

**Nova Técnica de Tecimento Aplicado na Soldagem Automatizada de Revestimento das Paredes
Tubulares das Caldeiras de Termoelétricas**

**(New Technique of Weaving Applied in the Automated Welding Covering of Boiler Tube of Walls of
Thermoelectric Power Plant)**

Fernando Costenaro Silva¹, Renon Steinbach Carvalho¹, Jair Carlos Dutra¹, Nelso Gauze Bonacorso²

¹*Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil,
fernando.costenaro@labsolda.ufsc.br, renon@labsolda.ufsc.br, jdutra@labsolda.ufsc.br*

²*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento de Metal Mecânica,
Florianópolis, SC, Brasil, nelso@ifsc.edu.br*

Resumo

Os tubos das caldeiras das usinas termoelétricas sofrem desgastes e o risco de uma ruptura nestes tubos e consequente parada para manutenção cresce com a diminuição de sua espessura. O revestimento destas paredes de tubos por soldagem MIG/MAG de forma automatizada, com ligas de metais nobres, é a solução geralmente utilizada para aumentar a disponibilidade das usinas termoelétricas. Os cordões de solda são executados na direção longitudinal aos tubos com tecimento transversal. Com os atuais manipuladores, que operam com tecimento em apenas um eixo, não se consegue aumentar a amplitude de tecimento para gerar uma quantidade menor de cordões de solda mais largos e baixos. Esta limitação se deve à instabilidade do processo de soldagem devido à variação significativa da distância bico de contato peça (DBCP). Neste contexto, o presente trabalho trata da soldagem automatizada com tecimento produzido por dois eixos. Assim, a trajetória da tocha de soldagem no sentido transversal acompanha o perfil circular do tubo com orientação aproximadamente perpendicular à superfície, proporcionando maior estabilidade ao processo de soldagem e um revestimento de melhor qualidade. Resultados experimentais de revestimentos com aço inoxidável ER309L de 1 mm de diâmetro são apresentados com a finalidade de validar esta promissora técnica de tecimento.

Palavras-chave: *Automação da Soldagem. DBCP. MIG/MAG. Revestimento. Tecimento.*

Abstract: *The tubes of boilers of power plants suffer wear. The risk of a rupture in these tubes and consequent shutdown for maintenance increases with the decrease of its thickness. The overlay of these walls of tubes by automated MIG / MAG welding, with noble metals, is the solution generally used to increase the availability of power plants. The weld beads are performed in the longitudinal direction of the tubes with transverse weaving. With current manipulators, which operate with weaving in only one axis, it is not possible cannot increase the weaving amplitude to generate a smaller amount of weld beads wider and lower. This limitation is due to the instability of the welding process due to significant variation in the contact tip to work distance (CTWD). In this context, this paper deals with automated welding with weaving produced by two axes. Hence, the trajectory of the welding torch in the in the transverse direction follows the circular profile of the tube with orientation approximately perpendicular to the surface, providing greater stability to the welding process and an overlay of better quality. Experimental results overlays with stainless steel ER309L with 1 mm of diameter are presented in order to validate this promising weaving technique.*

Key-words: *Welding Automation. CTWD Control. MIG/MAG. Overlay. Weaving.*

1. Introdução

Cada vez mais, tem-se observado a busca pela otimização e pela automação das técnicas de revestimentos visando melhorar as propriedades mecânicas da superfície com objetivo de incrementar a vida útil de componentes e estruturas. Este ganho de vida útil, por sua vez, reflete em economia devido ao aumento do tempo entre manutenções preventivas e a minimização dos custos relativos às paradas indesejadas e não programadas para substituição total ou parcial de componentes.

Porém, esta tendência não é observada em usinas termoeletricas brasileiras onde as paredes tubulares de suas caldeiras são afetadas por desgaste devido à corrosão provocada pela alta temperatura, por impurezas geradas na queima do carvão e pelos sopradores de vapor, que têm a função de realizar a limpeza das paredes da caldeira [1]. Na maioria das vezes, ocorre a substituição pura e simples dos tubos caracterizando somente manutenção corretiva, Figura 1. A união dos tubos entre si é executada por soldagem TIG manual, uma operação lenta que ocasiona grandes períodos de paralisação das caldeiras. Além disto, estas operações não agregam características de melhorias de resistência contra os mecanismos de falhas [2,3].



Figura 1. Processo manual de recuperação, em (a) corte da parede e em (b) e (c) soldagem TIG de união.

A fim de eliminar tais problemas, a manutenção deve ser de tal natureza que proporcione as paredes das caldeiras melhores condições de resistir às elevadas taxas de corrosão e erosão do que originalmente [4,5]. Esta melhoria de longevidade seria obtida se os tubos das caldeiras fossem revestidos por um material mais resistente aos citados danos. Contudo, executar os revestimentos por operação manual significa uma tarefa difícil, demorada e extremamente dependente da qualificação de soldadores.

O revestimento por soldagem MIG/MAG de forma automatizada é a alternativa natural por apresentar vantagens em relação ao processo manual, tais como: longos períodos de soldagem, melhor uniformidade e qualidade da soldagem e ainda melhor condição de trabalho ao soldador, uma vez que este passa a não mais atuar próximo ao arco elétrico e a geração de fumos e sim, como observador para efetuar eventuais ajustes nos parâmetros do processo de soldagem. A fim de se obter uma menor diluição e geometria mais favorável os revestimentos de tubos de caldeira por soldagem são realizados geralmente com movimentos de tecimento da tocha. Este movimento de oscilação pode ser executado pelo eixo cartesiano y , Figura 2, ou pelo eixo angular α .

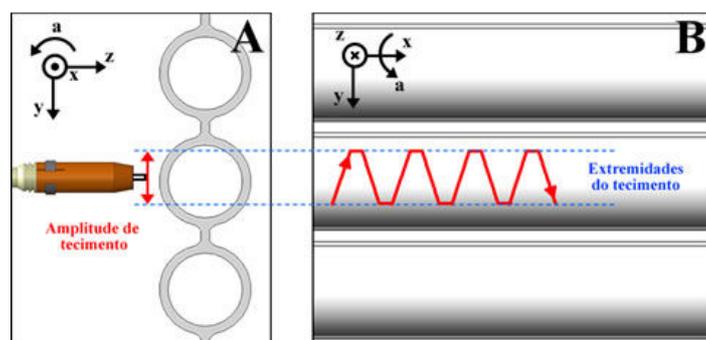


Figura 2 – Trajetória de soldagem com tecimento trapezoidal, em (A) vista de perfil e em (B) vista frontal.

Os atuais manipuladores dedicados ao revestimento de paredes tubulares, pesquisados até o presente momento, não conseguem aumentar a amplitude de tecimento para gerar uma menor quantidade de cordões de solda com melhor qualidade porque operam com tecimento em apenas um eixo, Figura 3. Esta limitação de amplitude se deve à instabilidade do processo de soldagem devido à variação significativa da distância bico de contato peça, DBCP, no ciclo de tecimento.

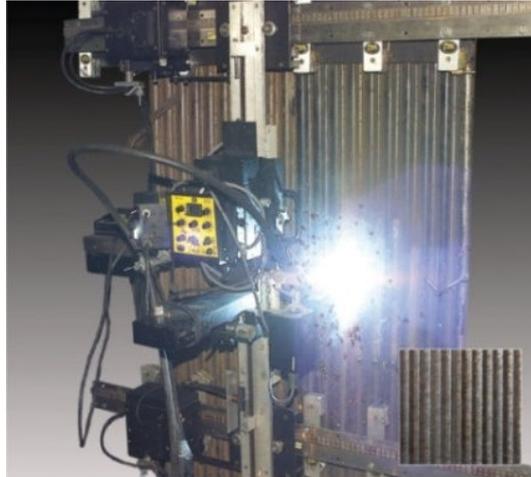


Figura 3. Sistema automático de 4 eixos dedicado ao revestimento de tubos de caldeiras [6]

Existem duas soluções possíveis para resolver este problema de DBCP variável. A primeira solução seria a correção automática da DBCP, atuando no eixo z durante o movimento de tecimento, por meio da realimentação do valor da corrente elétrica do arco [7]. O maior inconveniente desta solução além do alto custo é a maior complexidade dos dispositivos envolvidos nesta tarefa, tais como: sensor de corrente, placas eletrônicas de tratamento de sinais e de controle de posição do eixo z. A segunda opção é investir na programação para produzir tecimento por meio dos movimentos simultâneos dos eixos y e z do manipulador da tocha a fim de se obter DBCP constante. Quando a geometria da superfície a ser revestida é conhecida, como nas paredes tubulares das caldeiras de termoeletricas, a segunda opção de solução é a mais adequada.

2. Técnica de Tecimento Proposta

Manter a DBCP constante para produção de cordões de solda com maior largura é o objetivo desta inovadora técnica de tecimento. A soldagem automatizada de revestimentos de tubos é um dos exemplos típicos de sua aplicação. Esta técnica consiste em produzir o tecimento da tocha de soldagem por meio da movimentação simultânea dos eixos y e z do manipulador. Diferente das técnicas existentes, Figuras 4(A) e 4(B), a trajetória da tocha de soldagem no sentido transversal acompanha o perfil circular do tubo com orientação aproximadamente perpendicular à superfície, Figura 4(C), proporcionando assim maior estabilidade ao processo de soldagem e revestimentos de melhor qualidade.

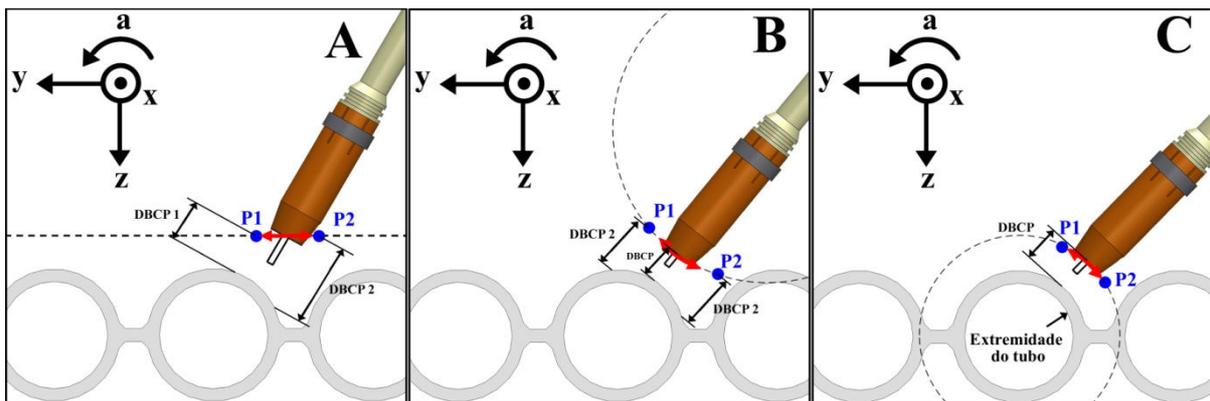


Figura 4 – Eixos envolvidos no tecimento: (A) somente o eixo y, (B) somente o eixo a e em (C) os eixos y e z.

Os experimentos de revestimentos utilizando a nova técnica de tecimento foram realizados na bancada de soldagem implementada no projeto de pesquisa vinculado a empresa de geração de energia elétrica Tractebel [8]. Os principais equipamentos desta bancada, Figura 5, são: em (1) a mini-fonte chaveada de soldagem microprocessada IMC de 300 A com alimentador automático de arame e interface de programação, em (2) o manipulador cartesiano de quatro graus de liberdade, Tartilope V-4, com uma tocha de soldagem MIG/MAG fixada em sua extremidade, ou seja, no flange do eixo angular, em (3) o gabinete eletroeletrônico de acionamento e controle de movimento da tocha, em (4) a interface gráfica de programação do manipulador e em (5) o suporte de fixação dos corpos de prova. Cabe ressaltar, que a base deste suporte é do tipo basculante,

permitindo assim, a execução de cordões de solda nas posições: plana, horizontal, vertical e também sobrecabeça.

Nesse trabalho, os corpos de prova são pedaços de paredes tubulares de aço 16MO3, formados por tubos de 56 mm de diâmetro externo e 5,2 mm de espessura, fixados no suporte basculante com orientação vertical. Na tocha MIG/MAG foi usado uma *DBCP* nominal de 10 mm. O arame de aço inoxidável E-309L de 1 mm de diâmetro foi o material de adição usado no recobrimento das superfícies tubulares.



Figura 5. Bancada basculante para revestimentos de paredes tubulares.

Para possibilitar o tecimento em dois eixos simultâneos foi necessário construir um programa de execução de trajetórias de revestimento para o controlador de movimento do robô CNC. Este novo programa separa em três etapas sequenciais a soldagem automatizada dos tubos de caldeira, Figura 6. A primeira etapa é o passe da membrana (I), no qual é necessário apenas tecimento do eixo *y* devido à condição de paralelismo existente entre a superfície da membrana e o plano *xy* do robô. A segunda etapa é referente à junção membrana-tubo (II), necessária para ancorar os cordões de solda da terceira etapa evitando assim defeitos por falta de fusão entre os respectivos cordões de solda. O cordão de solda desta etapa pode ser executado em apenas um passe linear sem tecimento ou com idêntica amplitude de tecimento nos eixos *Y* e *Z*, inclinação de 45 graus, para produzir um depósito com maior largura.

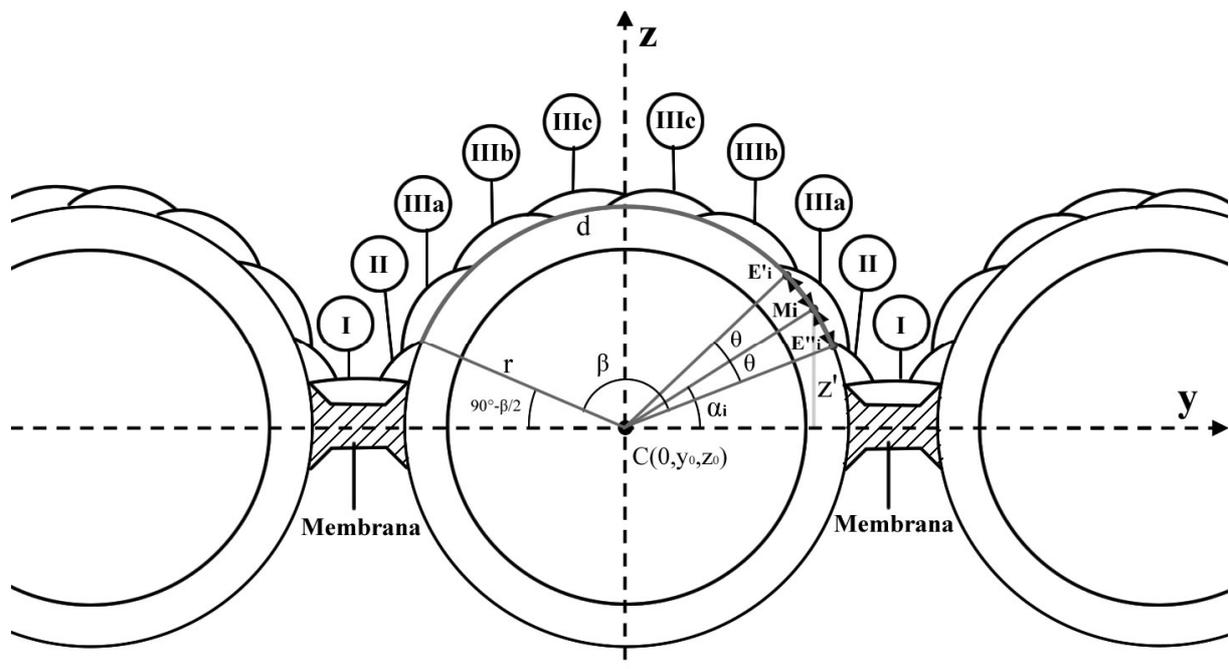


Figura 6 – Estratégia de revestimento implementada no controlador do manipulador CNC.

A seguir é necessário encontrar as coordenadas do ponto central do tubo $C(0, y_0, z_0)$ a fim de determinar a posição de zero peça para os cordões de solda da terceira etapa (III). Para isso, utiliza-se o manipulador como braço de medição posicionando a origem do sistema de coordenadas da tocha na extremidade do arame. Neste caso, a distância existente entre o bico de contato e a extremidade do arame foi ajustada para ser igual à *DBCP* nominal.

Na sequência, são medidos três pontos $P_1(0, y_1, z_1)$, $P_2(0, y_2, z_2)$ e $P_3(0, y_3, z_3)$ em posições distintas sobre a superfície não revestida do tubo. Substituindo as coordenadas destes pontos na equação do círculo externo do tubo (1) obtêm-se um sistema formado por três equações. Por fim, as coordenadas do ponto central do tubo (2) e (3) são obtidas por meio da solução deste sistema de equações [9].

$$(y - y_0)^2 - (z - z_0)^2 = r^2 \quad (1)$$

$$z_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{(z_2^2 - z_1^2 - y_1^2 + y_2^2)(y_3 - y_2) - (z_3^2 - z_2^2 - y_2^2 + y_3^2)(y_2 - y_1)}{(z_2 - z_3)(y_2 - y_1) - (z_1 - z_2)(y_3 - y_2)} \right] \quad (2)$$

$$y_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{z_2^2 - z_1^2 - y_1^2 + y_2^2}{y_2 - y_1} \right) + \left(\frac{z_1 - z_2}{y_2 - y_1} \right) z_0 \quad (3)$$

Com uma trena flexível é medido o comprimento de arco d a ser revestido pelos cordões de solda da etapa 3. Os dados referentes ao raio externo do tubo r e o número de cordões de solda n desejados pelo operador para recobrir o comprimento de arco d são as outras informações fornecidas nesta etapa.

Com base na Figura 6 os ângulos β e θ são determinados pelas equações (4) e (5) respectivamente:

$$\beta = \frac{180 \cdot d}{\pi \cdot r} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{\beta}{2 \cdot n} \quad (5)$$

As coordenadas polares, ângulos α_i , referentes ao ponto central M_i de tecimento de cada cordão de solda são determinadas pela equação (6):

$$\alpha_i = 90^\circ + \left(\frac{2i - n - 1}{2 \cdot n} \right) \cdot \beta \quad ; \text{Com } i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Por fim, as coordenadas cartesianas dos pontos extremos, E'_i e E''_i , e o ponto central M_i de tecimento de cada cordão de solda são definidas pelas seguintes relações (7).

$$\begin{cases} E'_i(0, r \cdot \cos(\alpha_i + \theta), r \cdot \sin(\alpha_i + \theta)) \\ M_i(0, r \cdot \cos(\alpha_i), r \cdot \sin(\alpha_i)) \\ E''_i(0, r \cdot \cos(\alpha_i - \theta), r \cdot \sin(\alpha_i - \theta)) \end{cases} \quad \text{Com } i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Cada conjunto de pontos (E'_i , M_i e E''_i) define o caminho do tecimento na direção do eixo x do respectivo cordão de solda. A variação da *DBCP* no ciclo de tecimento é praticamente nula, pois a trajetória gerada é muito próxima à da circunferência externa do tubo. Para se obter um revestimento com mínima altura sem comprometer-lo por uma excessiva ondulação utilizou-se o critério da mínima superposição dos cordões de solda, ou seja, a distância entre os centros de dois cordões adjacentes é igual a amplitude de tecimento.

3. Resultados

Com o objetivo de validar a metodologia proposta foi realizado depósitos em tubos de raio igual à 28 mm. Após a execução da etapa II, em apenas um passe sem tecimento, foi medido o comprimento do arco a ser revestido pelos cordões de solda da etapa III: $d=53,8 \text{ mm}$. Com seis cordões de solda, $n=6$, para revestir a distância d , foram obtidos nas equações (4) e (5) os respectivos valores para os ângulos $\beta=110^\circ$ e $\theta=9,2^\circ$. A seguir, os valores dos ângulos α_i referentes a localização dos pontos centrais de tecimentos e seus respectivos pontos extremos, foram calculados, equações (6) e (7), em relação ao zero peça, Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos das trajetórias de tecimento dos cordões de solda da etapa 3.

Cordão i	α_i (°)	E''_i (mm)	M_i (mm)	E'_i (mm)
1 - IIIa	44,2	(0,0; 22,9; 16,1)	(0,0; 20,1; 19,5)	(0,0; 16,7; 22,5)
2 - IIIb	62,5	(0,0; 16,7; 22,5)	(0,0; 12,9; 24,8)	(0,0; 8,8; 26,6)
3 - IIIc	80,8	(0,0; 8,8; 26,6)	(0,0; 4,5; 27,6)	(0,0; 0,0; 28,0)
4 - IIIc	99,2	(0,0; 0,0; 28,0)	(0,0; -4,5; 27,6)	(0,0; -8,8; 26,6)
5 - IIIb	117,5	(0,0; -8,8; 26,6)	(0,0; -12,9; 24,8)	(0,0; -16,7; 22,5)
6 - IIIa	135,8	(0,0; -16,7; 22,5)	(0,0; -20,1; 19,5)	(0,0; -22,9; 16,1)

Na sequência, foram geradas as trajetórias da tocha de soldagem com base nos pontos calculados da Tabela 1. A execução dos cordões de solda é realizada seguindo a sequência de etapas I, II, IIIa, IIIb e IIIc de um lado do tubo e posteriormente a mesma ordem do outro lado do tubo. Sendo que somente um cordão da membrana (etapa I) é necessário para ancorar os lados adjacentes de dois tubo, como mostra o cordão da membrana na Figura 6.

A Figura 7 mostra as fotos, vista superior acima e de perfil abaixo, do revestimento obtido com o processo MIG/MAG convencional na posição vertical descendente. A macrografia da seção transversal do tubo com espessura de 5,2 mm, Figura 7 inferior, mostra um revestimento de boa qualidade com diluição de aproximadamente 15,1% e uma altura situada entre 2 mm e 4 mm.

Neste copo de prova foi utilizada uma corrente média de 150 A com velocidade de arame de 5,8 m/min. A mistura, argônio com 25% de CO₂, com vazão de 12,0 l/min, foi o gás de proteção usado. Quanto aos parâmetros relativos ao deslocamento da tocha foi empregado uma velocidade de soldagem de 20 cm/min com tecimento trapezoidal. O referido tecimento foi configurado com uma frequência de 0,6 Hz, um tempo de parada nas extremidades de 0,2 s e amplitude de 8,8 mm, sendo a metade amplitude de tecimento de 4,4 mm o valor correspondente a distância entre os pontos E''_i e M_i ou entre M_i e E'_i .



Figura 7 – Resultado do revestimento MIG/MAG com tecimento simultâneo dos eixos Y e Z.

As Figuras 8 e 9 mostram os gráficos da tensão e da corrente elétrica do arco durante o ciclo de tecimento do cordão 2 (cordão 3b do primeiro quadrante da Figura 6) quando se utiliza respectivamente tecimento simultâneo dos eixos Y e Z, Figura 4(C), e tecimento somente no eixo Y, Figura 4(A). Por meio do oscilograma da Figura 9,

tecimento somente do eixo Y do manipulador, observa-se uma menor estabilidade do arco elétrico em função da variação da frequência de curto-circuito durante o ciclo de tecimento.

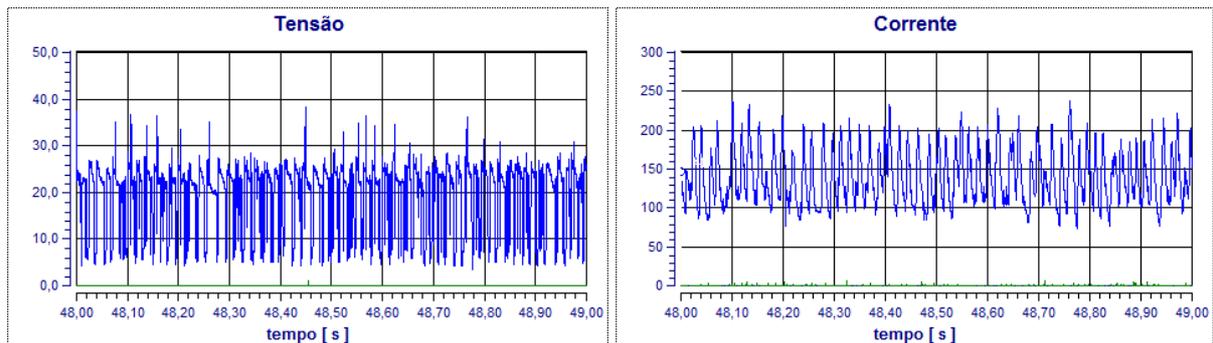


Figura 8 – Oscilogramas para o tecimento simultâneo dos eixos Y e Z do manipulador.

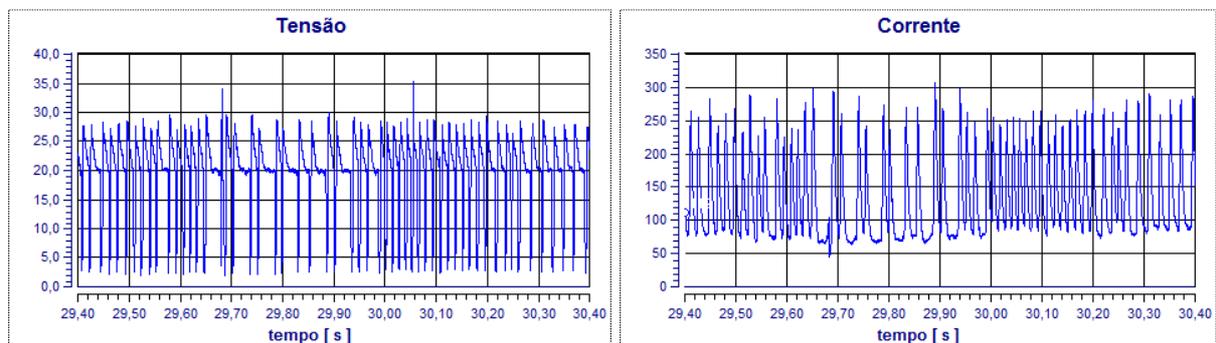


Figura 9 – Oscilogramas para o tecimento somente do eixo Y do manipulador.

4 Conclusão

O revestimento de tubos de caldeira com o tecimento simultâneo dos eixos Y e Z do manipulador proporcionou maior estabilidade da poça de fusão devido à redução significativa da variação da DBCP. Desta forma, foram produzidos uma quantidade menor de cordões de solda com maior largura e melhor qualidade geométrica do que as outras técnicas de tecimento de único eixo.

A solução empregada é de baixo custo por não adicionar sistema externo de controle de DBCP. Foram apenas criadas e adicionadas ao programa do manipulador, rotinas necessárias para o funcionamento desta técnica de tecimento simultâneo dos eixos Y e Z.

A programação do revestimento desejado é considerada de fácil operação, uma vez que o programa do manipulador é responsável por todos os cálculos de localização dos cordões de solda, deixando o operador apenas com a parte de posicionamento inicial da tocha, medição do comprimento de arco a ser revestido e pela verificação da trajetória gerada.

Devido às limitações de velocidade dos motores dos eixos Y e Z do manipulador, não foi possível realizar cordões de solda com frequência de tecimento superiores a 1 Hz para a amplitude utilizada. Assim, sem poder aumentar a velocidade de soldagem os cordões de solda gerados ficaram mais altos que o desejado.

5. Agradecimentos

A toda equipe do LABSOLDA/UFSC pela dedicação e comprometimento com o trabalho realizado, assim como a empresa TRACTEBEL Energia, pelo incentivo a pesquisa e desenvolvimento.

6. Referências Bibliográficas

- [1] TILLEY, R. Inherently Reliable Boiler Component Design – Waterwall Fireside Corrosion. Electric Power Research Institute – EPRI. Final Report 1004324, p. 4-28, Mar. 2003.
- [2] DOOLEY, B. Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures. Electric Power Research Institute – EPRI. CS 3945, p. 4-14.
- [3] COLEMAN, K. Application and Repair of Overlay Welds. Electric Power Research Institute – EPRI. Report 1009755, April 2005.

- [4] BLOGG, N.; BROOKS, R. Innovative Technique Developed as Permanent Solution to Fireside Waterwall Erosion / Corrosion issues within Fossil Fired Boilers - WSE UK and NL. Power Gen Europe 2002.
- [5] BAKER, D. W. C. et al., Estimate of Remaining Life With Waterwall Fire-Side Corrosion. London: CEGB, 1977.
- [6] BUG-O SYSTEMS. All position overlay system. Disponível em: <<http://www.bugo.com/pdf/overlay%20system.pdf>>. Acesso em: 13 de abril de 2010
- [7] Zhu, Jinhong ; Song , Shuzhong; Shi, Hongxin; Lee, Kang Yong. Investigation on Control Strategies for Pulse Gas Metal Arc Welding Process. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04582723>> Acesso em 21 de junho de 2010.
- [8] FELIPPE, L.; DUTRA, J. C. Desenvolvimento de tecnologias e de equipamentos para a recuperação por soldagem de tubos de parede de água de caldeira. P&D ANEEL 0403-006/2005. 2008.
- [9] STEINBRUCH, A. & WINTERLE, P. Geometria Analítica. McGraw-Hill, 1987.