

Adequação do Processo Plasma com Alimentação Automática de Arame para Recuperação de Superfícies por Soldagem Robotizada

(Adaptation of the Plasma Process with Automatic Wire Feeding for Recovery of Surfaces by Automated Welding)

Nelso Gauze Bonacorso¹, Jair Carlos Dutra²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Departamento de Metal Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, nelso@cefetsc.edu.br

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

Resumo

Superfícies danificadas são normalmente recuperadas através de processos de soldagem, possuem na maioria das vezes, geometrias complexas e se localizam em posições desfavoráveis à soldagem. A soldagem robotizada é a alternativa natural por apresentar vantagens em relação ao processo manual, como: redução do tempo e do custo total da recuperação, melhor controle da geometria da superfície recuperada, melhor uniformidade e qualidade da soldagem. A soldagem robotizada através do processo plasma com alimentação automática de arame, embora proporcione excelente qualidade geométrica e superficial dos depósitos, redução significativa dos defeitos de soldagem e ausência de respingos é muito sensível às variações da distância tocha-peça e a mudança de posição de soldagem. Nesse contexto, o presente trabalho trata da análise e das mudanças realizadas no posicionamento do arame em relação ao arco elétrico e ao cordão de solda, na orientação da tocha em relação à superfície a ser soldada e nos parâmetros de soldagem que tornam o processo de soldagem plasma mais robusto diante de alterações geométricas da superfície a ser soldada. Resultados práticos nas situações mais críticas do ponto de vista de soldagem de superfícies danificadas são apresentados com o objetivo de validar estas mudanças propostas no processo plasma alimentado.

Palavras-chave: *Processo Plasma. Recuperação de Superfícies. Soldagem Robotizada.*

Abstract: *Damaged surfaces are recovered usually through welding processes, they possess complex geometries most of the time and they are located in unfavorable positions to the welding. Automated welding is the natural alternative for presenting advantages in relation to the manual process, as: reduction of the time and of the total cost of the recovery, better control of the geometry of the recovered surface, better uniformity and quality of the welding. The automated welding through the plasma process with automatic wire feeding although it provides excellent geometric and superficial quality of the deposits, significant reduction of the welding defects and free of spatter is very sensitive to variations of the torch-piece distance and the change of welding position. In that context, the present work treats of the analysis and of the changes accomplished in the positioning of the wire in relation to the electric arc and to the weld beads, in the orientation of the torch in relation to the surface to be welded and in the welding parameters that turn the plasma welding process more robust due to geometric alterations of the surface to be welded. Practical results in the situations more critics of the point of view of welding of damaged surfaces are presented with the objective of validating these changes proposed in the fed plasma process.*

Key-words: *Plasma Process. Recovery of Surfaces. Automated Welding.*

1. Introdução

O processo de soldagem plasma foi criado, em meados dos anos 60, a partir da adaptação do processo a arco plasma para operação de corte. Este processo de soldagem por ser mais complexo e envolver um número maior de equipamentos e

consumíveis que o processo MIG é empregado normalmente em situações onde há muita responsabilidade nas uniões de peças e recobrimentos de superfícies, ou seja, soldagem sem defeitos e com excelente qualidade geométrica e superficial [1,2]. Cabe salientar que para atingir estas características é imprescindível que, além da seleção adequada dos parâmetros de soldagem, se tenha também o total controle sobre os parâmetros da trajetória de soldagem: velocidade, posição e orientação da tocha [3,4].

(Recebido em 11/07/2007; Texto Final em 26/09/2007).

Atualmente, com o aumento cada vez mais do nível de qualidade exigido na recuperação de superfícies danificadas e com o crescente avanço da eletrônica, gerando grande oferta de fontes de soldagem, módulos motorizados e robôs manipuladores dedicados à tarefa de deposição de material por soldagem, o processo plasma com alimentação automática de arame desponta como uma alternativa bastante competitiva. Este processo de soldagem, além de proporcionar excelente qualidade dos depósitos e ausência de respingos, possui ainda a característica de aquecimento sem deposição de material. Esta propriedade é fundamental na refusão de reparos já realizados com o objetivo de melhorar sua condição superficial e também no preaquecimento de superfícies a serem soldadas.

Entretanto, problemas na soldagem, como imperfeições geométricas no cordão de solda e excesso de respingos, surgem quando pequenas variações na distância, entre tocha e peça (*DTP*), são realizadas na posição de soldagem sobrecabeça. Estes problemas de soldagem ocorrem quando a fusão da extremidade do arame acontece afastada da poça de fusão em função de um pequeno aumento da *DTP*. Nesta condição, o jato plasma não consegue vencer a força da gravidade para lançar as gotas fundidas para a poça de fusão e, sendo assim, essas gotas deixam de compor o cordão de solda para formar respingos e salpicos.

Existem duas soluções possíveis para resolver problemas de soldagem desta natureza. A primeira solução seria a correção automática da *DTP*, durante a trajetória de soldagem, através da realimentação da tensão do arco elétrico [5]. O inconveniente desta solução é que os robôs manipuladores com juntas rotacionais disponíveis no mercado não possuem plataforma aberta de modo que se possa corrigir os pontos da trajetória durante a execução do cordão de solda. A segunda opção é investir em melhorias no processo de soldagem plasma, com alimentação automática de arame, que o torne robusto diante de variações da *DTP* e mudanças de posição de soldagem durante a recuperação de superfícies danificadas. Nesta direção, o presente trabalho tem como objetivo estudar a orientação da tocha em relação à superfície a ser soldada e o posicionamento do arame em relação ao arco elétrico e ao cordão de solda.

2. Materiais e Métodos

Optou-se em usar neste trabalho a mesma tocha plasma de soldagem manual utilizada por Oliveira [6] que, no âmbito de seu trabalho, desenvolveu os elementos mecânicos necessários para a entrada automática do material de adição, conforme mostra a Figura 1. A origem do sistema de coordenadas desta tocha, Figura 2, foi posicionada no centro da seção circular do arco plasma e distante de 8 mm do bocal constritor. Cabe salientar, que esta distância corresponde ao valor nominal da *DTP* e, ainda, central à faixa na qual se consegue realizar depósitos. Os ângulos de giro ao redor dos eixos x_t , y_t e z_t do sistema de coordenadas da tocha definem respectivamente a orientação da tocha em relação a superfície a ser soldada e ao cordão de solda em execução [7].

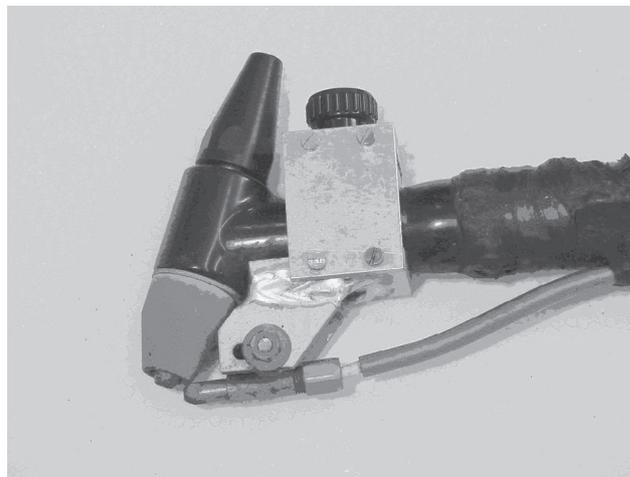


Figura 1. Tocha plasma com direcionador de arame

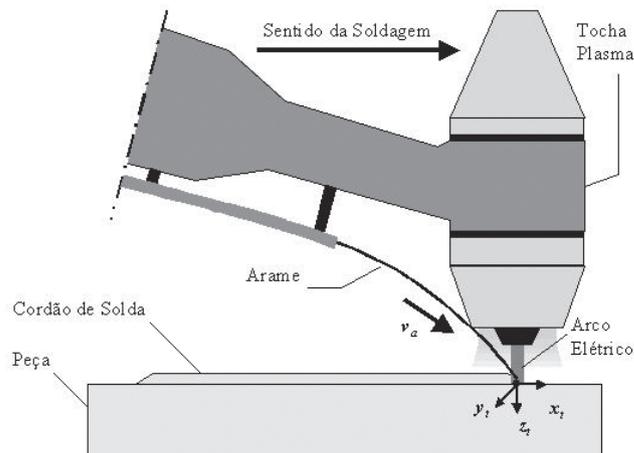


Figura 2. Posição e orientação do sistema de coordenadas da tocha plasma

Os experimentos foram realizados na bancada de soldagem plasma implementada no projeto Roboturb [8]. Os principais equipamentos desta bancada, Figura 3, são: um robô de seis graus de liberdade Reis RV-15, uma fonte de soldagem microprocessada MTE Digitec 600, um módulo plasma IMC, uma tocha plasma manual PWH-4A 70° adaptada para soldagem robotizada com alimentação automática de arame e o suporte flexível para fixação dos corpos de prova. Na tocha plasma foi usado um recuo de 0,8 mm no eletrodo, um orifício constritor de 3,7 mm e uma *DTP* nominal de 8 mm. Argônio, com vazão de 2,0 l/min, foi o gás de plasma usado, enquanto que a mistura, argônio com 3 % de CO_2 , com vazão de 10,0 l/min foi o gás de proteção utilizado.

Os corpos de prova empregados de aço 1020 eram refrigerados, do lado oposto da recuperação, por um trocador de calor por onde circula água. A idéia é evitar o aquecimento excessivo da superfície recuperada pelo aporte de calor do arco elétrico em um corpo de prova pequeno. O material de adição usado no recobrimento das superfícies foi o arame de

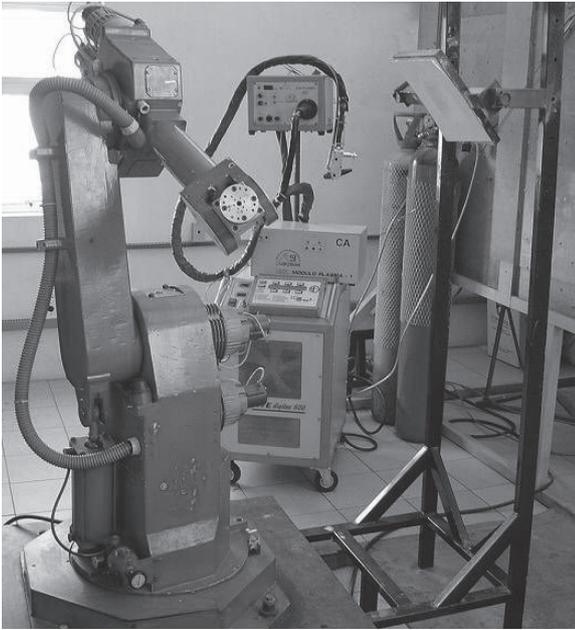


Figura 3. Bancada plasma para soldagem de superfícies

aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro.

Com o objetivo de minimizar o trabalho de esmerilhamento após a tarefa de soldagem foi adotado, além da inspeção visual, o seguinte critério geométrico de aprovação do revestimento: a ondulação máxima das camadas depositadas não deve ser maior que um terço da altura dos cordões de solda. A avaliação dos revestimentos foi também realizada por radiografia com a finalidade de detectar descontinuidades nos corpos de prova soldados.

Na posição de soldagem sobrecabeça existem várias possibilidades de escolha da direção de confecção dos cordões de solda. Porém, cada direção necessita um conjunto específico de parâmetros de soldagem. A direção horizontal foi à escolhida por apresentar a melhor estabilidade da poça de fusão e menor possibilidade de incidência de defeitos de soldagem.

A primeira providência tomada na direção de tornar o processo de soldagem mais robusto em relação a variação na *DTP* foi a diminuição do ângulo de incidência do material de adição θ no arco elétrico. A Figura 4 mostra, à

esquerda, a antiga técnica onde o arame é introduzido quase perpendicular ao arco elétrico e, à direita, a nova estratégia na qual o arame penetra com um menor ângulo em relação ao jato plasma.

A soldagem robotizada através do processo plasma, com alimentação automática de arame, possui total liberdade no que diz respeito ao posicionamento do arame em relação ao cordão de solda. A Figura 5 mostra os quatro principais posicionamentos. Nos posicionamentos (a) e (b), ambas as componentes da velocidade do arame, v_{ax} e v_{ay} , são perpendiculares à direção de soldagem. Nos posicionamentos (c) e (d) apenas a componente v_{ay} da velocidade do arame é perpendicular à direção de soldagem. Destes quatro tipos principais de posicionamento do arame, em relação ao cordão de solda, apenas o tipo (d) possui a componente da velocidade do arame v_{ax} no mesmo sentido da velocidade de soldagem v_s . Esta característica facilita o deslocamento da poça de fusão, no sentido da velocidade de soldagem e contribui com a geometria do cordão de solda, através do aumento da largura e diminuição da altura. Além disso, toda à frente do arco elétrico, neste tipo de posicionamento, fica livre para fundir somente o metal base. Com base nestas considerações e nos experimentos de soldagem realizados para diferentes posicionamentos do arame em relação ao cordão de solda, o posicionamento tipo (d) foi empregado nos recobrimentos apresentados neste trabalho.

A orientação da tocha é definida, neste trabalho, através dos ângulos $\theta 1$ e $\theta 2$ entre a tocha e a superfície a ser soldada, conforme mostra a Figura 6. O ângulo $\theta 1$ define a inclinação da tocha em relação ao sentido de execução dos cordões de solda, enquanto que, o ângulo $\theta 2$ indica a inclinação da tocha em relação a direção perpendicular à execução dos cordões de solda. Outra providência tomada foi de usar um ângulo $\theta 1$ positivo, mais precisamente, $\theta 1$ igual a $7,5^\circ$, com o objetivo de se obter pequena penetração e cordões de solda mais largos. Este valor foi obtido por meio de inspeção visual da localização da transferência metálica na poça de fusão durante experimentos de soldagem realizados para diferentes valores de ângulo $\theta 1$. O ângulo $\theta 2$ está relacionado principalmente com a união entre os cordões de solda, ou seja, é o ângulo de inclinação da tocha de soldagem em relação ao plano formado pela reta

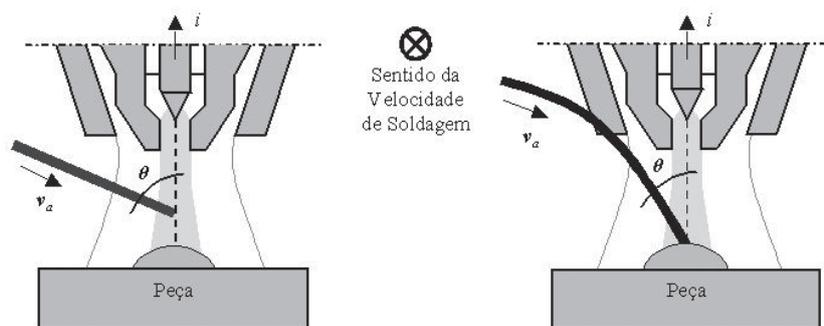


Figura 4. Ângulo de incidência do arame nas técnicas: antiga à esquerda e nova à direita

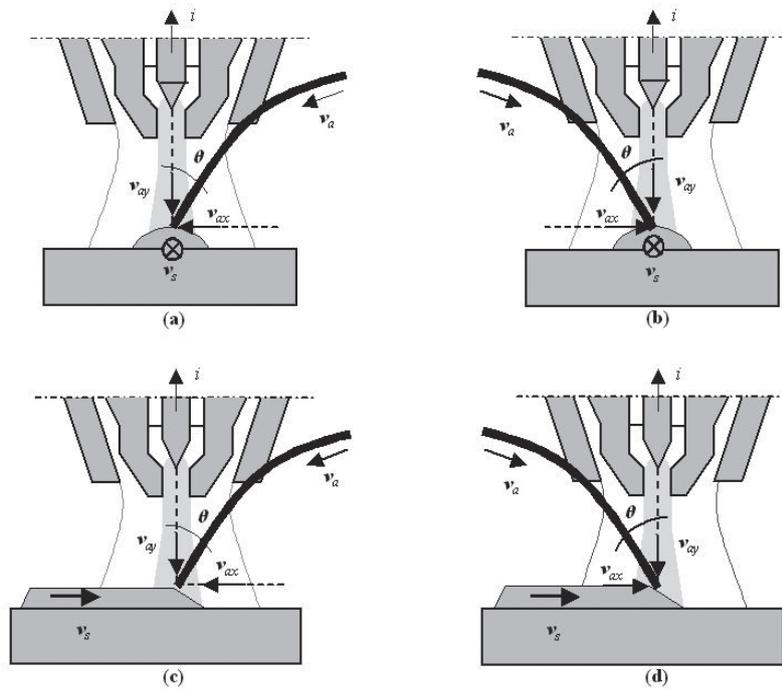


Figura 5. Principais tipos de posicionamento do arame em relação ao cordão de solda

normal à superfície da peça e o eixo da trajetória do cordão de solda. Quando o ângulo $\theta 2$ assume valores positivos, o jato plasma se inclina e há risco de se ter falta de fusão na base dos cordões de solda. Por outro lado, quando o ângulo $\theta 2$ assume valores negativos, a região de superposição dos cordões de solda aumenta e conseqüentemente ocorre um incremento na altura da camada depositada. Diante destas duas situações problemáticas e com base nos depósitos experimentais realizados em laboratório, optou-se em manter nulo o ângulo $\theta 2$.

3. Resultados e Discussão

Um dos maiores desafios, deste trabalho, foi o de obter um conjunto de parâmetros de soldagem que permitisse realizar depósitos na posição sobrecabeça com direção horizontal, em uma larga faixa de inclinação em relação ao

plano horizontal e, ao mesmo tempo, garantisse uma elevada taxa de fusão. O ponto de partida para este desafio foram os parâmetros de soldagem utilizados no trabalho de Oliveira [6], para o arame maciço de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro. Na posição sobrecabeça, Oliveira utilizou velocidade de soldagem de 2,4 mm/s e corrente pulsada de 200 A de pulso e 60 A de base. A frequência de pulsação foi de 1 Hz e com tempos de pulso e de base de 0,5 ms. A velocidade do arame foi também pulsada entre 3,4 m/min e zero, produzindo uma taxa de fusão de 0,91 kg/h.

Com a nova estratégia, θ em torno de 30° , foi possível realizar depósitos com segurança na posição sobrecabeça à 45° com o plano horizontal em uma faixa de 6 à 10 mm de afastamento entre a tocha e a peça. A Figura 7 apresenta seis cordões de solda executados, com os parâmetros de Oliveira [6] citados anteriormente, de acordo com este novo posicionamento do arame em relação ao arco elétrico. O primeiro cordão de solda, localizado na posição inferior, foi

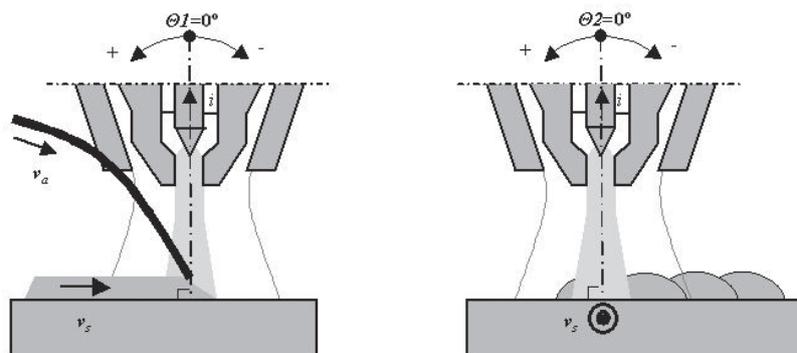


Figura 6. Ângulos de orientação da tocha

realizado com uma *DTP* de 6 mm, o segundo cordão de solda, situado ligeiramente acima do primeiro, foi confeccionado com uma *DTP* de 7 mm e assim sucessivamente. Apenas no último cordão de solda, localizado na parte superior da figura e executado a uma *DTP* de 11 mm, surgiram respingos e salpicos.

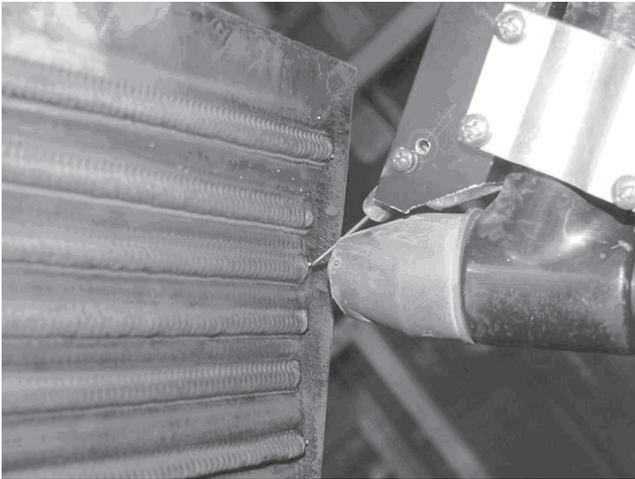


Figura 7. Variação da *DTP* na nova estratégia de posicionamento do arame

Foi possível estabelecer, com as melhorias descritas anteriormente relativas à orientação da tocha de soldagem em relação à superfície a ser soldada e ao posicionamento do arame em relação ao arco elétrico e ao cordão de solda, um novo conjunto de parâmetros de soldagem para o arame E-309L na posição sobre cabeça. Vários ganhos foram obtidos para o processo com este novo conjunto de parâmetros: (a) com uma nova frequência de pulsação de 5 Hz e razão cíclica de 0,5 obteve-se um cordão de solda com melhor acabamento superficial; (b) uma nova corrente média de 160 A, 120 A de base e 200 A de pulso, permitiu um incremento na velocidade do arame para 2,1 m/min e, conseqüentemente, um aumento na taxa de fusão para 1,12 kg/h; (c) a velocidade do arame deixou de ser intermitente para ser contínua, reduzindo desta forma, o desgaste dos elementos responsáveis pela introdução do arame.

A Figura 8 mostra três cordões de solda depositados com velocidade de soldagem de 2,4 mm/s sobre o material de base, chapa de aço carbono 1020, de acordo com os novos parâmetros estabelecidos. Estes cordões de solda foram executados na posição sobre cabeça e em seqüência, da localização inferior em direção a superior desta figura, com os respectivos ângulos entre o corpo de prova e o plano horizontal: 20°, 45° e 70°. A Figura 9 apresenta, de forma correspondente, a seção transversal destes três cordões de solda, onde se pode observar uma insignificante alteração de geometria em função da inclinação do corpo de prova em relação ao plano horizontal. A robustez dos parâmetros de soldagem, juntamente com as melhorias realizadas no posicionamento do arame e na orientação da tocha, proporcionou um excelente acabamento superficial, uma penetração rasa e uma relação largura/altura de 2,7 nos cordões de solda efetuados.

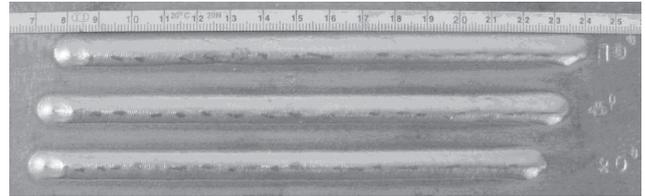


Figura 8. Soldagem sobre cabeça com diferentes inclinações

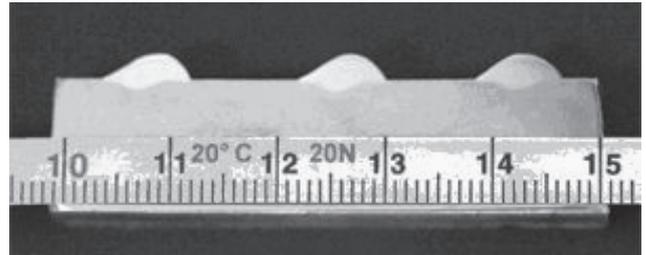


Figura 9. Seção transversal dos cordões de solda da Figura 8

A Figura 10 mostra um depósito, de ótima qualidade, realizado com este conjunto de parâmetros, com distância entre cordões de solda de 4,5 mm na posição sobre cabeça a 45° com o plano horizontal. O depósito obtido possui uma altura média de 3,5 mm e uma ondulação máxima menor que 1,0 mm. Foi verificado que a situação que produzia uma superfície mais lisa possível era com o critério da superposição de 50%. Isto significa que cada cordão de uma mesma camada era executado com o seu eixo sobre o limite (pé) do cordão anterior. Nas camadas subseqüentes, os cordões foram executados com o seu eixo sobre o vale entre os cordões da camada anterior, mantendo-se os 50% de superposição entre os cordões. Esta estratégia foi empregada em todos os recobrimentos apresentados neste trabalho.

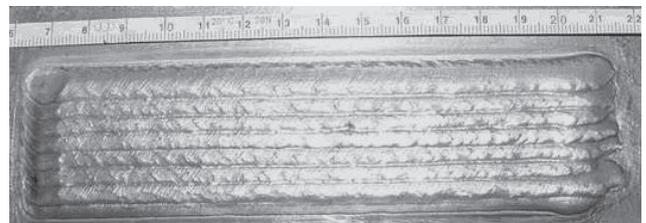


Figura 10. Uma camada depositada com arame E-309L na posição sobre cabeça à 45°

No recobrimento de superfícies através da fusão do arame de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro sobre o próprio aço inoxidável, alguns dos parâmetros de soldagem devem ser alterados em função da diferença de condutibilidade térmica existente entre este material e o aço carbono 1020. Neste caso, as correntes de pulso e de base foram respectivamente reduzidas para valores: 180 A e 100 A. A Figura 11 apresenta um depósito, constituído de duas camadas sobre uma chapa plana de aço carbono 1020,

realizado também na posição sobrecabeça à 45° com o plano horizontal. A segunda camada deste depósito, também de excelente qualidade, foi executada com os parâmetros de corrente modificados.



Figura 11. Duas camadas depositadas com arame E-309L na posição sobrecabeça à 45°

Com o objetivo de validar as alterações propostas no processo de soldagem plasma alimentado, foi confeccionado um corpo de prova em aço 1020 por uma fresadora CNC, com características geométricas semelhantes às superfícies danificadas encontradas em rotores de turbinas hidráulicas de grande porte. A geometria do corpo de prova, Figura 12, foi definida com base em um molde de argila conformado a partir de uma superfície danificada de uma pá de turbina hidráulica. O corpo de prova possui 300 mm de comprimento, 250 mm de largura e 33 mm de espessura máxima, enquanto, que as dimensões máximas da cavidade a ser preenchida por soldagem, eram de 160 mm de comprimento, 120 mm de largura e 8,5 mm de profundidade. Sendo assim, para realizar a recuperação da região danificada do corpo de prova foram necessárias três camadas de solda, uma vez que, a altura média de cada camada de solda é de 3,5 mm. A seguir, este corpo de prova foi fixado, conforme mostra a Figura 3, na posição sobrecabeça com uma inclinação de 45° em relação ao plano horizontal. Nesta condição, foram depositados os cordões de solda das três camadas, Figura 13, de acordo com as trajetórias de soldagem geradas pelo algoritmo computacional desenvolvido para recuperação de superfícies danificadas [7]. Na essência, este programa gera as trajetórias de soldagem de cada camada em função do volume existente entre a superfície danificada do corpo de prova e a respectiva superfície original reconstruída. Por sua vez, a descrição matemática destas superfícies é realizada com base nos pontos obtidos da medição automatizada inicial da superfície do corpo de prova pelo sensor óptico a laser tipo “folha de luz” com três linhas.

Uma radiografia foi realizada com o objetivo de detectar discontinuidades, como trincas, poros, inclusão de escória e falta de fusão, no corpo de prova soldado. Este ensaio não-destrutivo, apenas revelou, em toda a região soldada, insignificante quantidade de pequenos poros. Do ponto de vista da natureza, do tamanho e da quantidade de discontinuidades presentes nesta radiografia, o depósito realizado por soldagem plasma, apresentado na Figura 13, é considerado aceitável.

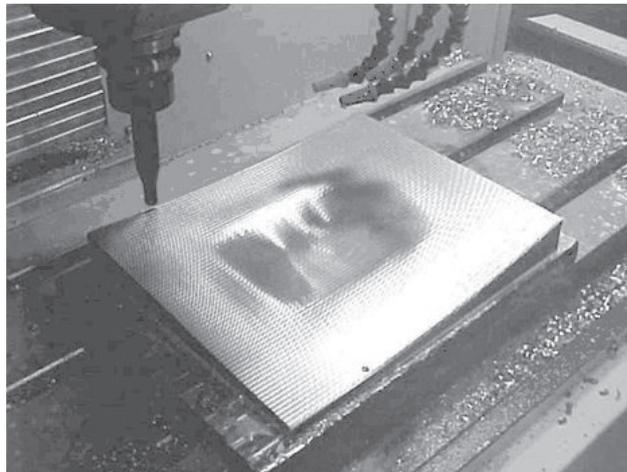


Figura 12. Corpo de prova usinado

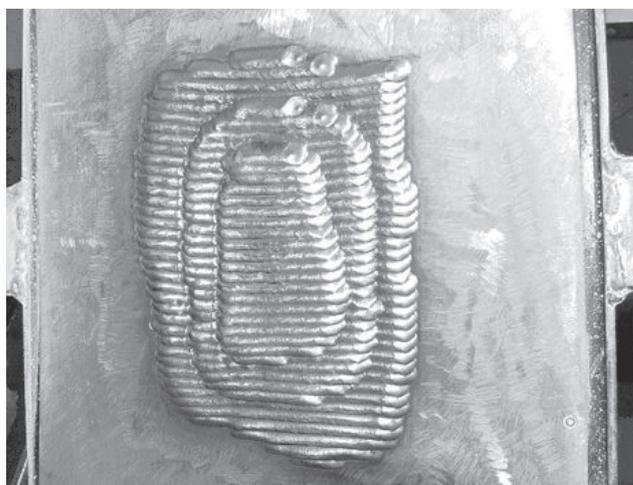


Figura 13. Camadas de solda depositadas no corpo de prova

4. Conclusões

O processo plasma com alimentação automática de arame foi testado em várias situações críticas do ponto de vista da soldagem de superfícies danificadas, tais como: na posição sobrecabeça, faixa de 20° à 70° entre o corpo de prova e o plano horizontal, e em diferentes distâncias entre tocha e peça, faixa de 6 mm à 10 mm. Os resultados obtidos nestas situações críticas, através das melhorias realizadas e dos parâmetros de soldagem ajustados, proporcionou a este processo a robustez e a repetitividade desejada para a realização de múltiplas camadas de deposição com aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro sobre superfícies planas e livres de aço carbono 1020.

Os cordões de solda, produzidos após a adequação deste processo de soldagem, possuem características geométricas apropriadas para a tarefa de revestimento de superfícies, tais como: penetração rasa, superfície praticamente lisa e boa relação dimensional: 9,5 mm de largura por 3,5 mm de altura.

A superposição de 50% dos cordões de solda proporcionou uma ondulação máxima menor que 1,0 mm nas camadas de solda atendendo, desta forma, o critério adotado para aprovação geométrica do revestimento. Essas camadas de solda são também aceitáveis do ponto de vista das descontinuidades, possuem excelente aspecto visual e são isentas de respingos e salpicos.

As mudanças implementadas no posicionamento do arame em relação ao arco elétrico, no posicionamento do arame em relação ao cordão de solda, na orientação da tocha em relação à superfície a ser soldada e nos parâmetros de soldagem proporcionaram um aumento de 23 % na taxa de fusão em relação à técnica desenvolvida por Oliveira [6].

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro recebido da UFSC, LACTEC, COPEL e FURNAS no desenvolvimento deste trabalho dentro do projeto Roboturb.

6. Referências Bibliográficas

- [1] CRAIG, E. The Plasma Arc Process - A Review. *Welding Journal*, USA, v.68, n.2, p.19-25, February 1988.
- [2] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: processos e metalurgia*. Edgard Blücher: São Paulo, 1992, 494 p.
- [3] ROSÁRIO, J.M. *Princípios de Mecatrônica*. 2.ed. Pearson Prentice Hall: São Paulo, 2005, 356 p.
- [4] PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJÖ, G. *Welding Robots: technology, system issues and applications*. 1 ed. Springer, 2005, 200 p.
- [5] COOK, G. E. *Robotic Arc Welding: research in sensory feedback control*. IEEE, *Transactions of Industrial Electronics*, v. IE-3, n.3, p.252-268, 1983.
- [6] OLIVEIRA, M.A. *Estudo do Processo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame, Visando sua Utilização em Revestimentos Metálicos*. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, 2001.
- [7] BONACORSO, N.G. *Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte*. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis, 2004.
- [8] GONÇALVES JUNIOR, A. A. *Sistema Automatizado para Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte*. Projeto Ministério da Ciência e Tecnologia – PADCT – CDT, UFSC, Florianópolis, 1998.