

Desenvolvimento de uma Célula de Fabricação Automatizada para Soldagem GMAW dos Componentes Estruturais das Rodas Metálicas de Tratores Agrícolas

(Development of an Automated Manufacturing Cell for the GMAW Welding of the Structural Components of Agricultural Tractors' Metallic Wheels)

Nelso Gauze Bonacorso¹, Jair Carlos Dutra², Max Hélio Hemmer³, Diego Erdmann dos Santos²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento de Metal Mecânica/Mecatrônica, Florianópolis, SC, Brasil, nelso@ifsc.edu.br

²Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, jdutra@labsolda.ufsc.br, d.santos@labsolda.ufsc.br

³Empresa Brasélio, Departamento de Projeto Industrial, Massaranduba, SC, Brasil, helio@braselio.com.br

Resumo

No Brasil, as rodas metálicas dos tratores agrícolas são produzidas empregando chapas e barras chatas de aço carbono. Na sequência de fabricação são usados os processos de corte, conformação, montagem, soldagem e acabamento. A soldagem manual GMAW é atualmente usada na união dos componentes estruturais. Além de ser um processo insalubre e lento, a qualidade das uniões realizadas depende fortemente da habilidade do soldador. Com o objetivo de obter maior produtividade e melhor qualidade, foi desenvolvida uma célula de fabricação para a soldagem automatizada GMAW constituída de: um manipulador CNC da tocha, uma mesa rotativa com o seu sistema de fixação das rodas e o equipamento de soldagem. Os procedimentos de união para o arame maciço AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro protegido pela mistura 75% Ar + 25% CO₂ foram também desenvolvidos. A fim de tornar o processo de soldagem repetitivo e mais robusto com o objetivo de evitar retrabalhos foram usadas técnicas de tecimento e correção de trajetória via seguidor de junta indutivo. Os ganhos obtidos em relação ao processo manual foram: redução de 1/3 no tempo de soldagem, aumento na produtividade da ordem de 150 %, melhor uniformidade e qualidade dos cordões de solda.

Palavras-chave: Automação da Soldagem; GMAW; Seguimento de Junta; Sensor Indutivo; Tecimento Longitudinal.

Abstract: In Brazil, the metallic wheels of the agricultural tractors are produced using plates and annoying bars of steel carbon. In the production sequence the cut processes, resignation, assembly, welding and finish are used. The manual welding GMAW is used now in the union of the structural components. Besides being an unhealthy and slow process, the quality of the accomplished unions it depends strongly on the welder's ability. With the objective of obtaining larger productivity and better quality, a production cell was developed for the automated welding constituted GMAW of: a manipulator CNC of the torch, a rotative table with his system of fixation of the wheels and the welding equipment. The union procedures for the solid wire AWS ER70S-6 of 1,0 mm diameter protected by the mixture 75% Air + 25% CO₂ were developed also. In order to turn the more robust welding process with the objective of avoiding rework weaving techniques and path correction was used through inductive joint tracking. The earnings obtained in relation to the manual process were: reduction of 1/3 in the time of welding, increase in the productivity of the order of 150%, better uniformity and quality of the weld beads.

Key-words: Automated Welding; GMAW; Joint Tracking; Inductive Sensor; Switchback Method.

1. Introdução

Nas últimas décadas, empresas brasileiras buscam melhorias em seus processos produtivos com objetivo de competir em igualdade de condições tecnológicas e também conquistar o mercado

estrangeiro. Na busca por essas melhorias, várias indústrias voltaram a investir em desenvolvimento e inovação, seja com seu próprio corpo técnico ou firmando parcerias com instituições de ensino voltadas para a pesquisa. Os processos, fontes, equipamentos e dispositivos de soldagem ganharam destaque e continuamente são objetos de inovações e readequações tecnológicas.

O GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) que foi concebido na década de 1920 e introduzido no mercado no final da década de 1940 é um exemplo de processo de soldagem que está em constante aperfeiçoamento. Seu funcionamento é baseado no consumo em proteção gasosa de um arame-eletrodo que é alimentado continuamente [1]. Maior produtividade, versatilidade na fabricação e na manutenção com ligas ferrosas e também não ferrosas, possibilidade de efetuar tanto a mecanização quanto a automatização do processo são as suas principais vantagens.

Entretanto, os desenvolvimentos e as inovações realizadas na área da soldagem não buscam apenas o aprimoramento dos processos, mas também procuram afastar o soldador do ambiente de solda por ser muito insalubre. Nesse sentido, o soldador pode realizar outras tarefas em paralelo como pontear, posicionar, operar e supervisionar o funcionamento dos equipamentos da célula automatizada de soldagem reduzindo assim o tempo de fabricação.

Cabe ressaltar que a substituição da soldagem manual por uma célula de soldagem automatizada em um determinado processo de fabricação é uma tarefa longa e complexa envolvendo as fases de projeto da célula, sua construção e parametrização das variáveis de soldagem e de movimento. O custo desta substituição aumenta de forma exponencial à medida que se transfere mais funções do soldador para a célula, como por exemplos as execuções de tecimento e de seguimento de junta.

Com base nessa conjuntura tecnológica a empresa Brasélio estabeleceu uma parceria com a UFSC/Labsolda com a meta de obter maior produtividade com melhor qualidade na soldagem das rodas metálicas de tratores agrícolas. Desenvolver uma célula de fabricação automatizada flexível e de baixo custo para soldagem GMAW dos componentes estruturais das rodas é o desafio a ser superado e ao mesmo tempo a motivação para a equipe de execução.

2. Metodologias Aplicadas

As rodas metálicas dos tratores agrícolas são produzidas empregando chapas e barras chatas comerciais de aço carbono. São envolvidos na sequência de fabricação os processos de corte, conformação, montagem, soldagem e acabamento. A montagem da roda é realizada de forma manual com pontos de solda GMAW para a fixação de seus componentes estruturais de ambos os lados [2].

Desta etapa de montagem resulta um total de 16 juntas a serem soldadas, isto é, 8 juntas por lado conforme mostra a Figura 1. Por sua vez, cada um dos lados possuem 6 juntas de raio (*JR1, JR2, ..., JR6*), 1 junta de circunferência externa (*JCE*) e 1 junta de circunferência interna (*JCI*).

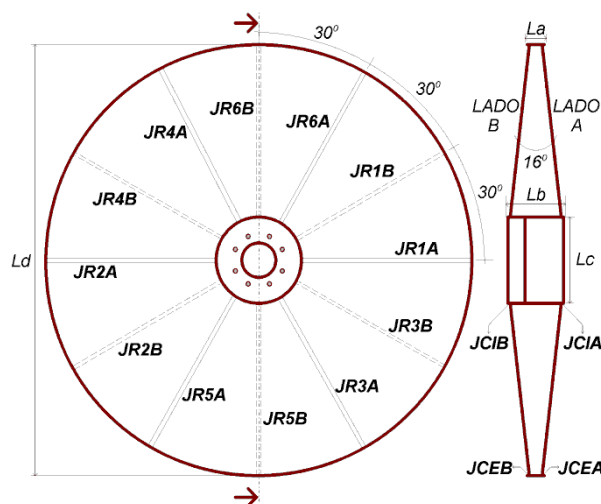


Figura 1. Desenho da roda com as principais dimensões e juntas.

Atualmente são fabricadas, conforme mostra a Tabela 1, nove tipos de rodas (*A, B, ..., I*) com as respectivas dimensões: *La, Lb, Lc* e *Ld*. Considerando os três tipos de juntas existentes nas rodas (*JR, JCE* e *JCI*) a menor roda, tipo *A*, possui um comprimento total de junta por lado de 10,840 m enquanto que a maior roda, tipo *I*, tem um comprimento total de junta por lado de 12,637 m. Nestes tipos de juntas, a velocidade média de soldagem executada pelos soldadores da empresa é de

aproximadamente 900 mm/min o que resulta em uma faixa de tempo de soldagem por lado entre 12 a 14 minutos. Porém, a produtividade por dia, turno de 8 horas, e por soldador é de apenas 6 rodas, ou seja, aproximadamente são necessários 40 minutos para soldar cada lado da roda.

Tabela 1 – Tipos de roda com suas características dimensionais.

Tipos de Rodas e Dimensões (mm)					Comprimento das Juntas (mm)		
Tp	La	Lb	Lc	Ld	JR	JCI	JCE
A	50,8	240	350	1750	707	1100	5498
B	63,5	252	350	1750	707	1100	5498
C	76,2	265	350	1750	707	1100	5498
D	50,8	245	420	1860	727	1320	5843
E	63,5	258	420	1860	727	1320	5843
F	76,2	270	420	1860	727	1320	5843
G	50,8	270	420	2040	818	1320	6409
H	63,5	283	420	2040	818	1320	6409
I	76,2	295	420	2040	818	1320	6409

2.1. Descrição da Célula Automatizada de Soldagem

Os posicionadores são dispositivos mecânicos que suportam e movimentam peças até posições desejadas para a realização das soldagens das respectivas juntas. Os fixadores podem ser montados nos posicionadores, facilitando tanto as operações de carga quanto as de descarga de peças. Sua principal função é fixar a peça de forma a não se movimentar durante a execução das soldagens [3].

Em função das características geométricas das rodas e de suas juntas, Figura 1, optou-se em desenvolver uma mesa posicionadora servoacionada, Figura 2, com dispositivo de fixação baseado no conjunto: porca de aperto rápido e pinça de fixação sobre a superfície interna da luva de centralização da roda.

O funcionamento desta mesa posicionadora é diferente em função do tipo de junta a ser soldada. Durante a execução da soldagem de cada junta de raio, *JR*, a mesa opera com controle de posição permanecendo parada. Porém, nas soldagens das juntas de circunferências, *JCE* e *JCI*, a mesa opera com controle de velocidade mantendo constante e igual à velocidade de soldagem desejada durante o deslocamento dos 360°.

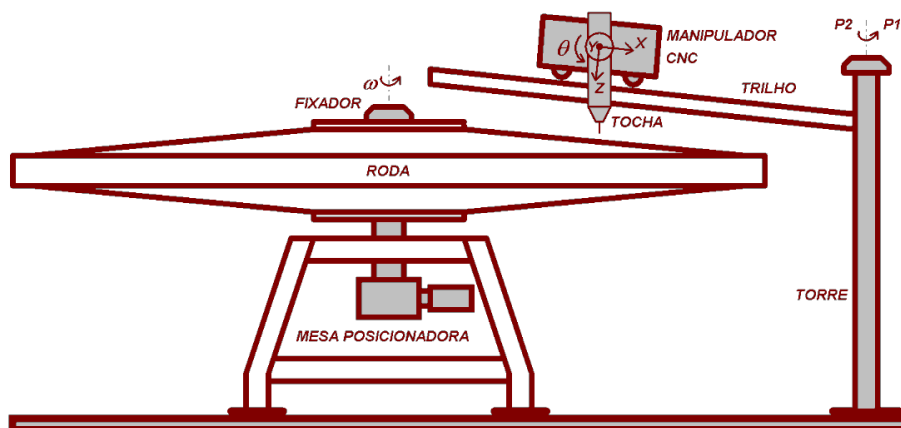


Figura 2. Layout da solução adotada.

A principal vantagem desta mesa posicionadora é permitir o uso de um robô ou até mesmo um manipulador específico para a tarefa de soldagem com um menor espaço de trabalho e com um número reduzido de graus de liberdade. Objetivando minimizar custos optou-se em usar, em conjunto com a mesa posicionadora de 1 grau de liberdade, um manipulador cartesiano CNC de 4 graus de liberdade dedicado a soldagem [4].

O trilho deste manipulador, eixo X, é fixado a uma torre giratória, Figura 2. Essa torre giratória, por sua vez, pode se encontrar em apenas duas posições angulares. Na primeira posição *P1* são realizados os movimentos de carga, mudança de lado e descarga das rodas. As soldagens das juntas de raios e de circunferências são executadas na segunda posição *P2* utilizando o tecimento longitudinal, Figura 3.

O objetivo desta técnica de tecimento é o de aumentar o tamanho da poça de fusão por meio de uma maior distribuição do arco elétrico na direção longitudinal do cordão de solda minimizando assim o surgimento de mordeduras e perfurações [5].

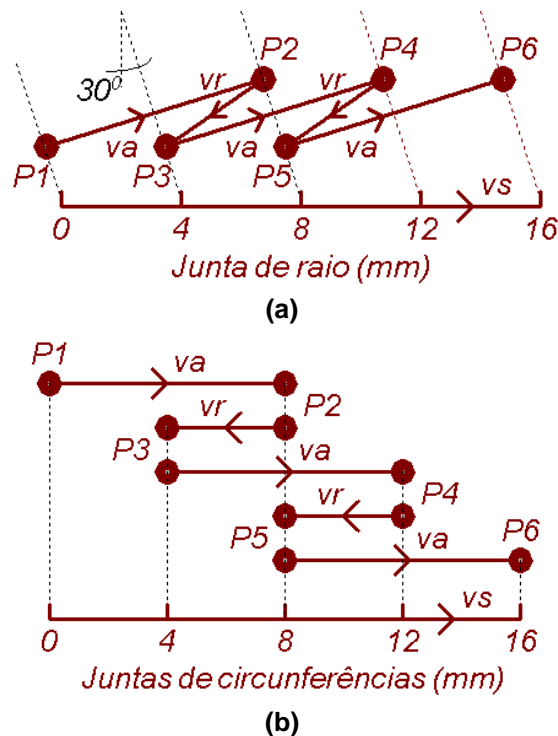


Figura 3. Tecimento longitudinal das juntas de raio em (a) e das juntas de circunferência em (b).

A soldagem de raio é executada com a orientação de 30° empurrando via os movimentos simultâneos: linear do eixo X e oscilatório do eixo angular θ do manipulador. A velocidade de soldagem v_s é igual a velocidade linear do eixo X uma vez que o movimento oscilatório possui velocidade média nula. A trajetória de soldagem resultante e seus principais pontos (P_1, P_2, \dots, P_6) do tecimento longitudinal são apresentados na Figura 3(a).

De forma similar, as soldagens de circunferências são executadas com orientação normal via os movimentos simultâneos: giro com velocidade constante w da mesa posicionadora e oscilatório do eixo Y do manipulador. A velocidade de soldagem v_s é igual a velocidade angular ω da mesa posicionadora uma vez que o movimento oscilatório do eixo Y possui também velocidade média nula.

Com a velocidade de oscilação dos eixos do manipulador v_o igual ao triplo da velocidade de soldagem v_s , Figura 3(b), se obtêm as velocidades de avanço v_a e de recuo v_r do arco elétrico nas juntas de circunferência de acordo com o sistema de equações:

$$\begin{cases} v_a = v_o + v_s = 3v_s + v_s = 4v_s \\ v_r = v_o - v_s = 3v_s - v_s = 2v_s \end{cases} \quad (1)$$

Em função dos desvios de localização das juntas da roda provenientes dos processos de corte, conformação e montagem dos componentes estruturais por pontos de solda GMAW, foi necessário aplicar um seguidor automático de juntas. A junta de circunferência externa é a que possui maior desvio de localização, ± 4 mm na direção Z do manipulador, seguida da junta de circunferência interna. Para as juntas de raio a condição de paralelismo entre o eixo longitudinal da respectiva junta e o eixo X do manipulador é garantida antes da soldagem via ajuste fino do operador no posicionamento do eixo angular da mesa e do eixo Y do manipulador.

Dois sensores indutivos do tipo digital, Figura 4, foram instalados próximos ao bocal da tocha de soldagem com o objetivo de detectar, sem contato físico, a presença das chapas de aço que compõem ambas as juntas de circunferência. Os sensores indutivos com 5,0 mm de distância nominal de detecção e 0,4 mm de histerese atuam de forma independente.

Um deles atua somente durante a soldagem da junta de circunferência interna, Figura 4(a), enquanto que o outro atua somente durante a soldagem da junta de circunferência externa, Figura 4(b). Em ambas as situações, os sensores indutivos são posicionados, na direção X do manipulador, o mais próximo possível, 80 mm, das juntas de circunferências.

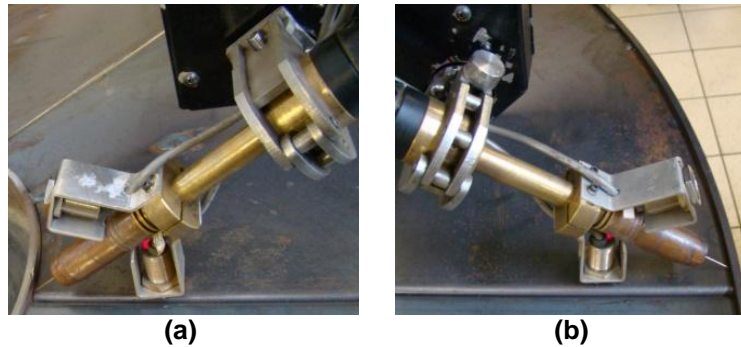


Figura 4. Sensores indutivos do sistema de seguimento das juntas [6]: circunferência interna em (a) e externa em (b).

Quando o sensor indutivo de realimentação detecta a chapa, distância igual ou menor do que 4,8 mm, o eixo Z do manipulador é acionado no sentido de afastar a tocha da junta, Z-. Com isso, a distância entre o respectivo sensor e a chapa aumenta. Quando a distância for igual ou maior que 5,2 mm o sensor não detecta mais a chapa e comanda o eixo Z do manipulador no sentido de aproximar a tocha da junta, Z+. Assim, a tocha de soldagem é deslocada na direção Z de forma a compensar os desvios de localização das juntas de circunferência durante a soldagem.

Em cada lado das rodas, Figura 1, foi aplicada a sequência das soldagens de juntas, (JR1, JR2, JR3, JR4, JR5, JR6, JCE e JCI), com o objetivo de minimizar o aparecimento de deformações e de reduzir os tempos de posicionamento da tocha em cada junta. Antes de executar as soldagens das juntas de cada lado da roda, os eixos do manipulador são referenciados, posicionados e ajustados pelo operador da célula conforme mostra o fluxograma da Figura 5.

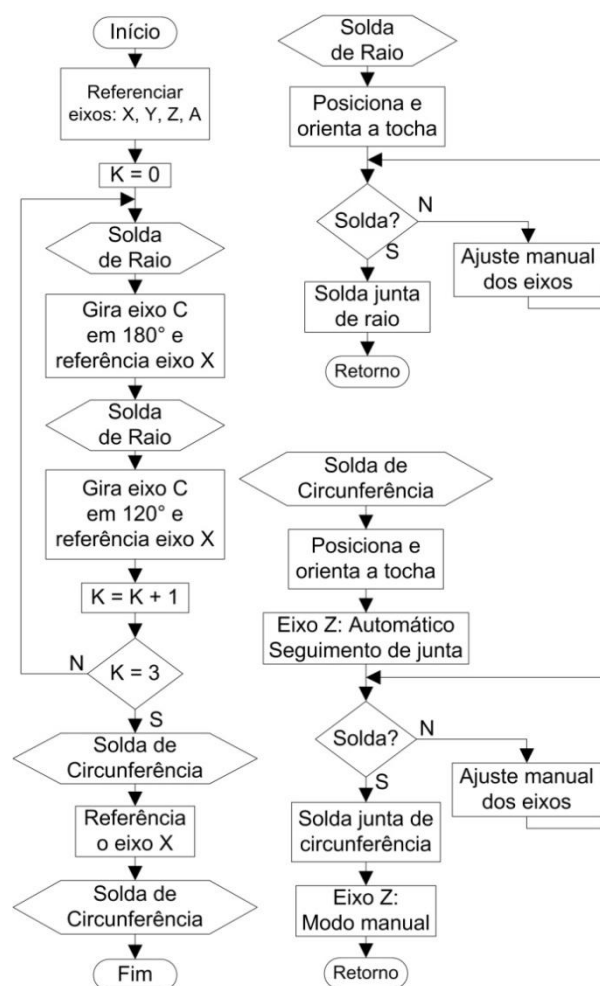


Figura 5. Diagrama de blocos funcional da célula de soldagem.

Os principais equipamentos desta célula de soldagem automatizada, Figura 6, são: uma mesa posicionadora servoacionada de um grau de liberdade com dispositivo de fixação das rodas, um manipulador cartesiano CNC de quatro graus de liberdade Tartilope V4, uma fonte de soldagem microprocessada IMC MTE Digitec 600 com alimentador automático de arame IMC STA-20D, uma tocha GMAW reta e refrigerada TBI 7W AUT, dois sensores indutivos do tipo digital BES 516-326-E4-Y02 fixados próximo ao bocal da tocha e uma IHM para ajustes finos de posição dos eixos e operação da célula.

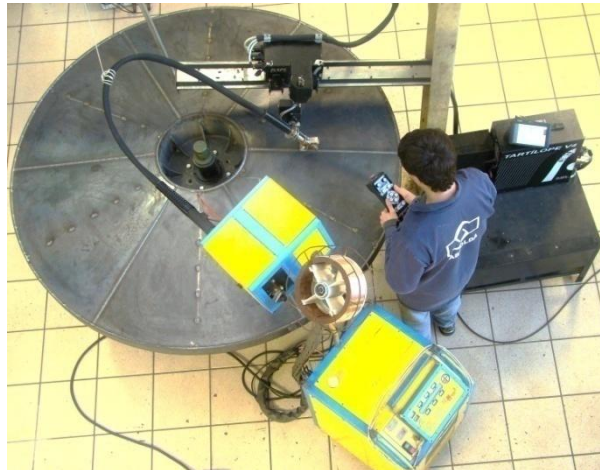


Figura 6. Foto da célula automatizada de soldagem.

2.2. Critérios de Avaliação da Soldagem

O critério de avaliação aplicado pelo fabricante das rodas considera a continuidade do cordão de solda, não permitindo espaços sem solda e furos na chapa, e a geometria da secção transversal de cada tipo de junta soldada, Figura 7.

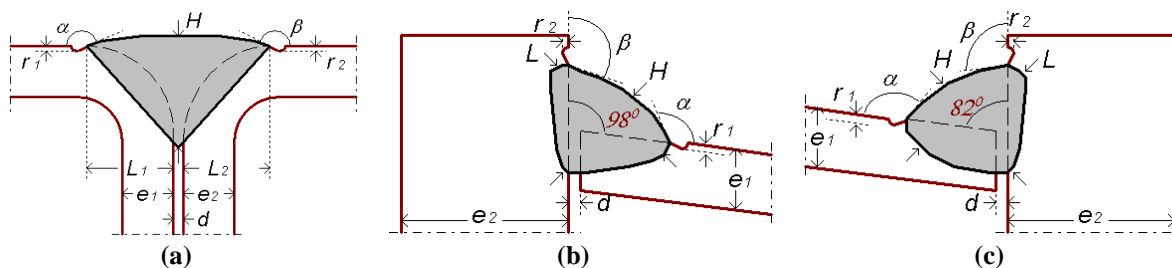


Figura 7. Especificações dimensionais das juntas soldadas: JR em (a), JCI em (b) e JCE em (c).

A análise da secção transversal do cordão de solda em cada tipo de junta é baseada na espessura da chapa mais fina que compõe a junta. No caso de uma junta formada pela união de duas chapas de espessuras e_1 e e_2 , o menor valor de espessura é denominado e . Assim, os limites mínimos e máximos das medições da secção transversal dos cordões de solda são vinculados ao valor de espessura e , conforme mostra a Tabela 2. Cabe ressaltar que esses critérios foram criados ao longo do tempo em função do surgimento de problemas nas rodas provenientes das soldagens de juntas e por esse motivo são mais rigorosos que os critérios estabelecidos pela AWS [7].

Tabela 2 – Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda

Parâmetro	Descrição	Faixa tolerável
L_1, L_2 (mm)	Projeção das penetrações	$L_1 \geq 1,5.e$; $L_2 \geq 1,5.e$
L (mm)	Largura do cordão de solda	$L \geq 2.e$
H (mm)	Altura do cordão de solda	$H \geq 1,5.e$
d (mm)	Distância entre as chapas	$d \leq 0,2.e$
r_1, r_2 (mm)	Mordeduras	$r_1 \leq 0,1.e$; $r_2 \leq 0,1.e$
α, β ($^\circ$)	Ângulos de reforço	$\alpha \geq 120^\circ$; $\beta \geq 120^\circ$

O cordão de solda não é desqualificado pela presença de respingos, entretanto a ocorrência destes em grande quantidade pode representar desestabilidade do processo. Neste caso a peça é reprovada, pois não se pode garantir que os valores dos parâmetros geométricos das seções transversais estão dentro da faixa de tolerância.

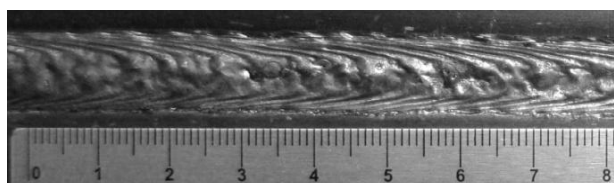
3. Resultados e Discussão

Depois do desenvolvimento da célula de soldagem automatizada surgiu o segundo desafio deste trabalho que é a busca de um conjunto de parâmetros, Tabela 3, para a soldagem GMAW convencional que proporcione, além de repetibilidade e robustez, qualidade dos depósitos e elevada produtividade.

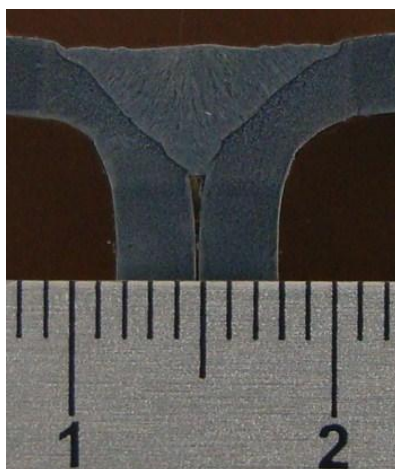
Tabela 3 – Procedimento desenvolvido para a soldagem dos componentes estruturais das rodas

Parâmetros, Variáveis e Detalhes Operacionais	Valores		
	JR	JCI	JCE
Velocidade de soldagem (m/min)	1,2	1,2	1,2
Velocidade do arame (m/min)	24,0	18,0	18,0
Tensão média aplicada (V)	40	33	33
DBCP (mm)	25	30	30
Corrente média obtida (A)	345	290	290
Orientação longitudinal da tocha (°)	22	0	0
Orientação transversal da tocha (°)	0	- 68	52
Amplitude de tecimento (° ou mm)	1,8°	6,0	6,0
Frequência de tecimento (Hz)	4,2	5,0	5,0
Uso de seguidor de junta indutivo	não	sim	sim

O arame maciço AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro é o material de adição usado protegido pela mistura 75% Ar + 25% CO₂ com vazão de 18 l/min. A robustez dos parâmetros, juntamente com a técnica de tecimento longitudinal e de seguimento de junta viabilizou bom acabamento superficial nas soldagens das juntas de raio, circunferência interna e circunferência externa conforme mostra respectivamente as Figuras 8(a), 9(a) e 10(a).



(a)



(b)

Figura 8. Soldagem da junta de raio, em (a) o cordão de solda obtido e em (b) a respectiva macrografia da seção transversal.

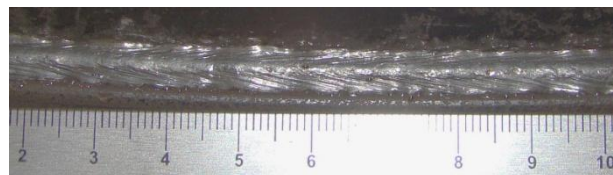


(a)

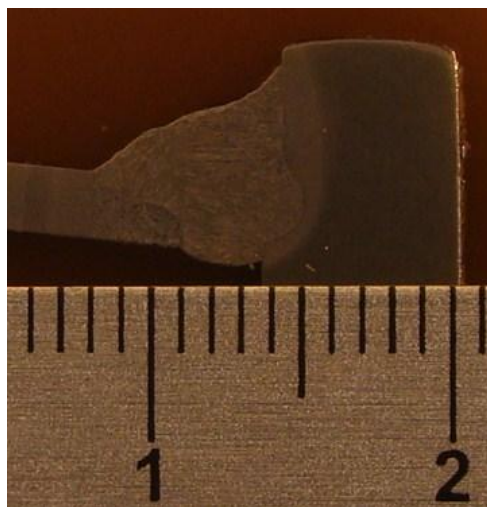


(b)

Figura 9 – Soldagem da junta da circunferência interna, em (a) o cordão de solda obtido e em (b) a respectiva macrografia da secção transversal.



(a)



(b)

Figura 10 – Soldagem da junta da circunferência externa, em (a) o cordão de solda obtido e em (b) a respectiva macrografia da secção transversal.

Levando em consideração os critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda das juntas das rodas, Tabela 2, os resultados obtidos para a soldagem de raio, Figura 8(b), de circunferência interna, Figura 9(b), e de circunferência externa, Figura 10(b), estão aprovados.

A roda soldada foi a do tipo *F*, Tabela 1, com um tempo total gasto de aproximadamente 16 minutos para soldagem de todas as juntas de um dos lados. As componentes deste tempo foram: 10 minutos de tempo de soldagem, 2 minutos de tempo de posicionamento da tocha no início das juntas e 4 minutos de duração para a execução dos trabalhos de colocação e posicionamento da roda sobre a mesa. Cabe ainda ressaltar que o tempo total gasto por um soldador para executar esta mesma tarefa é de aproximadamente 40 minutos.

4 . Conclusões

O processo GMAW convencional associado a uma célula de fabricação automatizada para soldagem é uma excelente alternativa para a união de componentes estruturais onde se deseja produtividade, uniformidade, baixo nível de respingo e boa característica de união nas juntas das rodas, em especial a circular externa que está mais sujeita a esforços mecânicos.

O sistema de seguimento de juntas circulares e a técnica do tecimento longitudinal proporcionaram a robustez e a repetibilidade desejada para a realização da soldagem dos componentes estruturais das rodas. Os cordões de solda produzidos além de satisfazer os critérios de avaliação do fabricante são isentos de defeitos de soldagem, tais como: porosidades, trincas, mordeduras, falta de fusão e penetração.

Com o desenvolvimento da célula de fabricação automatizada para soldagem GMAW convencional dos componentes estruturais das rodas obteve-se uma redução de 33 % no tempo de soldagem e um aumento de produtividade de 150 % em comparação com o processo GMAW convencional sob condução manual da tocha de soldagem.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Brasélio pela oportunidade proporcionada e aos profissionais do Labsolda pelo apoio técnico prestado.

6. Referências Bibliográficas

- [1] AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, Welding Handbook: welding process. USA: 9. ed., v.3, 2008. 600 p.
- [2] MAX HÉLIO HEMMER. Massaranduba-SC. Roda estruturada blindada para máquina agrícola. Int Ci^{B60B} 15/00. BR. MU 8401928-0. 30 abr. 2004, 13 dez. 2005. Revista da Propriedade Industrial, Rio de Janeiro, n.1823, p.74.
- [3] BRACARENSE, A. Q. & ROGANA, W. G. Fixadores e posicionadores para soldagem robotizada, Revista Soldagem e Inspeção, Brasil, v. 6, n. 2 e 3, p. 23-26 e 9-11, Maio e Junho de 2000.
- [4] CARVALHO, R.S. Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade. 2009. 121 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] SATOSHI, Y. et al., Image Processing and Control of Weld pool in Switch Back Welding without backing Plate, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Japan, v. 23, n. 1 , p. 65-70, 2005.
- [6] NORRISH, J. Advanced welding processes: technologies and process control. 3 ed. Woodhead Publishing in Materials: Cambridge- Inglaterra, 2006. 288 p.
- [7] ANSI/AWS, D1.1/D1.1M-2004: Structural Welding Code Steel, American Welding Society, USA, 2004, 499p.