



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO NA POSIÇÃO HORIZONTAL COM O PROCESSO MIG/MAG ARAME FRIO

Henrique Nardon Ferraresi¹
Hebert Roberto da Silva²

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica. Av. João Naves de Ávila 2121, Campus Santa Mônica, CEP 38.400-902, Uberlândia, MG, Brasil, e-mail: henrique_ferraresi@hotmail.com.

²Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus Aparecida de Goiânia, Rua Mucuri, s/n - Setor Conde dos Arcos CEP: 74.968-755 - Aparecida de Goiânia, GO, Brasil, e-mail: hebert.roberto@ufg.br.

Resumo: O processo de soldagem MIG/MAG com suas aplicações utilizando dois arames, aponta no mercado como uma alternativa para revestimento quando uma alta produtividade é desejada. Surgem variantes potenciais deste processo como o MIG/MAG arame frio e o duplo arame. Uma das maiores dificuldades é o ajuste de seus parâmetros, que, além de duplicados em relação ao MIG/MAG convencional, agem de forma dependente. Um maior entendimento dessa tecnologia aplicada a revestimentos resistente ao desgaste em diversas posições é fundamental para que se possa dominar o processo e as suas variáveis, objetivando potencializar a aplicação na indústria. Devido sua maior facilidade e simplicidade, os estudos em geral sobre a aplicação de revestimento abrangem a soldagem na posição plana, não apresentando procedimentos para deposição em outras posições. O objetivo deste trabalho é fazer um estudo sistematizado para obtenção de parâmetros de soldagem adequados, com os processos MIG/MAG Arame Frio, de forma a produzir revestimentos soldados, a partir de ligas comerciais de aço inoxidável. O processo MIG/MAG Arame Frio e convencional foram empregados na posição horizontal, visando obter uma avaliação em condições idênticas às soldagens de campo. Os resultados mostraram que existe condições adequada de aplicação de revestimento nesta posição utilizando o processo de soldagem MIG/MAG convencional e com Arame Frio. Entretanto, as melhores condições de revestimento dependem, entre outros fatores, do ajuste preciso da posição de entrada do arame frio em relação ao energizado e de sua velocidade de alimentação.

Palavras-Chave: MIG/MAG Arame Frio; Posição Horizontal; Parâmetros de Soldagem, Revestimento

1. INTRODUÇÃO

No Brasil as usinas hidroelétricas são as maiores fontes geradoras de energia elétrica com fornecimento de mais de 90% de toda demanda. O potencial hidráulico a ser explorado apresenta grandes possibilidades, somando-se a isso um crescimento médio da demanda em torno de 5%, chegando até mesmo em 20% para algumas regiões. Em sua concepção, as turbinas hidráulicas são projetadas para obter um alto rendimento e durabilidade sem, contudo, eliminar um fenômeno de ação contínua conhecido como cavitação (Bonacorso, 2004). Nestes casos, a troca deste componente torna-se economicamente inviável. A cavitação remove gradativamente parte do material da turbina, ocasionando situações catastróficas se não forem tomadas as devidas medidas de recuperação e proteção. Diante dessa preocupação, justifica-se uma atenção especial com a aplicação de uma proteção neste componente para que apresente maior tempo de operação, proporcionando um aumento no intervalo entre as intervenções de manutenção. Normalmente nestes casos a opção economicamente viável é a realização de um revestimento metálico depositado por processo de soldagem que proporcione uma baixa diluição e alta produtividade. Os processos de soldagem comumente aplicados em revestimento são o MIG/MAG, arame tubular, o arco submerso, TIG com alimentação de arame frio ou quente, plasma por arco transferido (PTA), MIG/MAG com duplo arame e atualmente o MIG/MAG Arame Frio (Lobato e Braga, 2011).

Na escolha da seleção do processo de soldagem e da liga a ser depositada são levados em consideração fatores, tais como condições operacionais, características do metal de base, a relação custo-benefício do componente a ser revestido, a despesa com processamento, etc. Dentre os materiais aplicados no reparo por soldagem de danos por cavitação, Motta

(2002) cita os aços inoxidáveis tradicionais tipo AISI 308 e 309, aços inoxidáveis ao Co e ligas à base de Co (comercialmente chamada de *Stellites*), sendo estas últimas caracterizadas pela dificuldade de esmerilhamento e alto custo.

Com o aumento da exigência do mercado consumidor em busca de processos com taxas de deposição mais elevadas e, conseqüentemente, redução dos custos globais envolvidos, foram desenvolvidas novas variantes visando maior produção, como por exemplo, o MIG/MAG duplo arame. Na soldagem de revestimento esta técnica é especialmente utilizada, devido às suas vantagens como maior produtividade, através dos aumentos na taxa de deposição e na velocidade de soldagem aliado ao baixo aporte térmico. Cita-se o uso de duas fontes de soldagem eletrônicas sincronizadas, dois cabeçotes de alimentação de arame, programas computacionais para comandar o sincronismo da operação, envolvendo o aumento do consumo de insumos como energia elétrica, gás, entre outros.

Assim, surge a proposta de uso do processo MIG/MAG com a adição de um arame não energizado (chamada de Arame Frio), estabelecendo uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem MIG/MAG duplo arame e demais processos utilizados na deposição de revestimento. Os estudos preliminares de Cruz Junior et al. (2011) sobre o processo MIG/MAG com adição de arame não energizado na posição plana indicaram uma produção média 70% acima da soldagem MIG/MAG convencional, com bons níveis de estabilidade e qualidade superficial da união. Esse processo agrega como vantagem o ganho em versatilidade, redução de peso, dissipação de calor, maior variação de ângulo de entrada do arame e simplicidade de fixação em tochas de soldagem automáticas ou semiautomáticas, não necessitando de conhecimentos específicos para sua instalação e seu manuseio. Além disso, é possível a utilização de metais de adição com composições diferentes, visando a obtenção de características específicas para o cordão de solda.

Devido sua maior facilidade e simplicidade, os estudos em geral sobre a aplicação de revestimento abrangem a soldagem na posição plana, não apresentando procedimentos para deposição em outras posições. Na prática, para viabilizar a aplicação dos revestimentos por processos de soldagem nas mais variadas aplicações, incluindo a recuperação de pás de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação, a identificação de resultados em outras posições é uma condição indispensável.

A posição horizontal tem grande aplicação em revestimento de turbinas hidráulicas devido basicamente aos perfis das pás. Em seu trabalho, Motta (2002), ao soldar com o processo MIG/MAG duplo arame, simulando condições reais de aplicação de revestimento na posição horizontal, notou a formação de *humpings*, independentemente do posicionamento dos eletrodos em *tandem* (em série) ou em *twin* (paralelo). Devido a isso, em seu trabalho, Motta (2002) realizou as operações de revestimento com um cordão depositado sobre a chapa apenas para as posições plana, vertical e sobre cabeça.

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo sistematizado para obtenção de parâmetros de soldagem adequados, com os processos MIG/MAG convencional e com Arame Frio, de forma a produzir revestimentos soldados utilizando um arame eletrodo de aço inoxidável austenítico. Os processos serão empregados na posição horizontal visando sua avaliação em condições idênticas às soldagens de campo.

2. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os consumíveis utilizados neste trabalho foram chapas de aço carbono comum (ABNT 1020) de dimensões 12,5x60x300mm, gás de proteção (98%Ar+2%O₂) e metal de adição de aço inoxidável (ER308LSi) de composição química (em peso) de: C (0,02%); Cr (20%); Mn (1,6%); Si (0,8%); Ni (10,5%); sendo o restante ferro.

A bancada experimental, apresentada na Fig. 1, consiste da fonte de soldagem eletrônica multiprocessos (1), do sistema de alimentação do arame eletrodo (2), do sistema de alimentação do arame frio (3), suporte do corpo de prova (4), tocha (5) e computador (6). O procedimento de soldagem para o processo MIG/MAG convencional e com arame frio consiste basicamente na fixação do corpo de prova juntamente com a chapa de ancoramento, a um anteparo fixo na mesa de soldagem, permitindo o posicionamento na posição horizontal.



Figura 1: Bancada experimental com sistema utilizado para movimentação da tocha

A alimentação do arame frio é um acessório ao sistema de soldagem igual ao utilizado para alimentação de arame eletrodo no processo TIG. Sua função é introduzir continuamente o arame na poça de fusão simultaneamente a adição do arame energizado. Para a padronização na realização dos ensaios de soldagem, utilizou-se uma mesa de coordenadas XY, ligada a um computador com *hardware* de interface, que por meio de um programa desenvolvido no Laprosolda/UFU pode-se determinar as coordenadas que a tocha de soldagem percorrerá, com uma resolução de 0,5 mm, faixa nominal de 60 cm no eixo x e 85 cm no eixo y.

Para monitorar os sinais elétricos do arco (corrente e tensão), foi usada uma placa de aquisição da National Instruments®, acoplada a um microcomputador com o *software* LabView® tanto para a aquisição dos sinais de corrente e tensão, como para o tratamento destes sinais.

Foi obtido o perfil de dureza ao longo da seção transversal do depósito possibilitou uma primeira avaliação das propriedades do revestimento, e consequentemente a obtenção de previsão sobre o comportamento da amostra no ensaio de erosão e cavitação, que será realizada no futuro.

Para o levantamento de perfis de microdureza nos ensaios e subsequente análise metalográfica no microscópio óptico, o cada cordão foi seccionado na direção transversal à deposição, desprezando os trechos de abertura e o fechamento do arco. Cada amostra, em seguida, passou a ser preparado para exame metalográfico, através de embutimento a quente em baquelite, lixamento com lixas de grana 180, 260, 320, 400, 600 e 1200 μm .

Os perfis de microdureza foram levantados com um microdurômetro digital de bancada modelo HVS 1000, utilizando-se um penetrador Vickers (pirâmide de diamante de 136°) e uma carga de 500 g (HV 0,5). Após a focalização e o ajuste do “zero” (interface revestimento) pelo sistema ótico do microdurômetro, foram feitos 5 perfis com indentações até atingir o substrato (metal de base). O espaçamento adotado entre as indentações de 0,25 mm, seguiu a norma ABNT (2008). Foram analisadas as microdurezas das zonas fundidas (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de base (MB).

3. AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO DEPOSITADO POR SOLDAGEM

3.1 Condições de Soldagem do Cordão de Ancoramento na Posição Horizontal.

Os testes de soldagem tiveram seu enfoque na determinação das melhores condições para o processo de soldagem MIG/MAG Arame Frio na posição horizontal e convencional, variando-se os parâmetros como tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, bem como a posição do arame frio na poça de fusão. Nesta etapa, os ensaios foram executados partindo-se de parâmetros de soldagem na posição plana obtidos por Cruz Junior et al. (2011) com o processo MIG/MAG Arame Frio. O arame eletrodo utilizado foi de aço inoxidável austenítico do tipo AWS ER308LSi, tanto para o arame energizado como para o arame frio o diâmetro foi de 1,2 mm.

Foram realizados inicialmente 6 (seis) ensaios com o processo MIG/MAG convencional, conforme mostrado na Tab. 1 (P1 a P6), sem a realização de tecimento da tocha para a posição horizontal. Variou-se a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame eletrodo, mantendo constante os outros parâmetros, sendo a vazão do gás de proteção (14 l/min de 98%Ar+2%O₂). A posição da Tocha em relação a peça foi de 90 graus. A designação ‘P’ antes da numeração nesta tese será utilizada visando facilitar a identificação dos ensaios.

Durante a realização dos ensaios P1 a P6 (Tab. 1), observou-se a formação de cordões irregulares, com aspecto de gotas solidificadas formadas periodicamente, chamadas de corcovas, (fenômeno conhecido também como *humping*). Foram realizados outros ensaios (P7 a P9) repetindo em P7 a mesma condição de P6 e com novas condições de soldagem. Porém, o mesmo efeito ocorreu (*humping*). Na Fig. 2, é apresentado o cordão de solda obtido para o ensaio P1 com a presença de *humping*.

Tabela 1: Parâmetros de soldagem dos testes preliminares MIG/MAG convencional

CS	U (V)	V _{sold} (cm/min)	V _{alim} (m/min)	DBCP
P1	20	30	6	16
P2	20	25	6	16
P3	20	35	6	16
P4	20	40	6	16
P5	20	40	5	16
P6	20	40	4	16
P7	20	40	4	16
P8	20	30	5	16
P9	20	30	5	16

OBS: CS é a condição de soldagem; U é a tensão de soldagem; V_{sold} é a velocidade de soldagem; V_{alim} é a velocidade de alimentação do arame eletrodo; DBCP é a distância de bico de contato à peça.

Devido à repetição das irregularidades com os ensaios do Processo MIG/MAG convencional, passou para uma nova fase utilizando o Processo MIG/MAG com Arame Frio, com os parâmetros apresentados na Tab. 2, variando os

parâmetros velocidade de soldagem (V_{sold}) e a velocidade de alimentação do arame (V_{alim}), ensaios P10 e P11, manteve a tocha em 90 graus em relação a peça a ser soldada.



Figura 2: Teste P1 com a formação de *humping* durante a soldagem

Tabela 2: Parâmetros de soldagem dos ensaios com o MIG/MAG Arame Frio

CS	U (V)	V_{sold} (cm/min)	V_{alim} (m/min)	V_{Frio} (m/min)	DBCP
P10	20	40	4	2	16
P11	20	30	5	2	16
P12	22	30	6	2	16
P13	22	30	6	2	16

Utilizou-se no processo MIG/MAG Arame Frio um cabeçote auxiliar para alimentar o arame não energizado, inserindo na atmosfera do arco o metal de adição não energizado, com a inserção do arame frio no centro da conexão eletrodo peça, visando fundi-lo adequadamente através do calor gerado no arco.

Buscou-se nos ensaios P10 e P11 (Tab. 2) repetir as condições de P7 e P8 com a introdução do arame frio a 2 m/min. Contudo, as ocorrências de *humping* não foram eliminadas, evidenciando a dificuldade de soldagem de revestimento (em particular o primeiro cordão) na posição horizontal com o processo MIG/MAG convencional e também no MIG/MAG Arame Frio. Este fato está provavelmente relacionado à força de gravidade, que atua na poça de fusão fazendo a mesma escorrer, amplificando com isso o efeito do *humping*, pois resultados dos ensaios realizados por Cruz Junior et al. (2011) na posição plana com as mesmas condições de soldagem deste trabalho não apresentaram este efeito.

Em uma nova tentativa de minimizar o problema do primeiro cordão de revestimento na posição horizontal, optou-se pelo uso de uma placa colocada na parte inferior do corpo de prova denominada 'chapa de ancoramento'. O objetivo do uso deste artifício é sustentar a poça de fusão durante a adição de metal, evitando o escorrimento antes da solidificação e extinguir o *humping*. Os parâmetros dos ensaios P12 e P13 (Tab. 2) com a velocidade de soldagem no menor nível testado de 30 cm/min e velocidade de alimentação do arame energizado em 6 m/min, mantendo a relação entre a velocidade do arame frio e energizado em 1/3.

No ensaio P12, a distância do ponto de entrada de metal de adição e a chapa de ancoramento foi de 5 mm. Neste caso, notou-se a deposição de um cordão relativamente regular sem a formação de gotas solidificadas (Fig. 3). No ensaio P13 a distância do ponto de adição de metal e a chapa de ancoramento foi alterada para 7 mm, formando novamente as corcovas mostradas na Fig. 4, sem a fusão da chapa de ancoramento que se destacou após o término da soldagem. A ocorrência das gotas solidificadas no cordão de solda no teste P13 mesmo com a adoção de uma chapa de ancoramento, traz forte evidência de que a posição de inserção do arame no arco elétrico (poça de fusão) apresenta influência fundamental na característica do cordão de solda, especialmente na formação dos *humpings*.



Figura 3: Ensaio P12 soldagem MIG/MAG arame frio com uso de chapa de ancoramento



Figura 4: Ensaio P13 soldagem MIG/MAG arame frio com uso de chapa de ancoramento

Com os ensaios apresentados até aqui, verificou-se que o processo MIG/MAG Arame Frio na posição horizontal induz a necessidade de rigorosos cuidados na montagem do aparato experimental, principalmente na posição de entrada do arame frio, que nos ensaios realizados até aqui ficou aproximadamente no meio do aro elétrico, isto é, na junção do

eletrodo com o arco elétrico, mostrado no esquema da Fig. 5(a). Este fato pode ter gerado instabilidade na poça de fusão, contribuindo para a formação dos *humpings*.

Após alguns ensaios de verificação da posição do arame, verificou-se que este ajuste ocasiona muitos respingos e explosões de gotas metálicas, devido à existência de curtos-circuitos aleatórios entre o arame energizado e o arame frio, além do curto-circuito normal da transferência metálica. Desta forma, a instabilidade gerada no processo é muito grande, podendo interferir na sinergia entre os fatores fundamentais para a formação de uma poça de fusão estável, sendo provavelmente uma das causas que contribuem para a geração dos *humpings*. Com isto, a solução para os próximos ensaios com arame frio, foi alimentar o arame na base do arco, isto é, ajustou-se o arame frio coincidindo com o arame eletrodo em contato com a peça, conforme esquema apresentado na Fig. 5(b).

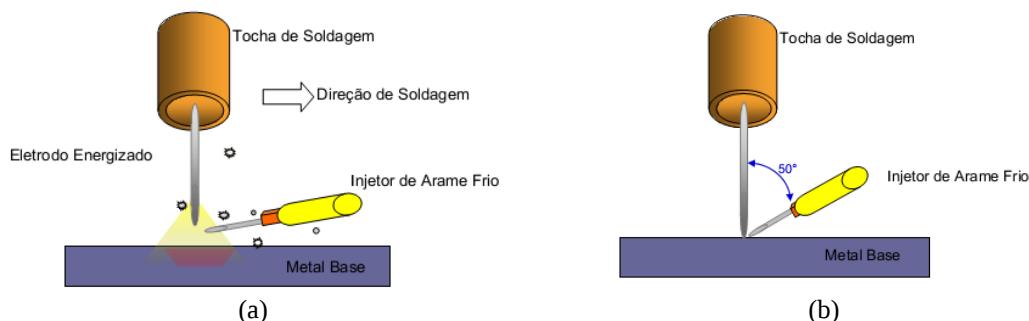


Figura 5: Posição de entrada do arame não energizado (arame frio no arco elétrico)

3.2. Revestimento Aplicado na Posição Horizontal

Após a avaliação dos ensaios iniciais e a dificuldade de obter um cordão de acoramento sem a presença de corcovas, optou-se pela realização de novos ensaios com o uso da chapa de ancoramento no passe inicial. Outra alteração foi a adoção de oscilação da tocha (tecimento). O tempo de parada lateral foi mantido igual a zero, baseado no trabalho de Cruz Junior et al. (2011). A amplitude de tecimento utilizada foi de 10 mm e a frequência de oscilação em 1,0 Hz. Com isso, foram realizados novos ensaios, visando avaliar a variação na distância entre passes e a velocidade de soldagem, de acordo com a Tab. 3, para o processo MIG/MAG convencional. O objetivo destes ensaios é alcançar uma condição satisfatória com o MIG/MAG convencional para posterior adequação ao MIG/MAG Arame Frio.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem dos testes preliminares MIG/MAG convencional

CS	U (V)	V_{sold} (cm/min)	V_{alim} (m/min)	DBCP	d_{passe} (mm)
P14	22	40	6	16	5
P15	22	30	6	16	4
P16	22	30	6	16	3
P17	22	30	6	16	5
P18	22	30	6	16	4
P19	22	30	6	16	3

Nota: d_{passe} é a distância entre passes.

As Figuras 5 (a) e (b) mostram os ensaios P14 e P16, nota-se uma melhor fusão entre os cordões do revestimento para o caso de distância entre passes de 3 mm (ensaio P16), mas não totalmente adequada para o objetivo desejado. A manutenção de uma apurada precisão na distância entre passes do revestimento minimiza o aspecto irregular, com formação de cordões excessivamente separados. Além disso, uma variação dessa posição pode fazer com que o arco de soldagem desvie da trajetória planejada, buscando pontos próximos ao cordão de ancoramento ou demais passes de revestimento. Diante destes fatos, a rigidez e a precisão no sistema de fixação do conjunto na posição horizontal passam a ser um requisito mandatório para a realização satisfatória dos ensaios.



Figura 5: Cordão de solda MIG/MAG convencional: (a) distância entre passes de 5 mm (ensaio P14); (b) distância entre passes de 3 mm (ensaio P16)

Novos ensaios foram realizados com processo MIG/MAG convencional (P17 a P19) apresentado na Tab. 3. Em termos de aspecto do revestimento foram semelhantes ao apresentado na Fig. 5. Foram determinados a diluição dos ensaios P17 (39,87%), P18 (37,94%) e P19 (32,48%), onde verificou-se que a diluição diminui com a redução da distância entre os passes de 5 mm para 3 mm.

Apesar da qualidade superficial, ainda não totalmente adequada, dos revestimentos obtidos com o processo MIG/MAG convencional, partiu-se a soldagem pelo processo MIG/MAG Arame Frio com os ensaios apresentados na Tab. 4 (ensaios P20 e P21), repetindo as distâncias entre passes de 3 e 5 mm. Verificou-se ondulações no cordão de solda, não obtendo um revestimento adequado para o objetivo da aplicação deste trabalho, necessitando, com isso, de novos ensaios.

Sem perder de vista o objetivo de conseguir um revestimento adequado para a aplicação em questão, alterou-se a posição da tocha, utilizando-se para isso a técnica empurrando com 10 graus de inclinação da tocha. Neste caso, variou-se a tensão de soldagem (U), de acordo com a Tab. 4 (ensaios P22 a P26). Nas condições propostas não se obtiveram resultados satisfatórios, mantendo-se o revestimento com qualidade próxima aos casos anteriores, isto é, com ondulações entre os cordões de solda.

Tabela 4: Ensaios com o processo MIG/MAG Arame Frio com a tocha na posição normal e empurrando

CS	U (V)	V _{sold} (cm/min)	V _{alim} (m/min)	V _{Frio} (m/min)	DBCP	d _{passe}	Âng. Tocha (graus)
P20	22	30	6	2	16	3	0
P21	22	30	6	2	16	5	0
P22	22	30	6	2	16	4	10
P23	24	30	6	2	16	4	10
P24	22	30	6	2	16	4	10
P25	20	30	6	2	16	4	10
P26	20	30	6	2	16	4	10
P27	24	30	6	2	16	2	0
P28	24	25	6	2	16	3	0
P29	24	30	6	2	16	3	0

OBS: ângulo da tocha em 0 graus significa que a tocha está a 90 graus em relação a chapa a ser soldada.

Apesar das melhorias obtidas até esta etapa, mas não totalmente adequados devido à dificuldade de repetitividade. Manteve-se o desafio de melhorar o ajuste da posição do arame frio no arco elétrico. Portanto, a partir deste ponto do trabalho, buscou-se uma nova proposta para esta posição relativa. Nos testes realizados até o momento, utilizou-se a posição relativa entre o arame eletrodo e o frio de 50° (Fig. 5(b)). Desta forma, buscou-se um novo ajuste com um ângulo de 80°. Para análise da nova relação entre o arame energizado e o injetor de arame frio, propôs-se a realização de três ensaios (P27, P28 e P29), mostrado na Tab. 4. Mesmo com esta alteração não foi possível obter um revestimento adequado para a aplicação desejada.

Visando adquirir maior conhecimento a respeito do desempenho do revestimento em termos da adoção ou não de tecimento durante a soldagem, realizaram-se os testes mostrados na Tab. 5 para o processo MIG/MAG convencional (P30, P31 e P32) e MIG/MAG Arame Frio (P33 e P34). Reduziu-se a velocidade de alimentação do arame frio, visando minimizar o volume da poça de fusão e eliminar a presença de ondulações entre os cordões de solda. Adotou duas propostas de tecimento, uma com frequência de 2 Hz para os testes P31 e P32, e outra de 1,5 Hz para o teste P33 e P34. Os resultados em termos de aspecto visual do cordão de solda são mostrados na Fig. 6 e 7.

Tabela 5: Testes preliminares MIG/MAG convencional e MIG/MAG Arame Frio

CS	U (V)	V _{sold} (cm/min)	V _{alim} (m/min)	V _{Frio} (m/min)	DBCP	d _{passe}	Dil (%)	Tecimento
P30	22	25	6	-	16	3	36,19	Não
P31	22	25	6	-	16	3	22,18	Sim
P32	22	30	6	-	16	3	21,66	Sim
P33	22	30	6	1	16	3	19,55	Sim
P34	24	30	6	1	16	3	14,09	Sim

Sendo: Dil(%) a diluição do revestimento.

Na Fig. 6(a), ensaio P30 sem tecimento, nota-se a presença de aberturas pronunciadas entre os passes do cordão de solda. Para os ensaios P31 e P32 da Fig. 6 (b) e (c), esta ocorrência foi minimizada com a adoção do tecimento durante a soldagem. Entretanto, em alguns pontos localizados ocorreu falta de fusão entre os cordões. Mantendo-se os parâmetros de soldagem similares ao ensaio P32, realizaram-se os ensaios P33 e P34 (Fig. 7(a) e 7(b) com o uso do tecimento com a adição de arame frio, verifica-se que devido ao aumento o volume da poça de fusão durante a soldagem minimizou os defeitos entre passes. A Fig. 8 mostra a seção transversal do corpo de prova para o teste P34, onde verifica-se uma boa adesão do revestimento com o substrato.

O ensaio P33 apresentou característica idêntica ao P34, evidenciando-se em ambos os casos uma maior regularidade na superfície do cordão de solda. A diluição foi menor para os ensaios com Arame Frio (P33 e P34), sendo menor ainda para o P34 que teve uma tensão de soldagem maior que o P33, conforme apresentado na Tab. 5.

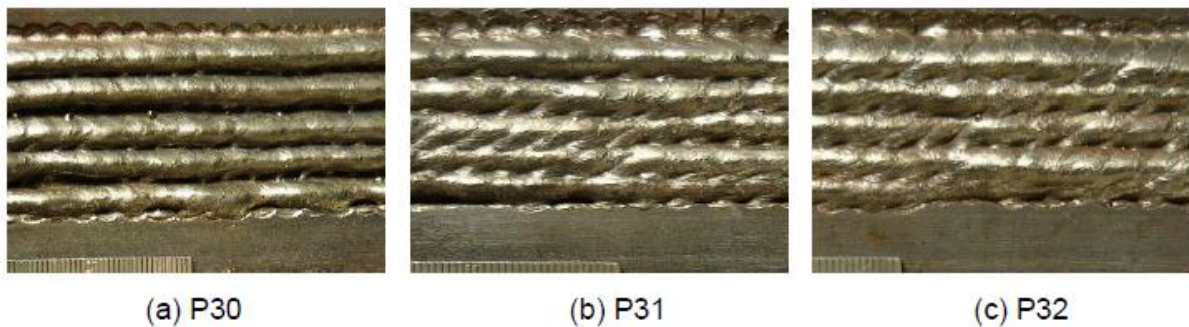


Figura 6: Aspecto superficial do revestimento soldado no MIG/MAG convencional

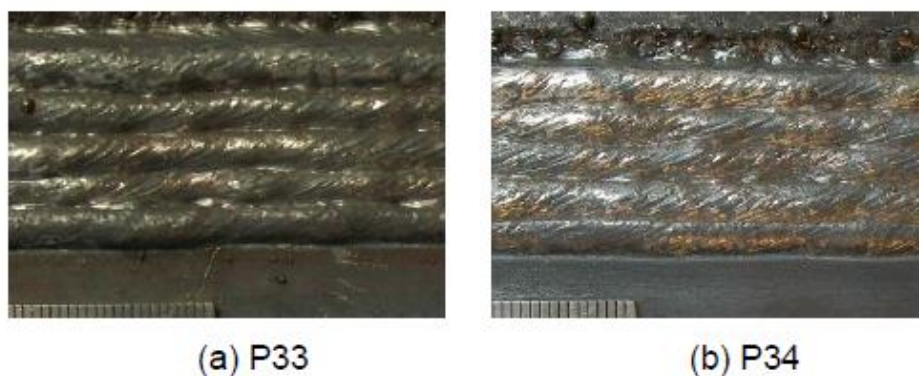


Figura 7: Aspecto superficial do revestimento no MIG/MAG Arame Frio

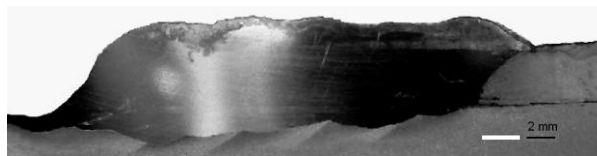


Figura 8: Seção transversal do ensaio P34 com a aplicação dos 5 passes no cordão de solda

3.3. Análise Microestrutural do Ensaio P34

Para a análise microestrutural utilizou-se o ensaio P34 (melhor aspecto superficial e também de menor diluição), foram realizados ataques com o reagente *Marble* composto de 10g de CuSO_4 , 50 ml de HCl e 50ml de água com imersão da amostra por 30s. A Fig. 9(a) ilustra a região do cordão de solda entre o passe 1 e 2. De forma geral, os cordões de solda para os primeiros passes apresentou uma microestrutura típica para uma solda de aço inoxidável austenítico, contendo ferrita δ em espinha e laminar. A microestrutura da região do cordão de solda entre os passes 4 e 5 tem um aspecto similar, conforme Fig. 9(b). Na região da zona fundida (cordão 5, Fig. 9(b)) verifica-se a formação da ferrita δ com morfologia eutética e em espinha. Esta microestrutura está constantemente presente, sendo similar em todos os passes utilizando o arame eletrodo em aço inoxidável austenítico.

Ocorreu nestes ensaios uma variação microestrutural entre os cordões, isto é, o primeiro passe apresentou uma diluição com o substrato maior que os outros, pois o mesmo é o ancoramento do revestimento. A partir do segundo cordão, a diluição com o substrato passa a ser aproximadamente constante. Desta forma, pode-se estimar a quantidade de ferrita analisando a média da diluição entre os passes. A Fig. 10 apresenta o diagrama de Schaeffler para o metal de adição com uma diluição de 14% na faixa obtida no processo MIG/MAG arame frio (ensaio P34). No diagrama, o 1º passe tem uma microestrutura estimada de austenita e 3% de ferrita. A microestrutura no diagrama de Schaeffler tende a estabilizar-se a partir do 2º passe não sendo observadas diferenças significativas para os próximos quatro cordões de solda, com a quantidade de ferrita variando na faixa de 5,1 a 5,3%.

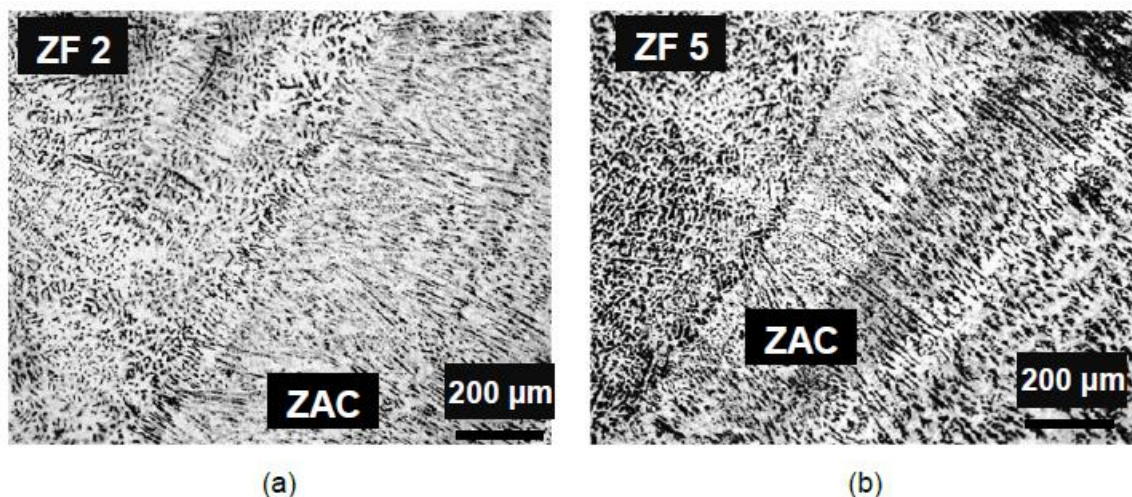


Figura 9: Região entre os cordões de solda para o teste P43 (ZF: zona fundida). (a) região entre o passe 1 e 2 e (b) região entre o passe 4 e 5. A região intermediária corresponde a zona afetada pelo calor (ZAC). Microscopia ótica. 200X

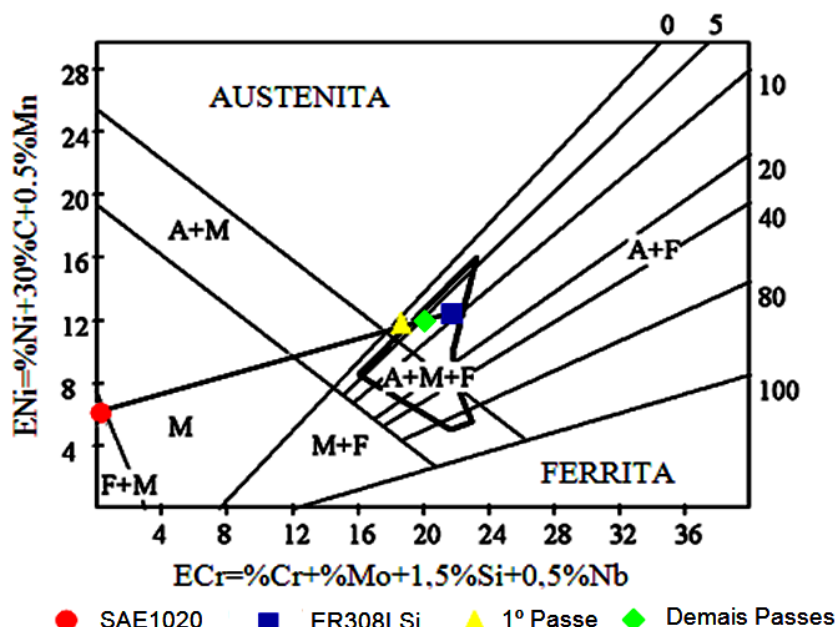


Figura 10: Diagrama de Schaeffler para o metal de adição ER308LSi, com diluição de 14% (ensaio P34)

A Fig. 11 traz a variação de dureza no corpo de prova P34, sendo a Fig. 11(a) a região do cordão 4 e a Fig. 11(b) o cordão 5. Estas medidas foram realizadas entre a ZF do cordão até o substrato (MB), partindo da superfície do cordão de solda.

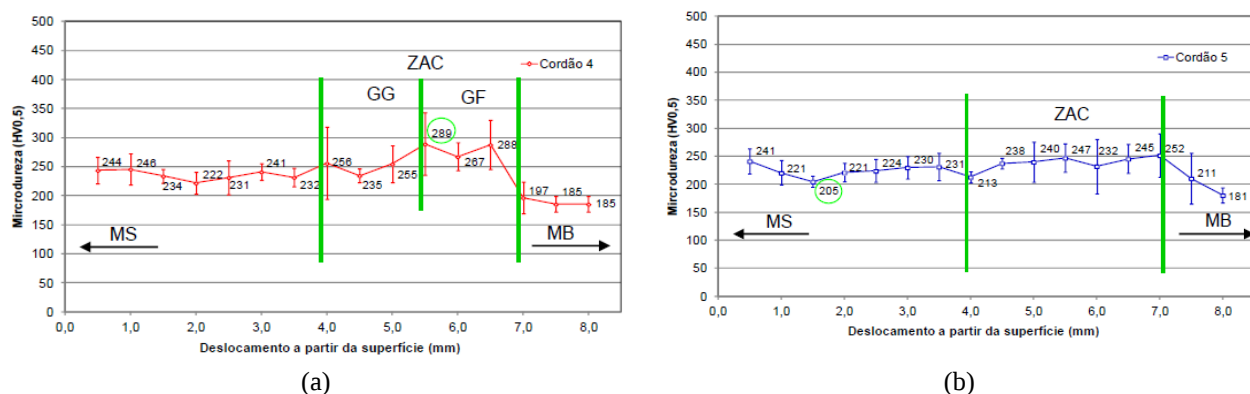


Figura 11: Variação da dureza do metal de solda da superfície do revestimento até a interface substrato/revestimento para o teste P34. (a) Cordão 4 e (b) Cordão 5.

No cordão 4 (Fig. 11(a)), ocorreu uma variação significativa nos valores de dureza, sendo possível a caracterização da ZAC. É perceptível a regularidade das medidas nas zonas específicas (ZF, ZAC e MB), possibilitando demarcar sua extensão. Neste caso específico, tem-se uma ZAC de aproximadamente 3,5 mm. Levando em consideração que a extensão da ZAC é resultado de uma mudança microestrutural, esta dependerá tanto da composição da liga quanto da microestrutura inicial, ou seja, dos passes anteriores e do metal base (MB).

Na Figura 11 (b) observa-se uma homogeneidade maior entre os valores de dureza na ZF e ZAC. Embora parte da ZAC apresente uma característica similar à ZF gerada, esta ainda mantém regularidade na dureza, uma vez que devido aos processos de nucleação e crescimento de fase acontecer no estado sólido, o tempo de desenvolvimento dos mesmos fica limitado pelos períodos experimentados na soldagem. Tomando como referência a zona mais homogênea nos valores medidos, notar-se-á que a região da ZAC mantém a mesma grandeza que a medida para o material soldado.

Avaliando regiões específicas dos cordões de solda envolvendo o cordão 4, ZAC e cordão 5, realizou-se novas medidas de microdureza em cada região, conforme Tab. 6 e Fig. 12.

Tabela 6: Microdureza obtida para o teste P34 HV_(0,5)

Indentação	Cordão 4	ZAC GF	ZAC GG	Cordão 5
1	196,0	232,4	167,9	212,8
2	214,3	208,3	185,2	187,3
3	215,3	246,4	189,4	215,9
4	229,5	205,3	157,7	195,1
5	187,3	228,9	183,2	207,8
Média	208,5	224,3	176,7	203,8
Desvio Padrão	16,8	17,3	13,4	12,2

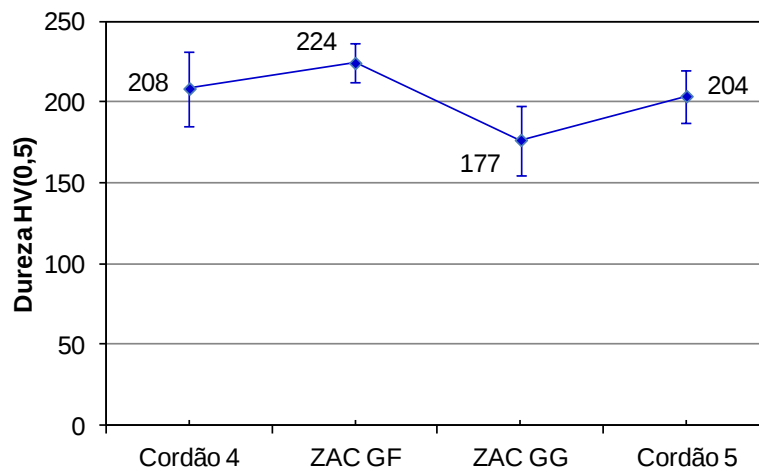


Figura 12: Dureza da região entre o cordão 4 e 5 para o teste P34

Assim como mostrado através do perfil de microdureza (Fig. 11), nota-se o aparecimento de uma fronteira entre as duas regiões principais da ZAC (ZAC-GG e ZAC-GF). Diversos autores frisaram o aparecimento da fase ferrita delta nas duas formas, incluindo Luz (2009). Isto ocorreu provavelmente porque com o aumento da energia (passe 5 sobre o pass4 da ZF) houve a geração de sítios de crescimento que, através de difusão, as partículas menores são agregadas às maiores. Assim, devido ao maior nível de energia da região próxima a zona fundida (ZAC-GG), a ferrita delta presente tende a crescer e gerar a forma poligonal. Tais ocorrências também foram observadas por Luz (2009) ao estudar a ZAC grosseira do aço inoxidável austenítico ER309LSi.

4. CONCLUSÕES

Com o revestimento realizado com o aço inoxidável na posição horizontal com o processo MIG/MAG arame frio, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Foi possível ajustar os parâmetros de aplicação de revestimento de forma a obter uma condição adequada com o processo MIG/MAG Arame Frio;
- O processo de aplicação de revestimento na posição horizontal apresenta forte sensibilidade às variações de seus parâmetros, sendo o ajuste adequado fundamental para evitar os *humpings* e também outros defeitos como a falta de fusão lateral do cordão de solda;
- A capacidade de soldagem na posição horizontal, com o processo MIG/MAG arame frio, depende, entre outros fatores, do ajuste preciso da posição de entrada do arame frio em relação ao energizado e de sua velocidade de alimentação;

- A análise microestrutural mostra que o revestimento apresenta uma matriz austenítica com ferrita eutética, provavelmente ocorreu uma solidificação em austenita primária, com formação de ferrita interdendrítica em reação eutética ao final da solidificação;
- A microdureza ficou com valores dentro do esperado, isto é, valores maiores para a região do cordão de solda (ZAC e ZF) em relação ao metal de base (aço carbono).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento às instituições que apoiaram para realização deste trabalho, FAPEMIG, CNPq, CAPES, UFU e UFG.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 6507-1:2008, Materiais Metálicos – Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
- Bonacorso, N. G. (2004). Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte. 2004. 96 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- Cruz Junior, L. P. S. et al. (2011). Influência da Variação do Tecimento, Ângulo de Ataque e Velocidade de Alimentação sobre a Geometria de Cordões de Revestimento pelo Processo MIG-DWOA. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul.
- Lobato, J. C. da S.; Braga, E. M. (2011). Análise das Juntas Soldadas pelo processo GMAW – Arame Frio. In: XXXVII Congresso Nacional de Soldagem, 2011, Natal.
- Luz, T. de S. (2009). Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem do Aço Inoxidável Ferrítico com 11% de Cromo. 2009. 233 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Motta, M. F. (2002). Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento. 2002. 153 p. Tese (Doutorado), UFSC, Florianópolis, 2002.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

DETERMINATION OF WELDING PARAMETERS FOR APPLICATION IN COATING IN HORIZONTAL POSITION WITH THE PROCESS MIG / MAG WIRE COLD

Henrique Nardon Ferraresi¹
Hebert Roberto da Silva²

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica. Av. João Naves de Ávila 2121, Campus Santa Mônica, CEP 38.400-902, Uberlândia, MG, Brasil, e-mail: henrique_ferraresi@hotmail.com.

²Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus Aparecida de Goiânia, Rua Mucuri, s/n - Setor Conde dos Arcos CEP: 74.968-755 - Aparecida de Goiânia, GO, Brasil, e-mail: hebert.roberto@ufg.br.

Abstract: The welding process MIG/MAG with your applications using two wires, points in the market as an alternative to coating when high productivity is desired. Arise potential variants of this process such as MIG / MAG cold wire and double wire. A major difficulty is the adjustment of its parameters, which, in addition to duplicate compared to conventional MIG/MAG operate dependently. A better understanding of this technology applied to wear resistant coatings in different positions is fundamental so that you can master the process and its variables, aiming to enhance the application in industry. Due to their ease and simplicity, the general studies on coating application include welding on plane, not showing procedures for disposal in the other headings. The objective of this work is to make a systematic study to obtain adequate welding parameters with the MIG/MAG Cold Wire processes, to produce coatings soldiers from stainless steel commercial alloys. MIG/MAG Cold Wire and conventional process were used in horizontal position, to obtain an evaluation under the same conditions of field welds. The results showed that there are suitable conditions for coating application this position the welding process using conventional MIG / MAG and cold wire. However, the best coating conditions depend, among other factors, the precise setting of the input position of the cold wire against the energized and its feeding speed.

Keywords: MIG/MAG Cold Wire; horizontal position; welding parameters, coating.