cada cordão de solda, foram analisadas três seções transversais. Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram as médias dos poros encontrados nestas três seções e o número total de poros por região. Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram claramente que a região 2 foi a região que mais apresentou poros.

Tabela 3: Regiões do cordão de solda e velocidades de soldagem correspondentes. ⁽⁸⁾

Região	Comprimento de cordão (mm)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia nominal de soldagem (J/mm)
Região 1	111	15	554
Região 2	32	09	923
	75	12	693
	14	10	831
Região 3	107	15	554
Região 4	107	09	923
Total	446		

A medição de porosidade foi realizada de forma geral, sem qualquer restrição quanto à localização dos poros na seção transversal do cordão de solda.

Tabela 4: Poros encontrados nas três seções e número total de poros por região. ⁽⁸⁾

	Cordão 1			Cordão 2			Cordão 3			Total
Região 1	1	0	2	2	3	1	1	1	0	11
	1			2			0,67			
Região 2	1	3	2	4	3	3	3	2	3	24
	2			3,33			2,67			
Região 3	1	0	0	2	2	1	2	1	1	10
	0,33			1,67			1,33			
Região 4	1	2	1	1	1	2	1	1	1	11
	1,33			1,33			1			

Utilizando o planejamento experimental por níveis ⁽⁷⁾ podemos afirmar estatisticamente, com um grau de confiança de 95%, que existe diferença no número de poros entre as regiões. Podemos afirmar ainda que a região 2 foi a região que mais apresentou poros, sendo assim considerada a região crítica do cordão de solda ⁽⁸⁾.

Além dos resultados obtidos através da quantificação de porosidade, uma outra observação pôde ser feita durante a análise dos cordões de solda. A maioria dos poros encontrados se concentrava na raiz da junta soldada. Além disso, os poros localizados próximos à raiz da junta apresentavam dimensões superiores aos outros poros que estavam dispersos pela seção transversal do cordão de solda. A Figura 2 apresenta macrografias representativas de poros localizados próximos a raiz do cordão e poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda.

Independentemente do tipo de porosidade, a presença de um maior número de poros na região 2 poderia ser explicado pelas baixas velocidades de soldagem aplicadas (vide Tabela 3). Isso estaria de acordo com Woods ⁽⁵⁾ quando a velocidade de soldagem é analisada isoladamente, sem levar em consideração a energia nominal de soldagem. Entretanto, a região 4 apresentou o mais baixo valor de velocidade de soldagem, 9 mm/s, em toda a sua extensão e mesmo assim não se destacou como uma das regiões críticas.

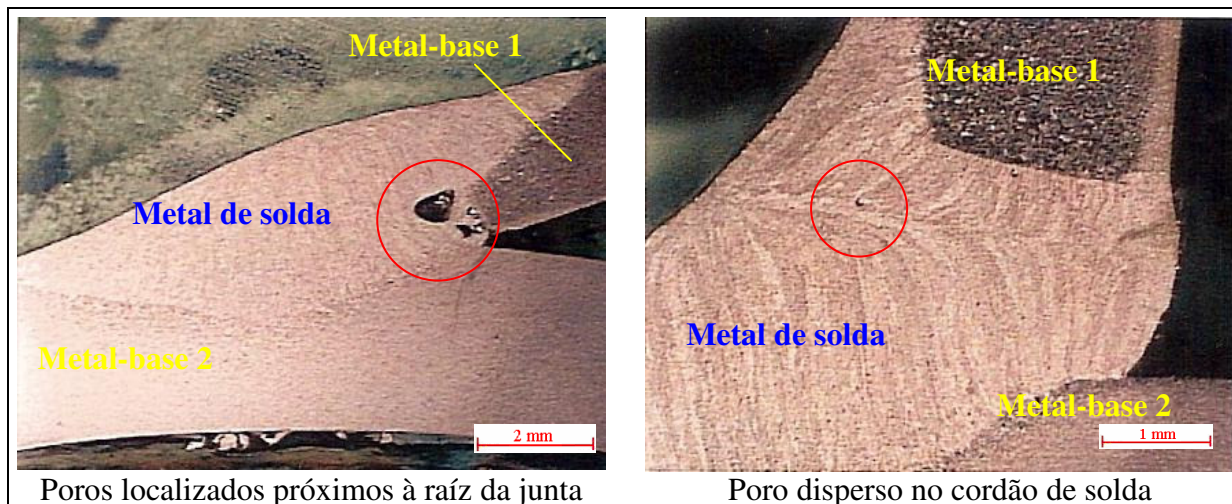


Figura 2: Tipos de porosidade presentes nos cordões de solda. ⁽⁸⁾

Analisando do ponto de vista da energia nominal de soldagem, de acordo com Saperstein, Prescott e Monroe ⁽⁶⁾ e Ramirez, Han e Liu ⁽¹⁾, para uma dada tensão e corrente do arco, quanto menor a velocidade de soldagem, maior é essa energia, e conseqüentemente maior é o tempo disponível para as bolhas de gás escaparem para a atmosfera, evitando assim a formação de poros. Contrariando essa teoria, a região 2, que apresentava valores de energia nominal de soldagem maiores que as regiões 1 e 3 por exemplo, foi a que desenvolveu o maior número de poros.

Analisando agora o fato da região 2 ser a única região que apresentou variações na velocidade de soldagem, podemos atribuir essa maior incidência de poros, não à velocidade de soldagem aplicada e sim às variações nesta velocidade. Alterar de maneira brusca a velocidade de soldagem implica em mudar repentinamente a quantidade de calor que está sendo introduzida pelo processo de soldagem. Quando temos variações positivas na velocidade de soldagem, ou seja, aumentamos a velocidade de soldagem, mantendo tensão e corrente do arco constantes, o metal de solda que estava se solidificando a uma determinada velocidade, vai agora passar a se solidificar em uma velocidade maior, podendo assim aprisionar os gases e levar à formação de poros.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo conclui-se que:

- Estatisticamente houve diferença no nível de porosidade entre as regiões dos cordões de solda. Dentre as regiões analisadas, a região 2 foi a que mais apresentou poros.
- Analisando somente os parâmetros de soldagem, pode-se atribuir a maior incidência de porosidade na região 2 às variações na velocidade de soldagem que ocorrem nessa região.
- Puderam ser identificados dois tipos distintos de porosidade, um próximo à raiz da junta, e outro disperso pela seção transversal do cordão de solda. Os poros localizados próximos à raiz da junta são mais grosseiros que os poros dispersos na seção transversal do cordão de solda.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Benteler Componentes Automotivos pelo auxílio financeiro e à Unicamp pela infra-estrutura de seus laboratórios.

6. REFERÊNCIAS

1. RAMIREZ, J.E. ; HAN, B. ; LIU, S. Effect of Welding Variables and Solidification Substructure on Weld Metal Porosity. **Metallurgical and Materials Transactions: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 25A, n. 10, p. 2285-2294, Oct. 1994.
2. WARREN, Donald; STOUT, R. D. Porosity in Mild Steel Weld Metal. **Welding Journal**, v. 31, n. 8, p. 381s-387s, Aug. 1952.
3. WARREN, Donald; STOUT, R. D. Porosity in Mild Steel Weld Metal. **Welding Journal**, v. 31, n. 9, p. 406s-420s, Sep. 1952b.
4. MARQUES, Paulo V. **Tecnologia da Soldagem**. 1^a ed. Belo Horizonte: O Lutador - ESAB, 1991. 352p.
5. WOODS, R.A. Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds. **Welding Journal**, v. 53, n. 3, p. 97s-108s, Mar. 1974.
6. SAPERSTEIN, Z. P.; PRESCOTT, G. R. ; MONROE, E. W. Porosity in Aluminum Welds. **Welding Journal**, v. 43, n. 10, p. 443s-453s, Oct. 19647.
7. MONTGOMERY, D. C., 1996, "Design and analysis of experiments". 4th ed. New York: John Wiley and Sons, 428pp
8. MAIA, I. G. ; **Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos**. 2005. 80 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ANALISY OF PORES INCIDENCE IN STEEL WELDED BY GMAW WITH ROBOT

Roseana da Exaltação Trevisan
roseana@fem.unicamp.br
DEF-FEM-UNICAMP - 13083-970 – Campinas - SP

Ivan Gonçalves Maia
ivan.maia@aluminioeba.com.br

Abstract. *Porosity is one of the most commons defects in metal welding. In the automotive industry, the occurrence of this defect in welded components can compromise the quality of the product, such as the strength of the joint and visual analysis. There are many ways to prevent pore formation in welded joints. The main objective of this work is to study pore incidence in a weld bead of an automotive axle and correlate this incidence with the welding parameters used. The weld bead is deposited on an automotive axle by robotized GMAW. The weld current and the arc voltage were monitored during the welding. A program installed in the welding robot controlled the welding speed. After metallographic preparation of transverse cross sections of the specimens, the porosity was analyzed by optical microscopy. Results show that, by analyzing only the welding parameters, pore formation is due to welding velocity variation during the welding process.*

Keywords: *porosity, welding, welding parameters.*

