

Avaliação do processo de soldagem por deposição de metal regulada em aplicações de revestimento

RESUMO

Willian Marques da Silvawillian.marques@protonmail.com

orcid.org/0000-0002-2130-800X

Universidade de Mogi das Cruzes

(UMC), São Paulo, São Paulo,

Brasil.

Rafael Rocha Maiarafael.maia01@fatec.sp.gov.br

orcid.org/0000-0002-6935-5032

Faculdade de Tecnologia de

Itaquera (FATEC), São Paulo, São

Paulo, Brasil.

Paulo Henrique Ogatapaulo.ogata@fatec.sp.gov.br

orcid.org/0000-0002-9219-7140

Faculdade de Tecnologia de

Itaquera (FATEC), São Paulo, São

Paulo, Brasil.

Fabio Conte Correiafabio.correia@fatec.sp.gov.br

orcid.org/0000-0002-6971-7881

Faculdade de Tecnologia de

Itaquera (FATEC), São Paulo, São

Paulo, Brasil.

Douglas Moraesdouglas.morais@fatec.sp.gov.br

orcid.org/0000-0001-6427-0331

Faculdade de Tecnologia de

Itaquera (FATEC), São Paulo, São

Paulo, Brasil.

Este trabalho investigou os benefícios gerados pelo curto-circuito controlado (CCC) do processo de soldagem *Regulated Metal Deposition* (RMD) em relação ao processo *Pulsed Gas Metal Arc Welding* (GMAW-P) quanto à aplicação de revestimentos anticorrosivos sobre aços de baixo-carbono. O estudo foi feito através de um comparativo entre processos, para tal, foram mantidos os valores de velocidade de arame, insumos e se trabalhou com velocidades de soldagem em faixas próximas sem comprometer a estabilidade do processo. Foram avaliados os aspectos visuais e geométricos dos depósitos através da análise macrográfica de corpos-de-prova e cálculo dos níveis de diluição impostos pelos processos, além de aspectos econômicos. Foram obtidos como resultados que o RMD apresentou um melhor acabamento de cordão, produziu uma área fundida menor com proporcional diluição sendo em torno de 8% a menos de metal base diluído, empregou menores quantidades de calor com leve inclinação para uma taxa de deposição de 7% a mais de metal depositado. Por fim, o RMD apresentou maior simplicidade operacional e menor consumo de energia.

PALAVRAS-CHAVE: metalurgia; soldagem; curto-circuito controlado.

INTRODUÇÃO

Atualmente no campo da soldagem existe uma gama de processos consolidados que são utilizados nas mais diversas aplicações de união de metais. O processo de soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) é um dos processos de soldagem a arco mais usuais devido a sua versatilidade, soldagem em todas as posições, possibilidade de união de chapas finas e uma boa qualidade de soldagem nos passes de raiz. Com o controle adequado da energia de soldagem é possível de se obter três modos de transferência do metal que são: curto-circuito, globular, spray (aerossol) (WAINER *et al.*, 2004), (POEPCKE,1997).

O processo de soldagem GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional apresenta um alto índice de geração de respingos e um acabamento do metal de solda irregular (ZHU *et al.*, 2007). Além do fato de que a fonte de potência usada para este processo não permite um controle preciso das variáveis presentes no modo de transferência metálica, o que dificulta a aplicação deste processo na soldagem considerada de alta responsabilidade (JUNIOR GOHR, 2002).

No entanto, por ser um processo semiautomático e que apresenta bons índices de produção e a facilidade de automação, o processo GMAW motivou a pesquisa na busca pelo aprimoramento e controle do modo de transferência metálica (MODENESI *et al.*, 2009). Essa busca permitiu o desenvolvimento de novas técnicas relacionadas às fontes de controle de energia garantindo maior controle do processo e, conseqüentemente, aumentando a aplicação deste processo e a qualidade nas juntas soldadas produzidas (JUNIOR GOHR, 2002). O aperfeiçoamento do processo decorrente dos avanços tecnológicos introduzidos nas fontes de energia permitiu um maior controle dos parâmetros de soldagem em tempo real e aumentou a aplicabilidade nos diversos segmentos da indústria (MACHADO, 1996). Concomitantemente, o desenvolvimento de novos maquinários trouxe consigo um aumento no número de variáveis controláveis tornando a operação mais complexa, o que fez com que houvesse uma necessidade de maior qualificação profissional para usufruir destes novos benefícios encontrados na utilização das novas tecnologias empregadas (JUNIOR GOHR, 2002).

Silva *et al.* (2010) estudou o desenvolvimento do Processo de Soldagem *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG) em Transferência Metálica por Curto-circuito com Controle de Corrente (CCC), dedicado à execução do passe de raiz da solda de dutos, na construção *offshore* de linhas dutoviárias petrolíferas. Através do controle da corrente, em uma forma de onda otimizada, houve estabilidade ao processo de soldagem e à poça de fusão. Na pesquisa foi desenvolvido um sistema variante do MIG/MAG que apresentou as vantagens da transferência metálica por curto-circuito e evitando seus inconvenientes. Os resultados obtidos confirmaram a superioridade do MIG/MAG em relação ao ER, em termos de produtividade, na solda de dutos. Também se reportou a rápida adaptação dos soldadores ao MIG/MAG.

No entanto, a relutância à implantação de novas tecnologias por parte do corpo fabril das indústrias é nítida ao se entrar no chão de fábrica e visualizar a predominância de processos convencionais consolidados, ocorrência que dificulta e, por vezes, adia maiores investimentos em melhorias de processos e novas

aplicações. Como ação preventiva, algumas instituições têm investido em recursos computacionais aplicados aos equipamentos, o que proporcionou aos usuários possibilidade de trabalho com a tecnologia controle por um botão (*one-knob control*) que permite a regulagem das máquinas com poucos ou um único botão (JUNIOR GOHR, 2002). Foi notado que o progresso das inovações tecnológicas permitiu uma evolução dos equipamentos e consequentemente abriu espaço para validação de novos processos de soldagem com grandes vantagens sobre as técnicas tradicionais em diversas aplicações (FILHO, 2014).

Os processos com controle de transferência metálica surgiram neste contexto. Estes processos, enquanto variações do GMAW, são baseados no controle da forma de onda da corrente com objetivo de se obter um maior controle no modo de transferência metálica e evitar uma elevada energia de soldagem, a geração de respingos, possíveis distorções do metal de base e obter uma melhor estabilidade do arco durante a transferência. Por exemplo, o processo *Regulated Metal Deposition* (RMD) tem seu controle feito eletricamente durante a fase de curto-circuito sendo conhecida como processo GMAW com CCC (SCOTTI *et al.*, 2008).

No processo de soldagem onde o modo de transferência ocorre por curto-circuito convencional durante o contato entre a gota e a poça de fusão, ocorre um aumento abrupto do pico de corrente favorecendo a atuação de forças eletromagnéticas que ajudam no destacamento da gota na interface gota-arame. Esse mecanismo promove a projeção da gota em direção à poça de fusão de modo violento devido ao alto pico de corrente durante o curto-circuito, resultando na explosão do metal líquido na forma de respingos (COSTA *et al.*, 2012).

No processo RMD, durante o contato entre a gota e a poça de fusão há uma sinalização para o sistema eletrônico da fonte que atua sobre a corrente e a tensão durante o curto-circuito, sendo possível ocorrer o destacamento da gota de modo menos agressivo reduzindo os respingos, as forças de reação sobre a gota e garantindo uma maior estabilidade do arco durante a transferência metálica (SCOTTI *et al.*, 2008). Parâmetros específicos como comprimento de arco apresenta forte influência sobre a tensão do arco e a geometria do cordão. O comprimento de arco faz com que haja um aumento da largura do cordão e uma redução da penetração, o que favorece a aplicação de soldagem de revestimento e a soldagem de chapas mais finas (MILLER, 2016). Outra vantagem é a possibilidade de trabalhar com o modo transferência por curto-circuito, mas com uma menor energia de soldagem reduzindo os percentuais de diluição e a ocorrência de respingos (ZEEMANN, 2016).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar quais são os efeitos das restrições da corrente no processo RMD na energia de soldagem. Para isso, serão verificados os efeitos dos baixos índices de aporte térmico, a diluição durante um processo de revestimento com aço inoxidável austenítico e os aspectos técnicos e econômicos comparados aos novos processos similares.

Gohr *et al.* (2016) analisou a viabilidade de implantação do processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlado na soldagem dos passes de raiz, em substituição ao processo TIG e observou um aumento da produtividade em até 400%, tornando essa substituição bastante atrativa, além

de promover redução de custos com mão de obra e consumíveis de aproximadamente 43%.

Modenesi (2001) afirma que durante a soldagem de revestimento com aços inoxidáveis austeníticos podem ocorrer transformações metalúrgicas e consequente redução da resistência à corrosão. Isso acontece porque carbonetos, nitretos e outras fases deletérias podem se formar quando estes materiais são submetidos a elevadas faixas de temperatura termodinamicamente favoráveis.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para desenvolvimento do trabalho, foi utilizada uma fonte de soldagem MILLER PIPEWORX 400, ângulo de ataque positivo ($75^\circ \pm 5^\circ$) com a superfície da peça a ser revestida. Metais de adição arames-eletrodo da classe A5.9 ER-316LSi (**Quadro 1**), diâmetro 1,0 mm na condição de material do revestimento. Chapas de teste em aço carbono ASTM A-3615 (**Quadro 1**) com dimensões de 255 x 55 x 12,5 mm empregados como metal-base. Como gás de proteção foi utilizado uma mistura gasosa composta por 95% Argônio (Ar) + 3% Nitrogênio (N₂) + 2% Dióxido de Carbono (CO₂) a uma vazão de 15L/ min durante a operação.

Quadro 1 - Composição química do metal de adição (1) e metal base (2)

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	%P	%Cu	%Fe
Bobina ER 316LSi(1)	0,02	1,70	0,85	12,50	19,00	0,002	0,40	Balanço
Chapa A36(2)	0,18-0,23	0,6-0,9	0,4 máximo	-	-	0,04 máximo	0,05 máximo	Balanço

Fonte: Adaptado de *ASTM, 2014 e Hobart, 2016.

Métodos

De início, foi realizada uma busca para encontrar os parâmetros adequados à soldagem. Como critério para definição de parâmetros otimizados se considerou a máxima condição operacional, na qual o acabamento superficial dos cordões deixasse de ser regular e o rendimento do equipamento não fosse prejudicado.

Para tal, foi fixada uma velocidade de alimentação de arame (V_a) máxima para o processo RMD que coincidiu com o máximo do parâmetro *arc length*. A partir deles se chegou às demais variáveis específicas reguláveis, através da soldagem de diversos cordões de solda depositados previamente em uma chapa avulsa, os quais foram observados qualitativamente a estabilidade do processo e depósito.

O mesmo procedimento de ajuste foi adotado para o processo GMAW-P; porém, vale ressaltar que a velocidade de alimentação ficou no máximo recurso de potência e operação de 8,9 m/min para o equipamento e processo RMD, enquanto o GMAW-P apresentou possibilidade de alcance até 18,9 m/min. Os

valores de regulagem obtidos para os processos de soldagem estão descritos na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Parâmetros específicos de regulagem dos Processos RMD e GMAW-P

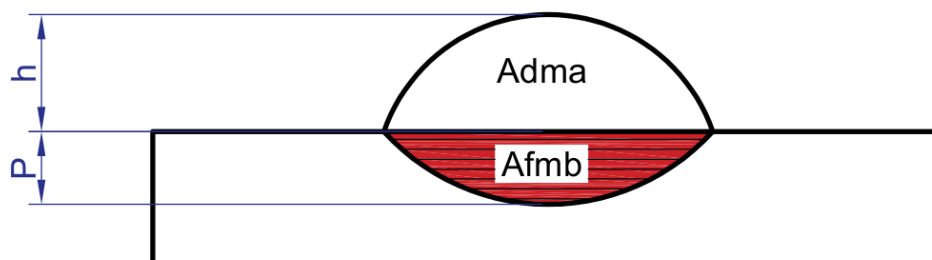
	Comprimento do Arco	Controle do Arco	Ajuste do Arco	Va (m/min)
RMD	3	1,5	-	8,9
GMAW-P	0	0	0	8,9

Fonte: Autoria própria.

Para efeito de comparação entre processos, foram mantidos os parâmetros de consumíveis, equipamentos, dimensões, técnicas de operação e velocidades de alimentação de arame (8,9 m/min) em ambos. Foi assumido aqui as possíveis diferenças nas taxas de deposição, bem como as variações na energia de soldagem devido a velocidade de soldagem (V_s) não fixa.

Ainda que ocorra, o foco em uma aplicação de revestimento por soldagem será a velocidade de aplicação— objetivando produtividade; baixa diluição— para garantir o resultado esperado dos elementos depositados sem grande número de passes; maior área recoberta e menor volume depositado— pensando em custo de material e níveis de tensões térmicas sobre a área de aplicação o que está compatível com o objetivo da avaliação. Como critério comparativo, definiu-se o aspecto visual dos cordões de solda (incidência de respingos), geometria da região soldada (**Figura 1**) além da largura L que foi tomada a cada passe a diluição D , o volume de metal depositado V_{dma} e a área revestida A_{dma} para preenchimento de uma mesma superfície.

Figura 1 - Características geométricas do revestimento



Fonte: Autoria própria

Caracterização e Avaliações

Depois de recobertas, as chapas foram seccionadas e preparadas para análise metalográfica. As seções foram atacadas com solução de Nital 2%, fotografadas com câmera digital e analisadas para definir as características geométricas do revestimento.

A avaliação da geometria foi feita com auxílio do programa computacional de tratamento de imagem *ImageJ*. Pelas áreas proporcionais à quantidade de metal base e metal de adição fundidos apresentados na **Figura 1**, os percentuais de diluição foram calculados para os dois processos através da seguinte equação (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2016):

$$\%D = \frac{A_{fmb}}{(A_{dma} + A_{fmb})} \times 100 \quad (1)$$

sendo:

D = Diluição ou Coeficiente de diluição (em %);

A_{fmb} = Área fundida do metal-base (em mm²);

A_{dma} = Área depositada do metal de adição (em mm²).

Por se tratar de uma aplicação de revestimento anticorrosivo, elementos que contribuem negativa e positivamente com essa característica necessitam ter mensurados sua participação na zona fundida. Então, manipulando a equação inicial da diluição foram calculados a participação dos elementos Carbono (C) e Cromo (Cr) no metal fundido de acordo com Marques (2014):

$$\%X = \left(1 - \frac{D}{100}\right) \times \%X_a + \left(\frac{D}{100}\right) \times \%X_b \quad (2)$$

sendo:

D = Diluição ou Coeficiente de diluição (%);

%X = concentração de um elemento na zona fundida (%);

%X_a = concentração do elemento no metal de adição (%);

%X_b = concentração do elemento no metal base (%).

A energia de soldagem H foi utilizada para comparar o aporte térmico introduzido pelos dois processos e foi calculada através da equação abaixo sem considerar o rendimento térmico η do processo de soldagem utilizado já que o rendimento varia com diversos parâmetros operacionais de soldagem Marques (2014);

$$H = \frac{V \times I}{V_s} \quad (3)$$

sendo:

H = energia de soldagem (J/mm);

V = tensão de soldagem (V);

I = corrente de soldagem (A);

V_s = velocidade de soldagem (mm/s).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos quantitativos dos processos RMD e GMAW-P

Os valores coletados de corrente, tensão e velocidade de soldagem de cada cordão foram listados no **Quadro 2**, juntamente com os valores calculados de energia de soldagem H e larguras L medidas.

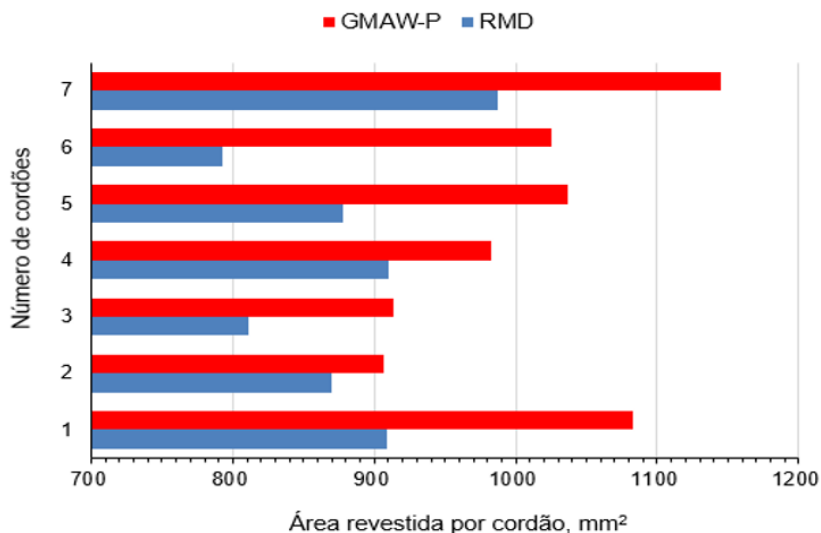
Quadro 2: Valores medidos e calculados para RMD e GMAW-P

	Nº cordões	Tensão (V)	Corrente (l)	Vs (mm/s)	Energia de Soldagem (J/mm)	Largura L (mm)
RMD	1	19,5	125	7,3	334	7,4
	2	19,1	126	5,9	408	7,2
	3	19,0	126	6,2	386	6,8
	4	19,4	123	5,9	404	7,5
	5	19,7	120	5,1	464	7,2
	6	19,4	124	5,9	408	6,7
	7	19,9	118	5,9	398	7,9
	8	20,2	115	5,9	394	8,2
GMAW-P	1	21,9	131	7,3	393	8,7
	2	22,3	118	5,4	487	7,6
	3	22,3	122	5	544	7,6
	4	22,4	114	7,4	345	7,8
	5	22,3	124	6,4	432	8,1
	6	22,3	121	6,7	403	8,5
	7	22,3	117	5,6	466	9,8

Fonte: Autoria própria.

Foi observado nos corpos de prova que o número necessário de cordões de solda para revestimento de uma mesma área obtido por RMD foi superior à quantidade de cordões por GMAW-P. Com os resultados apresentados no **Quadro 2** pode-se quantificar a diferença entre as áreas dos cordões por meio dos valores de largura L de cada cordão conforme **Figura 2**.

Figura 2 – Gráfico comparativo de largura L entre processos



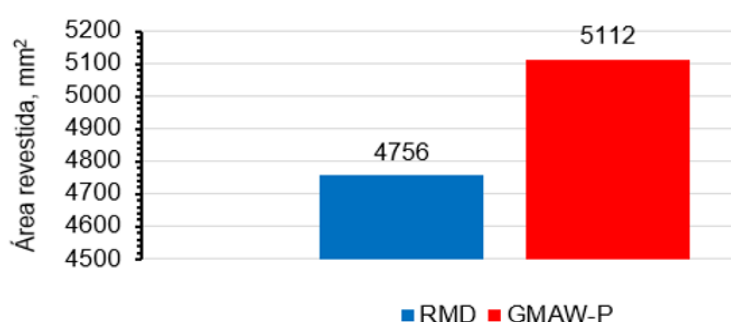
Fonte: Autoria própria.

As áreas individuais de cada cordão foram calculadas e se mostraram superiores em todos os passes executados por GMAW-P. Provavelmente, a diferença de largura L entre cordões se deu a maiores valores de tensão necessários para atingir o modo de transferência da gota nos passes realizado por

GMAW-P que contribuiu para o alargamento desses cordões. Tais valores corroboraram para dimensões superiores da largura L dos cordões GMAW-P em relação ao RMD, uma vez que a tensão está diretamente relacionada com o comprimento de arco que por sua vez refletiu no formato do cordão. A influência da tensão foi mais nítida para os cordões com velocidades de soldagem iguais no RMD, os quais apresentaram aumento da largura L proporcional ao aumento das tensões (**Quadro 2** – cordões 2, 4, 7 e 8).

A **Figura 3** apresenta as áreas totais revestidas para os dois processos. Estas áreas calculadas foram baseadas na largura total do revestimento após a soldagem e não sobre a largura L individual dos cordões devido à sobreposição de passes.

Figura 3 - Gráfico comparativo de áreas revestidas para um mesmo comprimento

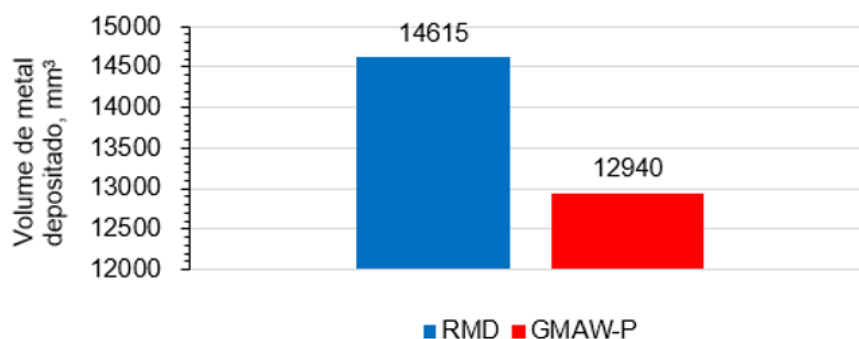


Fonte: Autoria própria.

Quanto maior a largura de cordão individual maior foi área recoberta, considerando o mesmo comprimento e número de cordões produzidos. Por meio da **Figura 3** é possível perceber que os valores de largura L refletiram sobre as áreas encontradas independentemente da sobreposição.

Considerando a área transversal de cada depósito calculada anteriormente, foram determinados os valores de volumes depositados por processo de soldagem (**Figura 4**).

Figura 4 – Gráfico comparativo dos depósitos



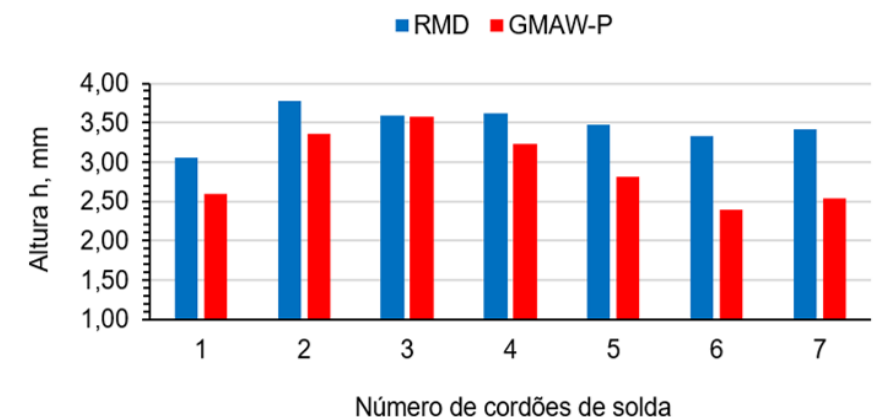
Fonte: Autoria própria.

O processo RMD apresentou volume de material depositado superior ao processo GMAW-P sendo este inversamente proporcional aos valores de área

encontrados para os processos. Maior volume depositado significa maior quantidade de metal de adição aplicado e em termos de custos é um problema para materiais nobres. Entretanto, outros fatores devem ser considerados para avaliação no caso de revestimentos. Neste estudo se enfatizou a altura h.

Para obter a dimensão h foi realizado a análise da seção transversal dos corpos de prova através do programa computacional *ImageJ*. Na **Figura 5** estão informadas as dimensões encontradas para a altura h em ambos os processos.

Figura 5: Gráfico comparativo entre alturas h

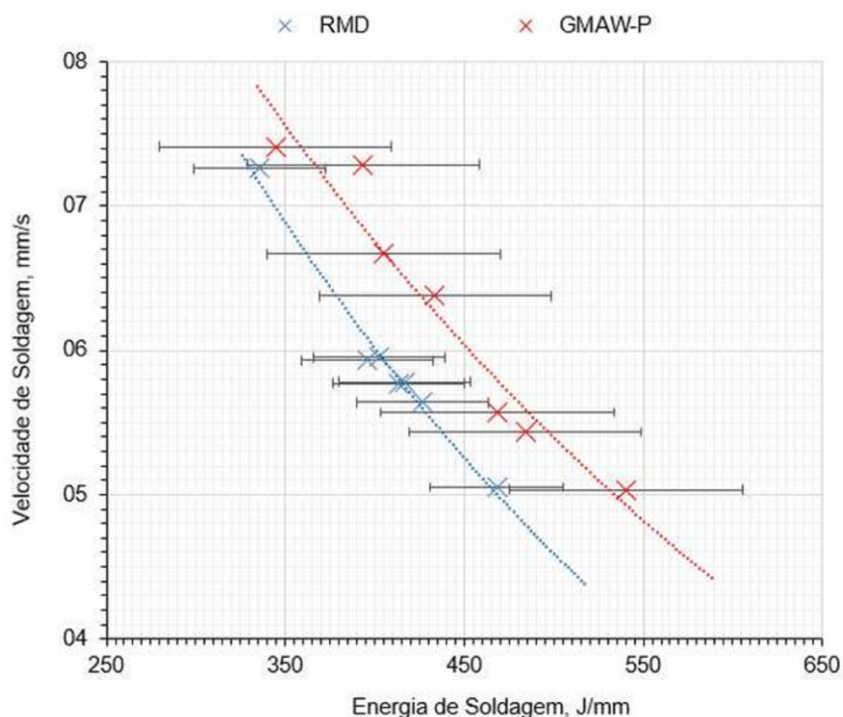


Fonte: Autoria própria.

Foi identificado que o processo RMD apresentou valores maiores de altura h medidos. Isso explica o volume de metal depositado superior para uma mesma área. Em aplicações em que espessuras de camadas são importantes, uma altura h resulta em menor tempo de aplicação, onde dispensaria a necessidade de camadas adicionais para atingir uma dimensão específica.

A **Figura 6** expõe valores da energia de soldagem dos processos em estudo para as mesmas faixas de velocidade, ambas informadas no **Quadro 2**.

Figura 6: Gráfico comparativo da energia de soldagem entre processos



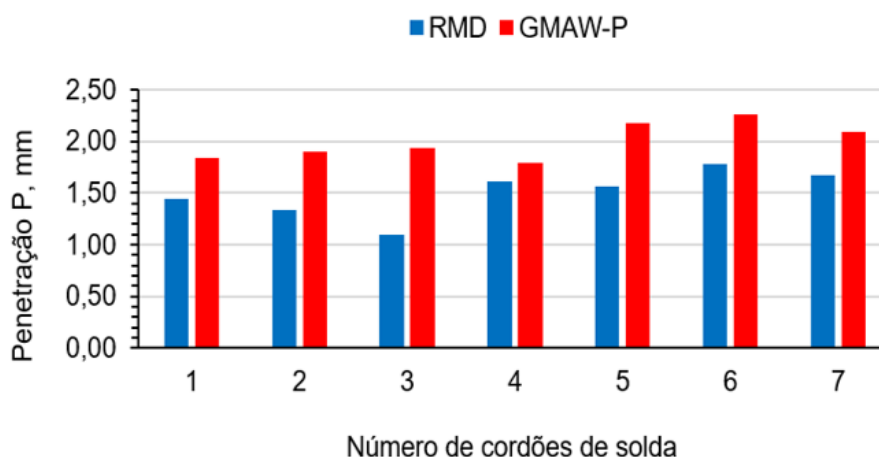
Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na **Figura 6** indicam que há quantidades maiores de energia desprendida para o processo GMAW pulsado. Valores elevados da energia de soldagem como característica do processo demonstram um consumo maior do produto potência (tensão-corrente) para faixas de velocidade muito próximas.

O emprego de grandes densidades de calor não representa necessariamente uma vantagem para aplicações em que baixos níveis de energia são desejados e a introdução de grandes quantidades de energia térmica tende a um aumento dos níveis de tensões térmicas nos cordões soldados (GOODWIN, 1988). Além disso, o fato de existir uma tendência de compensação entre parâmetros, justificável pela sinergia do processo, tornou difícil determinar precisamente o comportamento das variáveis tensão e corrente, o que impossibilita afirmar o valor exato da energia imposta pela operação ou qual processo gerou maior aporte térmico, exigindo um estudo mais aprofundado referente às variáveis em questão.

As profundidades de penetração P referente a cada cordão soldado estão mostradas na **Figura 7**.

Figura 7: Gráfico comparativo de penetração dos cordões de solda para cada processo

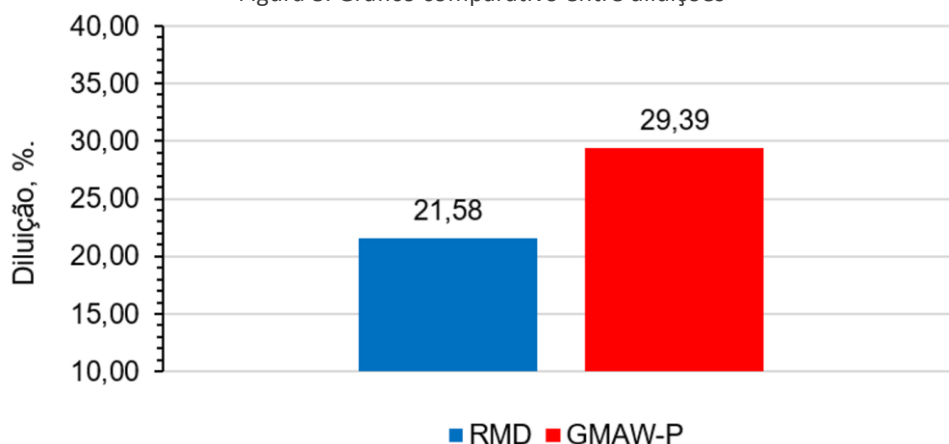


Fonte: Autoria própria.

As penetrações resultantes da soldagem por GMAW-P se mostraram maiores em relação ao processo RMD. As profundidades atingidas pelo processo GMAW-P podem ser explicadas por particularidades do processo como a amplitude de onda na corrente que mantém seus picos mais elevados para o destacamento da gota, pela força de arraste gerada dos gases de proteção impulsionando a gota já formada em direção a poça de fusão e o arco voltaico que tende a ser mais quente devido ao modo de transferência metálica aerossol (KIM; EAGAR, 1993).

A **Figura 8** mostra os valores de diluição obtidos para os dois revestimentos. Seus cálculos foram baseados sobre a área transversal total do revestimento por ser a região possível de obter uma medição mais exata do que avaliação sobre o cordão individual.

Figura 8: Gráfico comparativo entre diluições

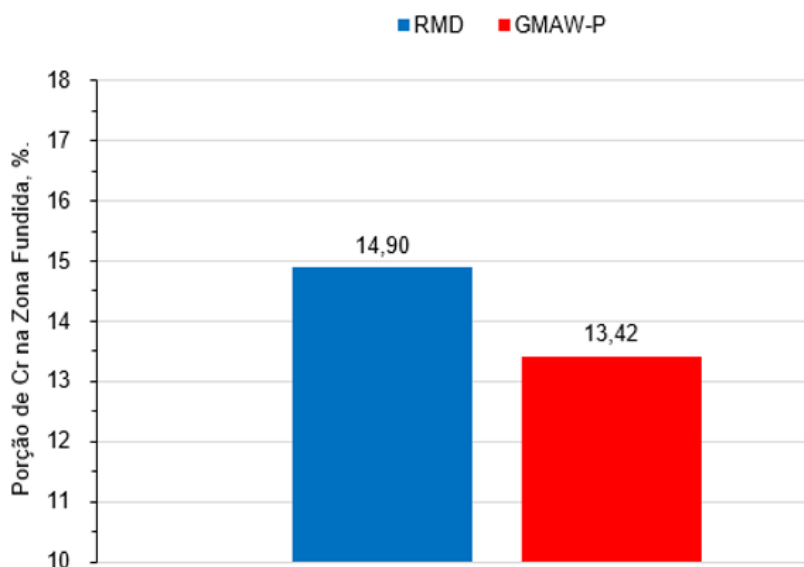


Fonte: Autoria própria.

Foram encontrados valores menores de metal base diluídos para o RMD. Apesar dos baixos índices, eles se mostraram acima da faixa ideal em ambos os processos para aplicações em que se exigem baixos níveis de diluição como em revestimentos (10 a 15%) (SILVA, 2010).

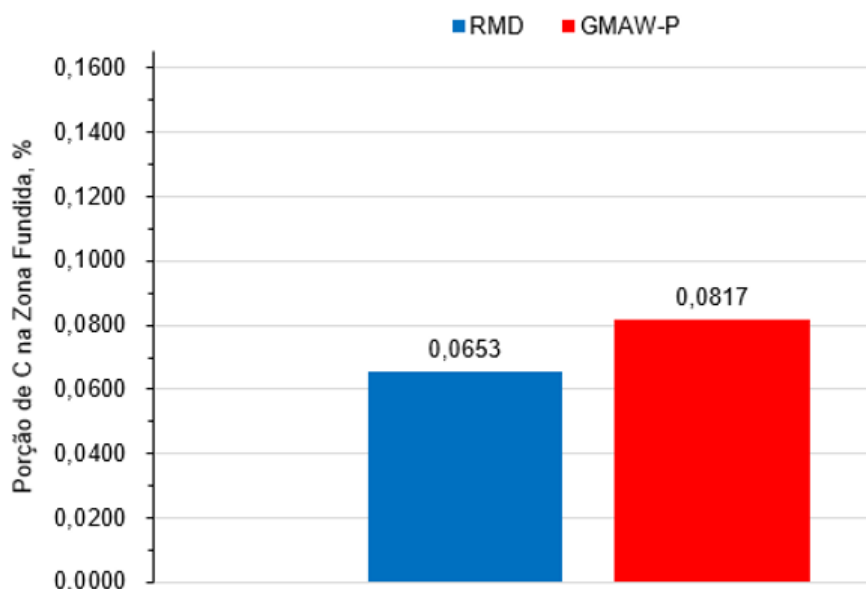
Ainda que os valores de diluição apresentaram-se fora da faixa ideal para revestimentos, as proporções dos elementos cruciais para garantia das características do metal depositado indicaram uma tendência para níveis aceitáveis no processo RMD (**Figuras 9 e 10**). Assim, é possível afirmar pelas **Figuras 8, 9 e 10** que quanto menor a energia de soldagem menor será o nível de diluição na zona fundida assim como menor será a perda de elementos (HUNT; KLUKEN; EDWARDS, 1994).

Figura 9 - Gráficos representativos da participação do elemento Cr na zona fundida



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 - Gráficos representativos da participação do elemento C na zona fundida

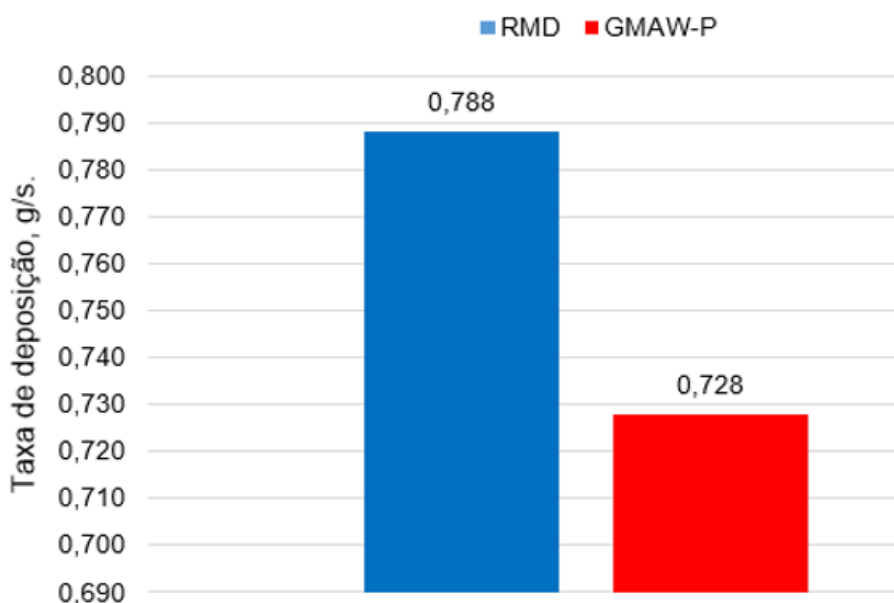


Fonte: Autoria própria.

Em termos práticos, não se observou diferenças de velocidades significativas entre os processos, podendo ser considerado um tempo de execução aproximadamente igual para ambos. Em contraste, a taxa de deposição para o

RMD se mostrou maior em relação ao GMAW-P com energias de soldagem menores (**Figura 11**). É possível atingir velocidades de alimentação do arame mais elevadas com GMAW-P, além do limite alcançado no RMD, que poderia afetar os resultados atuais do processo. Porém, isso traria como consequências um aumento da energia de soldagem, o que tenderia a geração de maiores distorções e elevados índices de diluição.

Figura 11 - Taxas de deposição dos processos



Fonte: Autoria própria.

Aspectos qualitativos dos processos RMD e GMAW-P

Durante a aplicação dos passes individuais por RMD não foram observadas mudanças relevantes de geometria dos cordões de solda quanto à altura e largura (**Figura 12**). Por se tratar de uma aplicação manual, a variação presente na velocidade de soldagem e *stick-out* (Distância Bico Peça – DBCP) deveriam impactar as características de forma dos cordões e suas respectivas penetrações (Souza, 2011) (Lermen, 2011).

Figura 12 - Vista de perfil dos cordões por RMD



Fonte: Autoria própria.

Ainda assim, o fato pode ser justificado pela sinergia do processo e a condição de estabilidade imposta ao se utilizar parâmetros otimizados ajustados

previamente. Então, uma vez que foi mantida a estabilidade da operação, oscilações na velocidade de soldagem e DBCP se mostraram sem influência significativa sobre o perfil do revestimento e profundidade de penetração que se manteve em faixas constantes. Esses resultados indicam uma equivalência com processos usuais de soldagem em aplicações sobre regiões de uma junta soldada impraticáveis até então devido à baixa confiança no controle das variáveis.

Na **Figura 12** foi notada para o RMD a existência de uma altura de reforço h excessiva em relação à largura L de cada cordão, assim como uma largura L maior em relação a sua largura de penetração P . Esta condição se repete para o perfil de revestimento obtido no processo GMAW-P, porém apenas na comparação de larguras entre cordão e penetração (**Figura 13**).

Figura 13 – Vista de perfil dos cordões por GMAW-P



Fonte: Autoria própria.

Ao considerar uma soldagem de união entre dois componentes com os perfis de cordões representados na **Figura 12**, a altura excessiva do reforço para o processo RMD poderia representar um problema (ponto de concentração de tensões e possível nucleação de trincas) nos casos em que se tem um ângulo muito acentuado formado entre a borda do cordão e a superfície da chapa, podendo ser citado a soldagem de tubulações de alta pressão. Por isso, o ângulo excessivo na altura do reforço não pode ser considerado um problema generalizado devido à existência de aplicações em que as solicitações de esforços mecânicos ligados a concentração de tensões não constitui a razão de sua aplicação, como é o caso do revestimento de superfícies corrosivas.

Vale enfatizar a forma pontiaguda resultante na região de penetração em ambos os processos sendo mais evidente no processo GMAW-P pela tendência de misturas ricas em Ar comparado a CO_2 favorecerem o seu modo de transferência spray (aerossol). Tais misturas gasosas tendem a produzir essa geometria de extremidade mais aguçada em virtude das altas faixas de energia no centro do arco proporcionando melhor efetividade térmica no meio do cordão de solda (VAIDYA, 2002).

Outro aspecto sobre os cordões de solda obtidos por GMAW-P é o alargamento nos perfis dos passes e diminuição das alturas h (**Figura 13**). Resultados condizentes com os valores de potência atingidos neste modo de transferência devido a energia de soldagem mais elevada do GMAW-P que produziu maior aporte térmico na superfície a revestir, proporcionando uma maior molhabilidade (alta tensão) da poça de fusão que por sua vez acomodou cordões de modo mais espalhado em relação aos cordões obtidos por RMD (EL RAYES; WALZ; SEPOLD, 2004) (MONDAL, 2016).

Apesar de não impactante, o valor da tensão de arco no processo RMD foi inferior ao GMAW-P. O fato de possuir uma tensão menor, como pode ser observado no **Quadro 2**, leva a um consumo menor de energia.

Além disso, uma atenção especial deve ser dada a facilidade do manuseio operacional do RMD observada durante a confecção dos corpos de prova que se resumiu a uma regulagem de dois botões. O processo GMAW-P possui a mesma praticidade, porém dentre suas variáveis existe o *arc adjust* (ajuste de arco) relacionado às características do arco em sua totalidade, exigindo um tempo maior de treinamento sobre seus efeitos e o melhor modo de empregar suas vantagens.

Exame Visual

Foi avaliado o aspecto visual dos cordões de solda de cada revestimento a fim de detectar a presença de descontinuidades superficiais e/ou entre cordões. Ambos os processos apresentaram pouca ou nenhuma incidência de respingos e nenhuma descontinuidade aparente. O perfil do revestimento por RMD manteve uma altura h mais homogênea em relação ao GMAW-P com perfil de cordão mais liso enquanto os cordões por GMAW-P apresentaram melhor distribuição por área ocupada.

CONCLUSÃO

O uso do RMD em substituição a processos com características aparentes de melhor desempenho como GMAW pulsado para aplicação de revestimentos foi capaz de proporcionar vantagens econômicas como menor consumo de energia e uma leve tendência a maior taxa de deposição (em torno de 7%) para as mesmas velocidades de soldagem com menor aporte térmico, melhor acabamento do revestimento, menor área fundida do metal de base e, conseqüentemente, menores índices de diluição com 8% a menos de metal base diluído, além de mostrar simplicidade de operação sem a exigência de grandes períodos de adequação da rotina fabril.

Evaluation of the regulated metal deposition (RMD) welding process in coating applications

ABSTRACT

This work investigated the benefits generated by the short circuit controlled (CCC) of the Regulated Metal Deposition (RMD) process in comparison of the Pulsed Gas Metal Arc Welding (GMAW-P) process for the application of anticorrosion coatings on low-carbon steels. The study was done by comparing processes. The wire speed values and the supplies were maintained and the welding speeds were applied in the close ranges without compromising the stability of the process. The visual and geometrical aspects of the deposits were evaluated through the macrographic analysis. The calculation of the dilution levels imposed by the processes as well as economic aspects was used as measurement criteria. RMD showed a better weld bead, produced a smaller cast area with proportional dilution, and showed a 7% higher deposition rate. In addition, RMD employs a lower quantity of heat, has better operational simplicity and has lower energy consumption.

KEYWORDS: metallurgy; welding; controlled short circuit.

Evaluación del proceso de deposición de metal regulada (RMD) en aplicaciones de revestimientos

RESUMEN

En este trabajo se investigaron los beneficios generados por el control de cortocircuito (CCC) del proceso Corto circuito modificado (RMD) en comparación con el proceso de soldadura por Transferencia por rociado pulsante (GMAW-P) para la aplicación de revestimientos anticorrosivos en aceros de bajo contenido en carbono. El estudio se realizó comparando los procesos. Los valores de velocidad del alambre y los suministros se mantuvieron y las velocidades de soldadura se aplicaron en los rangos cercanos evitando comprometer la estabilidad del proceso. e evaluaron los aspectos visuales y geométricos de los depósitos mediante el análisis macrográfico, el cálculo de los niveles de dilución impuestos por los procesos, además de que se utilizaron como criterios de medición los aspectos económicos. El RMD mostró un mejor cordón de soldadura, produjo un área de colada más pequeña con dilución proporcional, mostró una tasa de deposición un 7% más alta, además de emplear menores cantidades de calor, simplicidad operativa y menor consumo de energía.

PALABRAS CLAVE: metalurgia; soldadura; Corto circuito modificado.

NOTAS

Os autores e seu orientador agradecem à empresa ITW Welding Brasil, a sua gerência e sua equipe, composta por Roque Zucas, Juliano Panão e Ciro Mendes, pela disponibilidade de equipamentos e materiais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN STANDARD TEST MATERIALS. **ASTM A36/ A36M: Standard Specification for Carbon Structural Steel**, West Conshohocken, PA, 2014.

COSTA, T.F. *et al.* Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único, **Soldagem e Inspeção**, v. 17, n.4, p.356-368, 2012.

EL RAYES, M; WALZ. C; SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry, **Welding Journal**, v. 83, n.5, p.147-153, 2004.

FILHO, H. D. **MIG/MAG CCC – Avanços na tecnologia de controle da transferência metálica como solução para o passe de raiz**. 2014. 107p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

Gohr. R Jr., Pereira, D H., Araújo, O. O., Lima, R. R. de A. Viabilidade de implantação do processo mig/mag em curtcircuito controlado para passes de raiz na soldagem de spools de aço carbono. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil

GOODWIN, G.M. The Effects of Heat Input and Weld Process on Hot Cracking in Stainless Steel, **Welding Journal**, v. 67, n.4, p.88-94, 1988.

HOBART. **Catálogo de Consumíveis**. Disponível em: <http://www.hobartbrothers.com/uploads/pdf/datasheets/316L_HiSil.pdf>. Acesso em 09 de Setembro de 2016.

HUNT, A. C; KLUKEN, A.O; EDWARDS, G.R. Heat Input and Dilution Effects in Microalloyed Steel Weld Metals, **Welding Journal**, v. 73, n.1, p.9-15, 1994.

JUNIOR GOHR, R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 168p. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KIM, Y. S; EAGAR, W. Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, **Welding Journal**, v. 72, n.7, p.279-287, 1993.

LERMEN, R.T. Influência da Velocidade de Soldagem sobre as Geometrias dos Cordões de Solda Realizados Através dos Processos de

Soldagem FCAW e Soldagem Híbrida (TIG/FCAW). In: **Semana Internacional das engenharias da Fahor**, 2011, Rio grande do Sul, n.p.

MACHADO, I.G. **Fontes de Potência para Soldagem ao Arco Elétrico**. In: **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. Cap. 3, p. 43-68.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte, UFMG Editora, 2009, 363 p.

MARQUES, P.V. Algumas Equações Úteis em Soldagem, **Soldagem e Inspeção**, v. 19, n.1, p.091-102, 2014.

MILLER. **Máquina com tecnologia One-Knob Control**. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/equipment/welders/mig-gmaw/millermatic-350p-aluminum-mig-welder-m00398>>. Acesso em 27 de outubro de 2020.

MILLER. **Processo de soldagem RMD aperfeiçoa fabricação de tubulação em aço inoxidável**. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/articles-library/new-regulated-metal-deposition-rmd-mig-welding-process-improves-stainless-steel-pipe-fabrication>>. Acesso em 08 de Setembro de 2016.

MILLER. **Recursos de arc length e arc control para o processo RMD**. Disponível em: <https://equiptoweld.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/PWS1-0.pdf>. Acesso em 10 de Outubro de 2016.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Capítulo 3. Disponível em: <<http://demeteng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em 24 de Outubro de 2016.

MONDAL, A. et al. Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens, **Cogent Engineering**, 3(1), 1143598. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1143598>.

POEPCKE, J.S. **Processo MIG/ MAG**. In: ALMENDRA, A. C. *et al.* Soldagem. São Paulo: SENAI-SP, 1997. Cap. 3, p. 175-192.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. UFSC, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Dissertação de Mestrado. 2005

SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo, Artliber Editora, 2008, 284 p.

SILVA, da M. M. Caracterização de Solda de Revestimento de AWS 317L Depositados por GMAW Duplo Arame em Aços ASTM A 516 Gr 60 para Uso na Indústria do Petróleo. **Soldagem e Inspeção**, v. 15, n.3, p.225-233, 2010.

SOUZA, D. *et al.* Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito, **Soldagem e Inspeção**, v. 16, n.1, p.022-032, 2011.

VAIDYA, V. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds, **Welding Journal**, v. 81, n.9, p.43-48, 2002.

WAINER, E; BRANDI, S.D.; de MELLO F.D.H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo, Edgard Blücher Editora, 2004, 494 p.

ZEEMANN, A. **Diluição**. São Paulo, abr. 2016. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metalurgia/232-diluicao.html>>. Acesso em: 15 de Abril de 2016.

ZHU, Z.M.; WU, W.K.; CHEN, Q. Effective control approach on molten droplet size in waveform controlled short circuit CO₂ arc welding, **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n.1, p.55-62, 2007.

Recebido: 02 de junho de 2021.

Aprovado: 11 de novembro de 2021.

DOI:

Como citar: DA SILVA, W M, MAIA, R R, OGATA, P H, CORREIA, F C, MORAIS, D, Avaliação do processo de soldagem por deposição de metal regulada em aplicações de revestimento, **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa, v. 9, n.1, p. 16-35, jan. 2022.

Contato: Rafael Rocha Maia: rafael.maia01@fatec.sp.gov.br

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

