

Desenvolvimento dos Processos TIG/Plasma alimentados automaticamente para aplicação manual em reparos de cavitação em turbinas hidráulicas

J. C. Dutra, LABSOLDA/UFSC, F. Ribas, Tractebel Energia, M. A. Oliveira, LABSOLDA/UFSC, R. Gohr Jr, LABSOLDA/UFSC e R. H. G. Silva, LABSOLDA/UFSC

Resumo- Uma das linhas de pesquisa do laboratório de soldagem da UFSC (LABSOLDA) é recuperação de pás de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação. Os estudos iniciados com a participação da ELETROSUL (hoje TRACTEBEL), conduziram o desenvolvimento de procedimentos e equipamentos de soldagem que hoje fazem parte da rotina empregada na recuperação de todas as turbinas hidráulicas da empresa acometidas pelo problema da cavitação. O sistema desenvolvido culminou na técnica de soldagem MIG/MAG Pulsada com Pulsção Térmica, melhorando a performance da deposição de material e no desenvolvimento de procedimentos de soldagem. Nesta linha, apresenta-se aqui o trabalho de P&D dos processos TIG e Plasma com alimentação automática do arame, objetivando a geração de conhecimento científico e tecnológico sobre estes processos, com vistas à otimização e aumento da flexibilidade na recuperação por soldagem de pás cavitadas de turbinas hidráulicas. Como resultado, surgem softwares, equipamentos e procedimentos dedicados a esta aplicação.

Palavras-chave—soldagem, cavitação, reparo, erosão, equipamento.

I. INTRODUÇÃO

Turbinas hidráulicas de grande porte (Fig.1) apresentam o fenômeno da **erosão por cavitação** (Fig.2), pois, apesar de grandes avanços nas técnicas de modelamento numérico em mecânica dos fluidos, ainda não se consegue evitar definitivamente o problema. Nas turbinas mais antigas, que ainda estarão em operação por pelo menos meio século, este problema é mais intenso, sendo economicamente inviável e tecnicamente complexa a substituição das mesmas. Desse modo, o processo de erosão deve ser mantido sob controle, o que é efetuado por deposição de material utilizando processos de soldagem, onde são necessárias quantidades da

ordem de 1000 kg de ligas especiais de aço inoxidável por turbina.

Normalmente as regiões erodidas ocorrem em posições bastante desfavoráveis à soldagem, tanto do ponto de vista de conforto para o soldador, como de adesão do metal fundido em transferência do eletrodo à superfície da turbina.

A qualificação do procedimento de soldagem torna-se um ponto crítico do trabalho. Se isto não for conduzido com rigorosos critérios, a deposição de material pode até ser realizada com grande produtividade, através da utilização do processo MIG/MAG, mas a resistência à cavitação do material reposto pode estar muito abaixo das especificações. Um ponto crítico na qualidade do depósito é o aparecimento de porosidades, as quais são pontos nucleantes ao início do arrancamento de material pelo fenômeno da cavitação. Testes de laboratório têm mostrado forte dependência entre a homogeneidade da superfície e a resistência à cavitação. Tanto o aparecimento de porosidades, como as deficiências de homogeneidade têm sua maior dependência na forma com que o material do eletrodo se funde e se deposita na peça.



Fig. 1- Soldadores entre as pás de uma turbina hidráulica da Unidade Geradora de Salto Santiago –

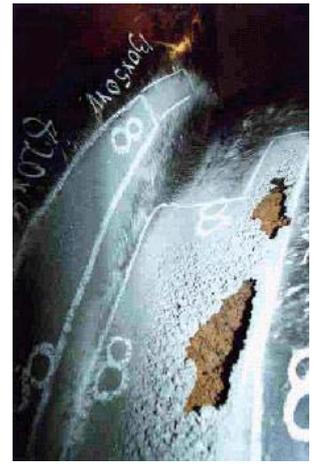


Fig. 2- Detalhe de uma região cavitada.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pela empresa TRACTEBEL Energia (antiga ELETROSUL) e ANEEL.

J. C. Dutra trabalha no Laboratório de Soldagem da UFSC (e-mail: jdutra@labsolda.ufsc.br).

F. Ribas trabalha na Tractebel Energia (e-mail: fribas@tractebelenergia.com.br).

M. A. Oliveira trabalha no Laboratório de Soldagem da UFSC (e-mail: moises@labsolda.ufsc.br).

R. Gohr Jr trabalha no Laboratório de Soldagem da UFSC (e-mail: rgj@labsolda.ufsc.br).

R. H. G. Silva trabalha no Laboratório de Soldagem da UFSC (e-mail: regis@labsolda.ufsc.br).

A empresa ELETROSUL, estatal brasileira de geração de energia e hoje empresa privada, TRACTEBEL Energia, executava as recuperações das regiões cavitadas, utilizando eletrodos revestidos de aço inoxidável e, posteriormente

com eletrodos revestidos à base de cobalto. Em ambos os casos, a produtividade era muito baixa e, por isso, houve a necessidade de se passar para a utilização de arames tubulares contínuos pelo processo MIG/MAG. Entretanto, a empresa encontrou sérias dificuldades com a soldabilidade com esses arames, acarretando em baixa produtividade e elevado tempo de reparo.

A solução veio de um projeto cooperativo com o LABSOLDA/UFSC, do qual surgiu o processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica (Patente: Privilégio e Inovação. n. PI0004698-1) [1], hoje adotado como padrão pela TRACTEBEL nas atividades de recuperação de pás cavitadas de suas turbinas hidráulicas. Vale lembrar que este desenvolvimento levou o LABSOLDA a ser o vencedor do prêmio FINEP de Inovação Tecnológica 1999 [2]. O depoimento do Eng. Fernando Ribas, desta empresa, relata o ganho obtido

(http://www.labsolda.ufsc.br/reconhecimento/tractebel_menor.mpg).

Com a experiência adquirida acerca do problema e da aplicação da soldagem a arco na recuperação das pás cavitadas, o LABSOLDA, numa abordagem de melhoria contínua, vislumbrou a possibilidade, e necessidade, de se estudar o desempenho de outros processos. Dado o *know how* da equipe em desenvolvimento de tecnologia de soldagem, decidiu-se por explorar os processos TIG e Plasma alimentados automaticamente para a aplicação em questão.

São descritos, então, os estudos e procedimentos conduzidos durante o desenvolvimento dos processos TIG e PLASMA com alimentação automática de arame para aplicação em reparos de cavitação de turbinas hidráulicas.

Os estudos foram iniciados no mês de julho de 2000, através de consulta à literatura, construção de uma bancada de ensaios e estabelecimento de uma infraestrutura laboratorial. Em seguida, foram feitos sucessivos depósitos de material em laboratório, testes com ensaios não destrutivos e treinamento de pessoal. A última etapa do desenvolvimento foi a aplicação de campo, realizada na Usina Hidrelétrica de Salto Osório, máquina n. 1, pá de n. 13, no período de 19 a 24 de novembro de 2001.

II. PROCESSO TIG - DESENVOLVIMENTOS

A. Equipamentos utilizados, desenvolvidos e adaptados

A.1 – Suporte Direcionador de Arame Adaptado à Pistola TIG.

Algumas exigências foram determinadas para a elaboração do projeto mecânico do suporte direcionador de arame para a pistola TIG [3]:

- O suporte deveria ser leve, para possibilitar a operação manual sem exigência de esforço excessivo do soldador;
- Deveria apresentar determinados graus de liberdade de movimento, promovendo um posicionamento do arame de forma rápida e segura;
- Boa rigidez para garantir a manutenção do correto posicionamento do arame em relação ao arco voltaico;
- Permitir manutenção da tocha sem desmontar o suporte direcionador.

De acordo com as exigências listadas acima, foi projetado e confeccionado um protótipo do suporte direcionador do arame para pistola TIG (Fig. 3).



Fig. 3 – Tocha TIG Adaptada com Suporte Direcionador de Arame [3].

A.2 – Cabeçote Alimentador de Arame STA-TIG

O STA-TIG (Fig. 4) foi desenvolvido no LABSOLDA para permitir a soldagem TIG e PLASMA com alimentação automática de arame. Este equipamento é capaz de tracionar arames bobinados de diversas bitolas e de diferentes materiais, com velocidades constantes ou pulsadas que variam entre 0,5 e 10,0 m/min.

O STA-TIG apresenta as seguintes características:

- Indicador de Velocidade Instantânea do Arame, na unidade de metros por minuto (m/min);
- Rampas de aceleração e desaceleração da velocidade do arame;
- Pedal para interrupção da alimentação do arame durante a soldagem, sem necessidade de extinção do arco voltaico;
- Permite tanto alimentação de arame à velocidade constante quanto à velocidade pulsada;
- Permite ajuste contínuo das velocidades do arame (base e pulso) na soldagem com corrente pulsada;
- Garante o sincronismo entre os pulsos de velocidade de arame e os pulsos de corrente durante a soldagem pulsada.



Fig. 4 – Sistema Tracionador de Arame para o Processo TIG – STA-TIG.

B. Estudos na Taxa de Deposição do Arame em Função da Corrente no Processo TIG com Alimentação Automática de Arame

Durante o estudo do processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame foi feito um levantamento da relação entre a corrente de soldagem e a taxa de alimentação de arame. Este estudo foi realizado utilizando aço carbono comum e arame tubular ligado ao cobalto de estrutura final austenítica (CAVITEC) como metais de adição.

A taxa de alimentação de arame foi medida em função da corrente de soldagem e em função da energia total do arco (corrente x tensão). A análise destes dados mostra que o processo de soldagem TIG alimentado automaticamente apresenta uma taxa de produção menor que a do processo MIG/MAG, quando a corrente é utilizada como parâmetro de comparação (Fig. 5).

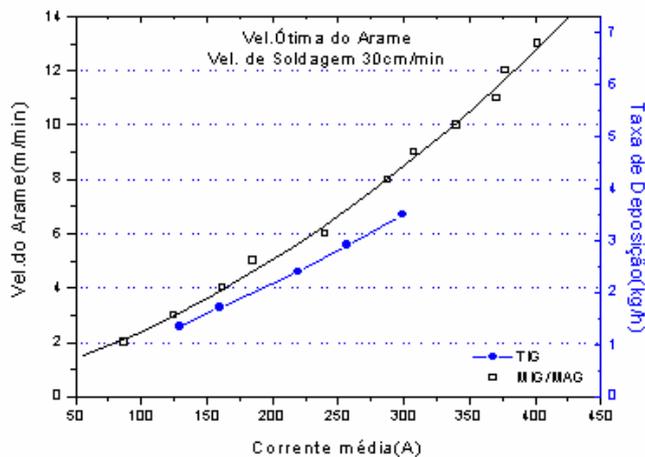


Fig. 5 – Taxa de Deposição em função da Corrente para os processos MIG/MAG e TIG.

Entretanto, quando se utiliza a potência total do arco como parâmetro de comparação, os dois processos se equivalem, no que se refere à taxa de produção, como mostra a Fig. 6. Isto pode ser explicado pela diferença na tensão do arco existente entre os dois processos de soldagem, para a manutenção de uma mesma corrente. No processo MIG, a tensão necessária para a manutenção de um arco de 140 A se mantém em torno de 23 V. Já no processo TIG, a tensão necessária é de apenas 13 V. Portanto, quando se está soldando através do processo TIG com uma corrente determinada, o aporte de calor para a peça de soldagem é quase que 50% menor que o aporte de calor fornecido pelo processo de soldagem MIG. Portanto, existe uma necessidade de aumentar a corrente no processo TIG para fornecer maior energia ao arco voltaico, e atingir a mesma taxa de produção alcançada no processo de soldagem MIG.

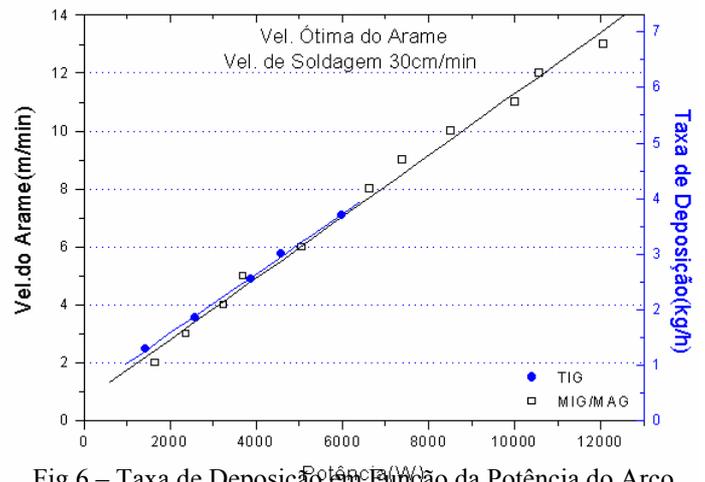


Fig. 6 – Taxa de Deposição em Função da Potência do Arco para os processos MIG/MAG e TIG.

A utilização da corrente pulsada na deposição de CAVITEC na posição sobrecabeça também foi investigada, onde parâmetros de pulso e velocidades de alimentação de arame foram testados com a intenção de produzir cordões de bom aspecto visual.

Diferentes níveis de tempos de pulso, velocidade do arame e velocidade de deslocamento foram experimentados, com o objetivo de criar um modelamento para correlacionar estas variáveis.

Assim, foi levantado um modelo matemático que correlaciona as seguintes variáveis:

- Velocidade de soldagem (VS) entre os valores de 10 e 30 cm/min;
- Tempo de pulso (TP) da corrente de soldagem entre os valores de 0,2 e 1 s;
- Corrente de pulso (IP) entre os valores de 160 e 320 A;
- Velocidade Média do arame de adição (VA);

Na equação 1 é mostrado o relacionamento das variáveis citadas acima, determinado experimentalmente [3].

$$VA = 0,15 - 0,023 VS + 1,2 TP + 0,0045 IP \pm \epsilon \quad (1)$$

$$\epsilon = 0,3 \text{ m/min.}$$

Apesar de se mostrar competitivo com o processo de soldagem MIG/MAG, no que se refere a taxa de deposição em função da energia total do arco, o processo de soldagem TIG apresentou alguns problemas quando testado na posição sobrecabeça.

Como o eletrodo de tungstênio no TIG fica exposto em virtude da própria natureza do processo, fica muito vulnerável a eventuais respingos de metal fundido, provenientes da poça de fusão e do próprio material de adição nas operações de soldagem na posição sobrecabeça. Isto ocasiona a necessidade de paradas regulares no processo de deposição, para reafiações do eletrodo. Este problema é agravado quando é utilizado CAVITEC como metal de adição, pois o fluxo interno do arame cai diretamente sobre a ponta do eletrodo causando rápida contaminação.

III. PROCESSO PLASMA - DESENVOLVIMENTOS

A. Equipamentos

A forma construtiva da tocha utilizada no processo Plasma garante alta densidade de energia e excelente estabilidade direcional do arco, características estas que capacitam o plasma para soldagens que exigem alta confiabilidade e qualidade. Assim como o processo TIG o Plasma pode realizar soldas autógenas ou com adição de material de forma automática ou manual [4].

Os equipamentos necessários para a realização de soldas através do processo Plasma com alimentação automática de arame são similares aos empregados no processo TIG alimentado automaticamente. Assim como no TIG, são necessários um cabeçote tracionador de arame e um suporte direcionador adaptado à tocha.

A.1 Suporte direcionador de arame para a pistola Plasma

Para o projeto do suporte direcionador do arame para a pistola Plasma, os mesmos requisitos referentes ao desenho do para o processo TIG deveriam ser atendidos.

Neste projeto, foi incorporada a experiência adquirida na fabricação do primeiro protótipo TIG, de forma que o protótipo Plasma confeccionado já apresentou melhores características de rigidez e praticidade (Fig. 7)

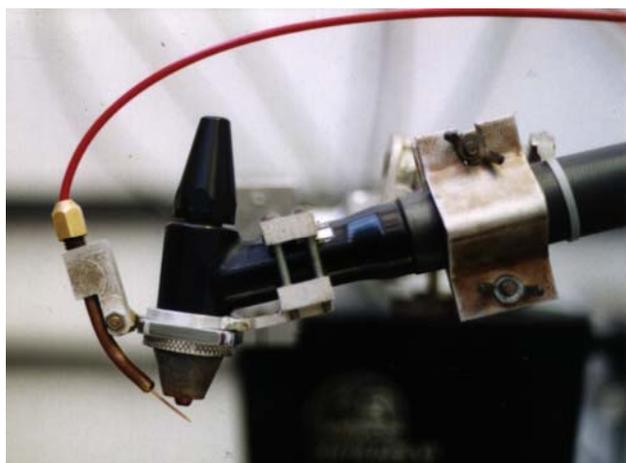


Fig. 7 – Tocha Plasma com Suporte Direcionador de Arame

Este primeiro protótipo de suporte direcionador de arame, apesar de suas boas características de rigidez, ainda apresentou dois outros problemas:

- Excesso de volume do conjunto pistola/suporte/conduíte, o que poderia dificultar o trabalho do soldador, no reduzido espaço da aplicação de campo;
- O arame, neste projeto de suporte, é submetido a uma curvatura excessiva, o que provoca deformações e desalinhamentos do arame.

Foi projetado, então, um outro tipo de suporte direcionador, objetivando a redução do volume total do conjunto e das curvaturas no arame (Fig. 8).



Fig. 8 – Segundo Protótipo da Tocha Plasma Adaptada

Como mostra a figura 8, o segundo projeto do suporte direcionador de arame visivelmente apresenta menor volume total e impõe menores curvaturas no trajeto do arame. Ainda assim, o ajuste do posicionamento inicial do arame neste suporte não é prático, em função da necessidade de utilização de porca e contra-porca para o deslocamento lateral do arame em relação ao arco voltaico. Estas porcas ficam expostas à respingos e acabam aderindo ao parafuso, que serve de eixo para a movimentação lateral.

Foi concebido, então, o terceiro projeto de suporte direcionador de arame (Fig. 9), o qual apresentou maior facilidade no ajuste inicial do posicionamento do arame em relação ao arco voltaico.



Fig. 9 – Terceiro Protótipo do Suporte Direcionador de Arame

Este suporte foi utilizado nos testes de campo, realizados na Usina Hidrelétrica de Salto Osório, no período de 19 a 24 de novembro de 2001. Durante os testes, ficou registrado que mesmo o suporte sendo rígido e não impondo curvaturas excessivas, o alinhamento do arame ainda sofre certa instabilidade, o que prejudica a formação de uma geometria regular dos cordões. Notou-se que esta instabilidade no posicionamento do arame é provocada pela torção pré-existente do arame, provocada naturalmente pelo enrolamento do arame bobinado.

A.2 Fontes de soldagem e formas de onda

No início dos experimentos, a fonte utilizada foi a MTE DIGITEC 450, já utilizada nos procedimentos de recuperação de rotores quando empregado o processo MIG/MAG duplamente pulsado. Para a utilização desta fonte através do processo Plasma com alimentação automática de arame, foi necessária a utilização de um módulo para ignição e manutenção do arco piloto (Módulo Plasma) e do sistema tracionador de arame STA-TIG, específico para os processos TIG e Plasma.

Quando utilizada para os processos TIG e Plasma, a MTE DIGITEC oferece a opção de Corrente Contínua Constante e Corrente Contínua Pulsada.

A corrente contínua constante foi utilizada nos primeiros ensaios, na deposição de arame ER 309-L na posição sobre-cabeça, 45° sentido descendente, onde foram confeccionados depósitos de bom aspecto, com excelente estabilidade na transferência metálica. Entretanto, nos ensaios de laboratório, esta forma de corrente não apresentou facilidade no controle da poça de fusão em posições e direções mais críticas, como é o caso da soldagem na posição sobre-cabeça, sentido horizontal.

A corrente contínua pulsada foi utilizada com sucesso na deposição de arame maciço de aço inoxidável 309-L, pois melhorou sensivelmente o controle da poça de fusão, permitindo a soldagem em todas as direções, na posição sobre-cabeça. Durante a soldagem com esta forma de onda, a velocidade do arame também pulsa de maneira sincronizada com a pulsação de corrente, como mostra a Fig. 10.

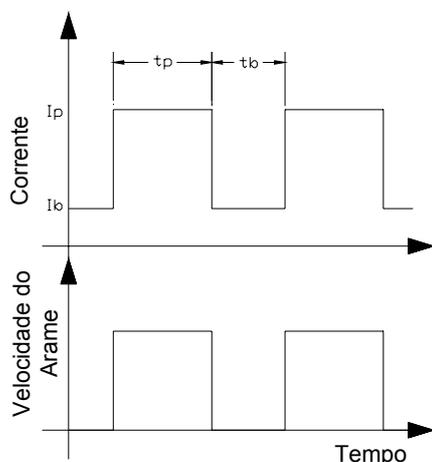


Fig. 10 – Corrente Contínua Pulsada e Pulsação Sincronizada do Arame.

Na utilização desta forma de onda, t_p (tempo de pulso) e t_b (tempo de base) foram selecionados entre os valores de 0,3 e 0,7 s, mantendo-se fixo o período da onda em 1 s. Note-se que durante t_b não é adicionado arame, pois a força de arraste produzida por I_b (Corrente de Base) não é suficiente para arremessar o material fundido, proveniente do arame, até a poça de fusão, quando se opera na posição sobre-cabeça. Apesar da redução da taxa de deposição provocada pela corrente pulsada, a qualidade do depósito e a estabilidade da transferência metálica, quando utilizado o arame maciço 309-L, justificam a utilização desta técnica nos trabalhos de deposição.

Esta técnica também foi empregada nos depósitos de arames tubulares resistentes à cavitação, entretanto não se obteve um controle de defeitos tão eficiente.

Na busca de reduzir a concentração de defeitos na deposição destes arames, partiu-se para a utilização de corrente duplamente pulsada, técnica já utilizada no processo MIG/MAG. Sabe-se que a teoria da corrente pulsada no processo MIG/MAG foi desenvolvida para garantir transferência estável, sem curto-circuito com correntes médias relativamente baixas. No processo plasma, entretanto, esta pulsação de corrente em frequências mais altas é utilizada para atingir dois objetivos:

- Garantir um consumo mais estável de arame
- Provocar maior agitação na poça de fusão, favorecendo melhores condições para expulsão de gases, principais formadores de porosidades.

A Fig. 11 mostra a forma de onda da corrente duplamente pulsada e a sincronia da pulsação da velocidade do arame. Empregando-se esta técnica, se torna possível a adição de material no período de base térmica (T_b), mesmo que a corrente média permaneça entre valores de 40 e 100 A, pois o material é fundido e arremessado em direção à poça durante o tempo de pulso (t_p , 4-6 ms) onde a corrente (I_p) atinge valores de 320 A. A variação da corrente média, representada por I_{pm} e I_{bm} , garante o bom controle da poça fundida na posição sobre-cabeça.

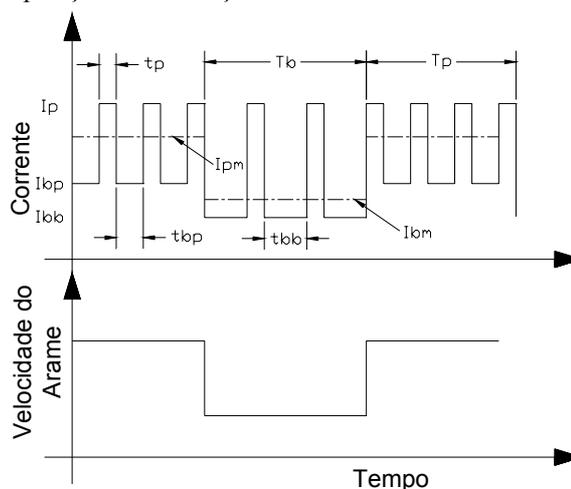


Fig. 11 – Corrente Duplamente Pulsada e Pulsação Síncrona do Arame

Como a fonte DIGITEC 300 não permite a utilização desta forma de onda na soldagem Plasma, foi necessário o uso da fonte INVERSAL 450, comandada por um software, denominado de Plasma Térmico, instalado em um microcomputador. Além da forma de onda da Fig. 11, o plasma térmico permite a seleção de rampas de subida e descida do arame e da corrente, bem como defasagens entre a abertura do arco e início da alimentação de arame.

Quando um determinado cordão necessitar de uma operação de refusão, basta o operador pressionar por mais de dois segundos o gatilho da pistola de soldagem, que o Plasma Térmico utiliza uma corrente de refusão, previamente selecionada, e corta a alimentação de arame. Após a refusão do cordão ou da área desejada, o programa automaticamente seleciona a configuração para deposição de material.

No futuro este software será implementado na fonte

DIGITEC, com a intenção de eliminar a necessidade do uso do computador para controlar a fonte de soldagem.

IV. TESTES

Foram realizadas baterias de testes, com diferentes arames, em laboratório e em campo para aprimoramento do processo Plasma, na aplicação de recuperação de pás de turbinas.

A. Depósitos confeccionados com arame ER 309L

A.1 Testes em laboratório

Os resultados obtidos com a deposição em laboratório do arame de aço inoxidável ER 309-L foram satisfatórios, sob o ponto de vista de taxa de deposição e estabilidade na transferência metálica, quando utilizado arame maciço. Os depósitos de arame tubular de aço inoxidável 309-L apresentaram geometria irregular, provocada pela formação de escória durante a soldagem. A Fig. 12 mostra o relacionamento entre corrente e velocidade do arame que permitem uma transferência metálica de excelente estabilidade, com fluxo contínuo de material fundido e ausência total de respingos. Este modo de transferência, denominado de “Transferência Filamentar” [4], sem registros bibliográficos precedentes, ocorre na região hachurada do gráfico, a partir de 150 A. A Fig. 13 mostra um registro fotográfico da transferência filamentar, realizado em uma bancada de filmagem e fotografia existente no LABSOLDA, que utiliza uma fonte de laser como luz de fundo.

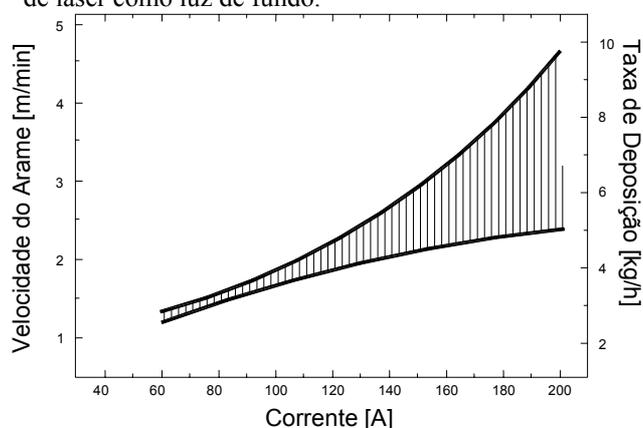


Fig. 12 – Velocidade do arame em função da corrente de soldagem

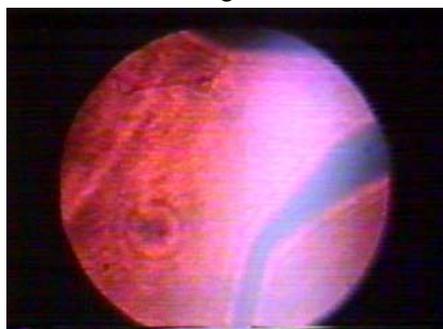


Fig. 13 – Transferência Filamentar

Cordões de bom aspecto visual, taxas de deposição da ordem de 1,8 kg/h e depósitos com isenção de defeitos foram obtidos soldando-se com corrente contínua constante e transferência filamentar. Entretanto, nas condições de laboratório,

utilizando estes níveis de energia em regime constante, somente soldando na direção vertical, sentido descendente, obteve-se tal qualidade nos cordões, sendo que, em qualquer outra direção a poça fundida apresentou forte tendência a escorrer.

Buscando um melhoramento no controle da poça de fusão, optou-se pela utilização da corrente pulsada convencional no processo Plasma com Alimentação Automática de Arame. Empregando-se esta forma de onda foi possível a soldagem na direção horizontal, confeccionando-se depósitos de boa aparência. Entretanto, observou-se uma queda na taxa de fusão de arame para aproximadamente 1,5 kg/h, considerando apenas o tempo de arco aberto, provocada principalmente pela ausência de adição de material durante o período de base.

Este procedimento foi testado e os resultados obtidos em laboratório na aplicação de arame ER 309-L foram satisfatórios.

A.2 Testes em campo

Os testes de campo foram realizados na Usina Hidrelétrica de Salto Osório, máquina n. 1, pá de n. 13, no período de 19 a 24 de novembro de 2001.

Nos testes de campo, os primeiros depósitos de ER 309-L, 1,2 mm foram realizados utilizando-se corrente pulsada convencional. Apesar do bom resultado obtido em laboratório com esta técnica, nas aplicações de campo, os seguintes problemas foram identificados:

- A velocidade nula do arame durante o tempo de base (T_b), dificultou a confecção de cordões regulares, em função de excesso de respingos no bocal constritor e no suporte direcionador de arame. Estes respingos originam-se da fusão de uma pequena extensão de arame durante o tempo de base.
- Instabilidades no alinhamento do arame em relação ao arco voltaico, provocadas principalmente pela torção previamente existente no arame bobinado.

Procurando minimizar o problema da formação de respingos, foi aumentado o tempo de pulso (T_p) e reduzido o tempo de base (T_b), e observou-se que, no campo, a deposição de ER 309-L poderia ser efetuada utilizando-se corrente contínua constante.

A Fig. 14 mostra um depósito confeccionado em campo, utilizando-se corrente contínua constante, na posição sobre-cabeça.



Fig. 14 – Depósito de ER 309-L Realizado em campo, com corrente contínua constante

B. Depósitos confeccionados com arame Cavitec®

B.1 Testes em laboratório

Os testes de laboratório foram efetuados utilizando-se arame CAVITEC de 1,2 mm e de 1,6 mm de diâmetro.

Nos primeiros depósitos realizados com este arame, utilizou-se corrente contínua constante, no valor de 180 A, e argônio puro como gás de proteção. Controle deficiente da poça fundida e excesso de porosidades caracterizaram a deposição utilizando estes parâmetros.

Nestes testes percebeu-se que a poça fundida se deslocava de forma intermitente, em função da pouca molhabilidade sobre o material de base. Utilizaram-se, então, misturas de Ar+CO₂ no gás de proteção, já que seu efeito é reconhecidamente positivo no aumento da molhabilidade de cordões de solda. A Fig. 15 (a e b) mostra uma comparação da seção transversal de dois cordões confeccionados utilizando-se: a) argônio puro no gás de proteção e b) argônio + 8%CO₂ no gás de proteção.

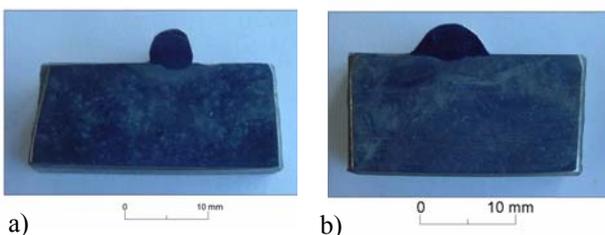


Fig. 15– a) Argônio Puro e b) Argônio + CO₂

Os primeiros resultados mostraram que a utilização de misturas de Ar+CO₂ contribuiu para a redução de concentração de poros. Entretanto, mesmo com estes avanços, nos ensaios subsequentes observou-se pouca repetitividade na eficácia da utilização destas técnicas sobre o controle de incidência de porosidades. A maior molhabilidade dos cordões também dificultou o controle da poça fundida na posição sobrecabeça, o que reduz a regularidade dos cordões.

Na tentativa de atender à necessidade de melhor controle da poça de fusão e reduzir o número de defeitos, foi implementada a corrente pulsada convencional também nos depósitos de CAVITEC, de forma similar ao que foi empregado na deposição de 309-L. Fixados os parâmetros de soldagem,

quatro ensaios foram conduzidos com diferentes gases de proteção e de plasma, com o objetivo de fazer uma avaliação da estabilidade da poça de fusão na posição sobrecabeça e da concentração de defeitos para cada mistura de gases testada.

Assim, foram testadas combinações de gás de plasma (argônio ou hélio) e gás de proteção (argônio, argônio+8%CO₂ ou argônio+2%O₂). Foram encontrados bons resultados em termos de controle da poça de fusão, porém, porosidades ainda persistiram.

Depois destes quatro experimentos utilizando-se corrente pulsada convencional, novos experimentos foram efetuados com corrente duplamente pulsada, onde os resultados apresentaram melhoria. Entretanto, em alguns depósitos ainda foi detectada a presença de poros, o que demonstra a falta de repetibilidade na soldagem do arame CAVITEC 1,2 mm, utilizando o processo Plasma. Com arame CAVITEC de 1,6 mm de diâmetro, melhores resultados foram conseguidos, tanto com corrente duplamente pulsada, como com corrente pulsada convencional. Os testes realizados mostraram que com este diâmetro de arame, um bom nível de qualidade nos depósitos foi atingido, sem poros e com boa repetibilidade.

Na figura 16 é apresentada uma foto do ensaio de líquidos penetrantes em um depósito confeccionado com CAVITEC de 1,6 mm de diâmetro, utilizando corrente duplamente pulsada. Utilizando esta forma de onda na corrente, mesmo no período de corrente média de base é possível adicionar material, pois o destacamento e arremesso da gota ocorrem durante o pulso de corrente (tp). Desta forma foi possível incrementar a taxa de fusão, que chegou a valores de 1,85 kg/h.



Fig. 16 – Depósito de CAVITEC 1,6 mm de diâmetro, confeccionado com corrente duplamente pulsada, de forma automatizada.

B.2 Testes em campo

No campo, os arames CAVITEC de 1,2 e 1,6 mm foram testados, utilizando-se corrente duplamente pulsada e mistura de Ar + 8% de CO₂ como gás de proteção.

Em termos de controle da poça de fusão, foi observado que no campo pode-se soldar com correntes médias maiores do que em laboratório, o que promoveu maior facilidade em aumentar a largura dos cordões e aumentou a fusão do material de base. Isto provavelmente ocorreu em função da maior massa que possui o rotor, quando comparado com as chapas utilizadas nos testes de bancada.

Na soldagem com corrente duplamente pulsada percebe-se uma fusão mais regular do arame, em comparação ao uso da corrente pulsada convencional, o que promove uma deposição sem respingos quando os parâmetros estão corretamente ajustados, como mostram a Fig. 17.

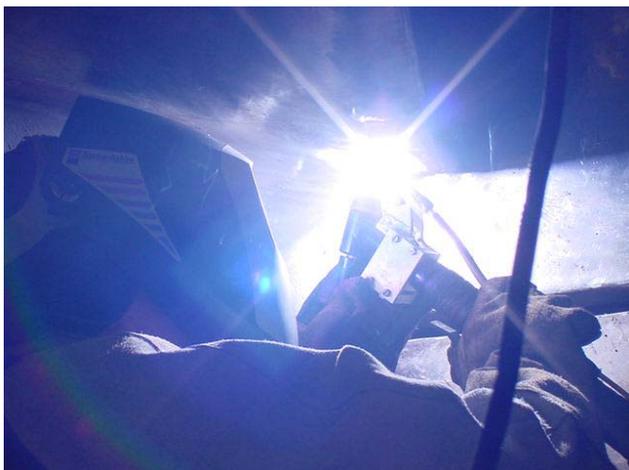


Fig. 17 – Foto da Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame no campo, confeccionando um depósito de CAVITEC, 1,6 mm de diâmetro,

Apesar dos bons resultados obtidos em laboratório com a utilização de CAVITEC de 1,6 mm de diâmetro, no campo os depósitos apresentaram grande quantidade de porosidades.

Observou-se que em alguns pontos do material original da pá havia a presença de poros. O arco plasma, ao incidir sobre estes poros, provocava seu alargamento, o que dificultou a regularidade na deposição de material, e, provavelmente contaminou o metal de adição. Esta seria uma possível explicação para a marcante diferença na qualidade dos depósitos de campo e de laboratório.

O arame CAVITEC de 1,2 mm de diâmetro também foi testado. De maneira similar ao que ocorreu no depósito de CAVITEC 1,6 mm, percebeu-se uma boa estabilidade nos depósitos e ausência de respingos, utilizando-se corrente duplamente pulsada (Fig. 18). Foi observada, no entanto, uma concentração de porosidades, já no momento em que o material estava sendo depositado, confirmando a tendência observada em laboratório para este arame com o processo Plasma.



Fig. 18 – Depósito realizado em campo com Plasma Alimentado, de CAVITEC 1,2 mm de diâmetro

C. Depósitos confeccionados com arame Hidroloy®

C.1 Testes em laboratório

O arame Hidroloy de 1,2 mm de diâmetro, apresentou bons resultados em laboratório, em termos de reduzido nível de concentração de porosidades e de controle de transferên-

cia metálica e de poça de fusão. Este arame foi depositado utilizando-se corrente pulsada convencional e duplamente pulsada (Fig. 19).



Fig. 19 – Depósito de Hidroloy 1,2 mm de diâmetro, com corrente duplamente pulsada

C.2 Testes em campo

Já os resultados em campo não foram satisfatórios, pois os depósitos apresentaram excessivo nível concentração de poros. Durante a soldagem, novamente se observou que o arco plasma provocou o aparecimento de defeitos contidos originalmente no material da pá, o que provavelmente explique a diferença entre os resultados obtidos em laboratório e no campo. Para este depósito foi utilizada corrente duplamente pulsada, com os mesmos parâmetros levantados em laboratório.

D. Depósitos confeccionados com arame Cavitalloy®

D.1 Testes em laboratório

Os arames CAVITALLOY, de 1,3 mm e 1,6 mm de diâmetro, foram testados utilizando-se corrente pulsada convencional e corrente duplamente pulsada. A soldagem com corrente pulsada convencional não apresentou bons resultados em virtude da alta concentração de porosidades.

Mesmo utilizando uma variedade de gases de proteção, os resultados foram muito próximos dos encontrados na soldagem de CAVITEC de 1,2 mm, onde se atingiu uma redução no tamanho dos poros, mas não se conseguiu sua total eliminação.

Partiu-se, então, para a utilização de corrente duplamente pulsada, onde os resultados apresentaram uma sensível melhoria, nos dois diâmetros de arame disponíveis.

D.2 Testes em campo

Mesmo com os bons resultados obtidos em laboratório, os resultados em campo não foram satisfatórios, utilizando-se arame CAVITALLOY de 1,3 e 1,6 mm de diâmetro, em função do excesso de poros.

A Fig. 20 mostra o preenchimento final de uma cratera, onde foram utilizados os arames Cavitalloy de 1,3 mm e 1,6 mm de diâmetro. Observa-se que a distribuição de defeitos é muito semelhante para os dois diâmetros de arame utilizados.

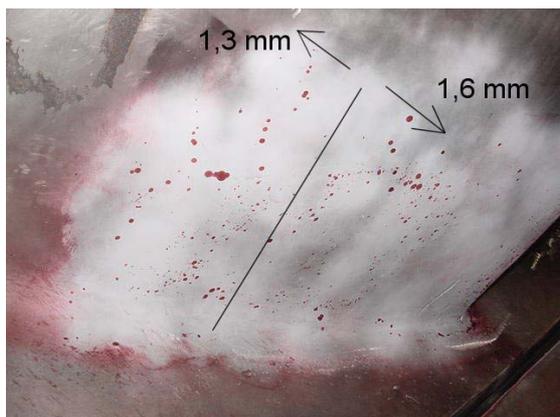


Fig. 20 – Depósito da segunda camada de revestimento, utilizando-se CAVITALLOY de 1,3 e 1,6 mm de diâmetro.

No depósito de CAVITALLOY 1,6 mm de diâmetro também foi feita a experiência de soldar com corrente média constante, ou seja, ajustando o valor de corrente média de base igual ao valor de corrente média de pulso. Instabilidades na transferência metálica e baixo controle sobre a poça fundida provocaram um baixo desempenho do depósito deste arame, utilizando corrente média constante.

V. DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO NAS CONDIÇÕES DE CAMPO

A. Tocha plasma adaptada

Foi observado que a tocha plasma apresentou bom desempenho em termos de durabilidade do eletrodo e do bocal constritor, quando os parâmetros de vazão de gás, corrente e recuo do eletrodo foram corretamente ajustados.

O alinhamento do arame em relação ao arco voltaico ainda apresenta instabilidades. A movimentação do arame no sentido transversal, em relação ao arco voltaico, é provocada pela torção originada no próprio bobinamento do arame, o que provoca paradas sucessivas no processo para realinhamento do arame.

B. Módulo Plasma

Durante a aplicação em campo, o módulo plasma apresentou os seguintes problemas:

- Queima sucessiva do transistor que controla a corrente do arco piloto, provavelmente provocada por oscilações na tensão de alimentação do equipamento. Este problema foi contornado utilizando-se um transistor de maior capacidade.
- O uso da alta frequência para abertura do arco piloto causou interferência nas outras fontes de soldagem que estavam em operação (Digitec 450). Este problema foi causado em função do comprimento do mangote - que fazia comunicação entre a fonte de soldagem, sistema tracionador de arame e pistola plasma - o que o tornou uma espécie de antena emissora de ruídos. A solução imediata utilizada no campo foi a abertura do arco piloto através de curto-circuito entre o bocal constritor e

o eletrodo. Uma solução permanente para este problema seria alocar o ignitor de alta frequência dentro do sistema tracionador de arame, o que eliminaria a emissão de ruídos no mangote de comunicação.

VI. CONCLUSÕES

- O processo de soldagem TIG apresentou taxa de deposição de arame inferior ao processo de soldagem MIG/MAG tomando-se como parâmetro de comparação a corrente de soldagem. Entretanto, quando a comparação é realizada com base na potência do arco, as taxas de deposição do processo TIG e do processo MIG/MAG se equivalem;
- A vulnerabilidade do eletrodo no processo TIG, em função da natureza construtiva da tocha de soldagem, prejudicou sua vida útil, nos depósitos realizados na posição sobrecabeça e, principalmente, utilizando CAVITEC como arame de adição;
- O processo Plasma apresentou boa estabilidade de arco e de transferência metálica, principalmente na aplicação de arame de aço inoxidável 309-L. Entretanto, nos depósitos em campo de arames tubulares (CAVITEC, CAVITALLOY E HIDROLOY) foi registrada a presença de porosidades;
- Foi registrado, durante as aplicações de campo, que o suporte direcionador de arame adaptado à tocha plasma ainda precisa de melhoramentos, para reduzir a movimentação do arame em relação ao arco voltaico;
- O sistema de ignição do arco piloto deve ser melhorado para evitar a propagação de ruídos, o que interfere no funcionamento de outras máquinas próximas ao equipamento plasma durante os trabalhos em campo. Uma solução proposta é posicionar o ignitor de alta frequência dentro do cabeçote alimentador de arame, o que encurtaria o comprimento de cabos, e diminuiria a emissão de ruídos.
- A tecnologia gerada tem potencial para ser incorporada a sistemas automatizados de recuperação de pás cavitadas de turbinas hidráulicas.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa TRACTEBEL pela intensa interação propiciada durante os trabalhos e à ANEEL, pelo co-financiamento

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Dutra, R. Gohr Jr, L. F. Ollé, C. E. I. Baixo "Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica ou Duplamente Pulsado" INPI 0004698-1, Set. 2000.
- [2] J. C. Dutra, "Case LABSOLDA-2Premio FINEP de Inovação Tecnológica" Florianópolis, 2003
- [3] DELGADO, L. C., "Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame" Dissertação de Mestrado. EMC/UFSC. Florianópolis, 2000
- [4] OLIVEIRA, M. A., "Estudo da Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame para Aplicação em Revestimentos Metálicos" Dissertação de Mestrado. EMC/UFSC. Florianópolis, 2000.