

INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE A QUANTIDADE DE ESCÓRIA DE SOLDA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE AÇO CARBONO SOLDADAS PELO PROCESSO MAG

Diego Tolotti de Almeida¹

Alvaro Santos Piovesan¹

João Henrique Corrêa de Souza¹

Maiquel Rodrigo Klhan Kuntz¹

Resumo

A soldagem a arco elétrico com gás de proteção ativo e eletrodo consumível (MAG – Metal Active Gas) utiliza como principais gases o dióxido de carbono (CO_2), mistura de argônio (Ar) com dióxido de carbono, argônio com oxigênio (O_2) e misturas de argônio com dióxido de carbono e oxigênio. A reação química entre o gás de proteção e elementos desoxidantes, presentes na composição do metal de adição, resulta na formação da escória de solda, encarecendo processos de fabricação em que são utilizadas soldas multipasses ou onde peças sejam submetidas à pintura. Este estudo avalia a influência de três diferentes misturas de gás de proteção, sendo elas: F-36 (5% O_2 e 95%Ar) C10 (10% CO_2 e 90%Ar) e C25 (25% CO_2 e 75%Ar), na taxa e eficiência de deposição, bem como na geração da vitrificação de solda. Foi avaliada a resistência da junta soldada através de ensaios mecânicos de tração uniaxial, microdureza Vickers e dobramento de face e raiz. A quantidade de escória gerada foi medida através de técnicas de PADI. Os resultados mostram que o tipo de gás de proteção afeta diretamente o perfil de penetração do cordão de solda. A mistura com 5% O_2 e 95%Ar produziu cordões com menor quantidade de escória. Nenhuma das misturas produziu soldas com descontinuidades que comprometessem a integridade da junta soldada. A taxa de deposição e o rendimento depositado aumentam com a utilização da mistura do gás de proteção rica em argônio.

Palavras-chave: Processo de soldagem MAG; Escória de solda (vitrificação); Gás de proteção; Taxa de deposição; Eficiência de deposição.

INFLUENCE OF SHIELDING GAS ON AMOUNT WELDING SLAG AND MECHANICAL PROPERTIES ON MAG WELDING PROCESS OF CARBON STEELS

Abstract

As the main gases, carbon arc welding with active protection gas and consumable electrode (MAG) uses carbon dioxide (CO_2), a mixture of argon (Ar) with carbon dioxide, argon with oxygen (O_2) and Mixtures of argon with carbon dioxide and oxygen. The chemical reaction between the shielding gas and the deoxidizing elements present in the addition metal composition results in the formation of the solder slag, increasing manufacturing processes in which multipass welds are used or where parts are subjected to painting. This study evaluates the influence of three different protection gas mixtures: F-36 (5% O_2 and 95% Ar) C10 (10% CO_2 and 90% Ar) and C25 (25% CO_2 and 75% Ar), In rate and deposition efficiency, as well as in the generation of welding vitrification. The strength of the weld joint was evaluated through mechanical tests of uniaxial traction, Vickers microhardness and folding of face and root. The amount of slag generated was measured using PADI techniques. The results show that the type of shielding gas directly affects the penetration profile of the weld bead. The mixture with 5% O_2 and 95% Ar produced strands with less amount of slag. None of the mixtures produced welds with discontinuities that compromised the integrity of the welded joint. The deposition rate and deposited yield increase with the use of the argon-rich shield gas mixture.

Keywords: Welding process MAG; Slag weld; Shielding gas; Deposition rate; Deposition efficiency.

¹Bruning Tecnometal, Panambi, RS, Brasil. E-mail: diegot@bruning.com.br



1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MAG, consiste na transferência metálica de um eletrodo consumível pela formação de um arco elétrico com o metal base [1]. O processo é protegido por atmosfera gasosa que afeta o modo de transferência, e as propriedades mecânicas da solda [2].

Marques et al. [3], mencionam que a correta vazão do gás de proteção, estabiliza o arco, a transferência do metal, a geometria do cordão de solda e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas bem como as características metalúrgicas da solda.

Os principais tipos de gases de proteção usados no processo MAG são o Argônio (Ar), o Dióxido de Carbono (CO₂) e o Oxigênio (O₂). Na soldagem MAG de aços de baixo carbono recomenda-se como gás de proteção uma mistura de argônio com pequenas porcentagens de oxigênio ou dióxido de carbono, formando assim, uma atmosfera ativa [4]. Visto que, a atmosfera ativa produz reações de oxidação, é necessária a utilização de elementos desoxidantes no arame/eletrodo, como por exemplo: silício, vanádio, titânio e alumínio [5,6]. Dessa forma, as reações que ocorrem na poça de fusão resultam na formação de escória que irá se solidificar sobre o cordão de solda.

A vitrificação formada na superfície do cordão se torna indesejável quando se dá em grandes quantidades, principalmente ao se utilizar processos de soldagem multipasses ou ainda quando a região soldada for submetida a um posterior processo de pintura. Uma maior quantidade de escória no cordão, para esses casos, implica na utilização de processos de limpeza, aumentando os custos de fabricação.

O argônio é um gás inerte com baixo potencial de ionização, baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica. A maior densidade relativa do argônio permite uma maior eficiência em substituir o ar em torno da solda. Por ser quimicamente inerte, o argônio não oxida elementos de liga no cordão de solda, deixando o cordão livre de inclusões [7].

O oxigênio misturado ao argônio suaviza o perfil do cordão, reduz a tensão superficial no contato poça/metal, afetando principalmente a molhabilidade da poça de fusão e resultando em melhor qualidade do cordão de solda [8]. Outra influência da adição de pequenas quantidades de oxigênio ao argônio (aproximadamente 5% de O₂) é a redução da corrente de transição globular/*spray*. Por outro lado, quando se aumenta o nível de oxigênio na mistura,

aumenta também a perda de elementos de liga, podendo ser alteradas as propriedades mecânicas da junta soldada [4].

Um dos gases de proteção mais utilizados no processo de soldagem MAG em aços de baixo/médio teor de carbono é o dióxido de carbono (CO₂), por causa da sua relação custo-benefício. O CO₂ se dissocia no arco, formando monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O₂), gerando assim uma atmosfera oxidante, passando de gás inerte na temperatura ambiente, a gás ativo, em altas temperaturas [4]. Sua alta condutividade térmica permite eficiência na transferência de calor para o metal de base, produzindo um perfil mais largo e arredondado em comparação com o argônio.

Os gases apresentados podem afetar outras características do arco, como o tipo de transferência, a velocidade de soldagem, os respingos, a penetração e a geometria do cordão de solda.

Tal estudo objetiva encontrar a melhor condição de soldagem por transferência por curto-circuito, para três misturas gasosas (argônio com oxigênio e outras duas misturas de argônio e dióxido de carbono).

Foi objetivo também deste trabalho analisar a qualidade do cordão de solda, tanto em propriedades mecânicas, como taxa de deposição do arame, rendimento depositado e porcentagem de escória de solda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada a soldagem de chapas com 2,50mm de espessura do aço DIN EN10025-2 S275, na condição decapada e oleada, cuja composição é dada na Tabela 1.

O eletrodo utilizado foi de aço com silício e manganês (ER 70S-6), sendo sua composição química apresentada na Tabela 2.

A soldagem foi realizada com polaridade CC+ por um sistema robotizado acoplado a um sistema de aquisição de dados de corrente, tensão e tempo de arco aberto. Foram realizados ensaios mecânicos e metalográficos para cada condição de soldagem testada, a fim de ser analisado o comportamento mecânico das juntas soldadas. Também foi quantificada a vitrificação da escória, através do processamento digital de imagens (PADI). Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros utilizados neste estudo.

Para cada vazão do gás foram realizadas três soldas, sem pré ou pós aquecimento, segundo os parâmetros

Tabela 1. Composição química do aço EN10025-2 S275

| C (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Cu (%) | N (%) |
|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| 0,24 máx. | 1,60 máx. | 0,045 máx. | 0,045 máx. | 0,60 máx. | 0,014 máx. |

Tabela 2. Composição química do arame maciço ER70S-6

| Fonte | C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Ni (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) | Cu (%) | Al (%) |
|--------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Certificado | 0,082 | 0,828 | 1,543 | 0,018 | 0,018 | 0,014 | 0,033 | 0 | 0 | 0,022 | 0,0005 |
| Especif. AWS | 0,06-0,15 | 0,80-1,15 | 0,04-0,85 | ≤0,025 | ≤0,035 | ≤0,15 | ≤0,15 | ≤0,15 | ≤0,03 | ≤0,5 | - |

Tabela 3. Parâmetros do processo de soldagem

| Amostra [#] | Gás Proteção [Tipo] | Vazão Gás [L/min.] | Velocidade Arame [m/min.] | Velocidade Soldagem [mm/min.] | Stick-Out (DBCP) [mm] | Ângulo avanço [°] | Ângulo trabalho [°] |
|----------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | F-36 (95%Ar + 5%O ₂) | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | C-10 (90%Ar + 10%CO ₂) | 12 | 12 | 740 | 19,5 | 23 | 90 |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | C-25 (75%Ar + 25%CO ₂) | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |

definidos na Tabela 3. A caracterização e avaliação mecânica de cada junta soldada foi realizada a partir de amostras cortadas, descartando os 30 mm iniciais e finais, conforme norma DIN EN ISO 15614-1:2012. De cada amostra, foram retirados três corpos de prova para ensaio de tração, dois para dobramento de face, dois para dobramento de raiz e três para análise macroestrutural (sendo início, meio e fim). Também foi realizado ensaio de microdureza em um corpo de prova retirado na região central. A Figura 1 apresenta o plano de corte das amostras.

A caracterização de defeitos na junta foi realizada por metalografia em três medidas de cada resultado obtido pela micrografia em programa computacional. Essa caracterização foi feita após a preparação das amostras com lixas de granulometria crescente de 80 a 600 *mesh* e então atacadas com Nital 10%, para a observação da seção transversal do cordão em lupa digital.

As juntas soldadas foram limpas com álcool isopropílico, para a retirada do óleo, após terem sido removidas as impurezas resultantes da operação de corte.

As amostras foram pesadas e os dados foram arquivados para posterior análise de rendimento e taxa de deposição do arame.

A metodologia utilizada na análise da escória se consistiu das seguintes etapas:

- Formação e aquisição da imagem;
- Digitalização da imagem;
- Pré-processamento;
- Segmentação;
- Pós processamento;
- Extração de atributos;
- Classificação e reconhecimento da escória de solda.

Para cada corpo de prova foram capturadas 15 imagens, ao longo do cordão com 300mm de comprimento, cada uma contendo 20mm de comprimento. Das imagens, foram selecionados apenas os elementos pertencentes ao cordão de solda, sendo possível realizar a segregação

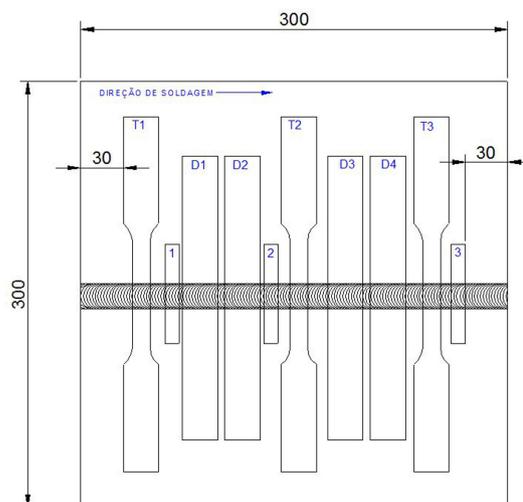


Figura 1. Representação esquemática do posicionamento dos corpos de prova na chapa base.

dos elementos correspondentes à vitrificação por meio da aplicação de filtros contidos no *software*, juntamente com o emprego de técnicas de PADI. A região que representa a escória de solda apresenta *pixels* com uma cor distinta dos demais elementos presentes na imagem, permitindo assim a sua quantificação. A Figura 2 mostra a sequência da quantificação da escória de solda.

Após o processo apresentado na Figura 2, é realizado o somatório das quinze regiões processadas e calculada a porcentagem de escória de solda para cada corpo de prova conforme Equação 1.

$$PE = \left(\frac{Ae_1 + \dots + Ae_{15}}{At} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: PE = porcentagem de escória de solda (%)
Ae = área de escória de solda (somatório das 15 imagens processadas)

At = área total do cordão de solda (referente aos 300mm do cordão de solda dos corpos de prova)

A avaliação do rendimento de arame depositado é importante, pois permite avaliar a quantidade de arame

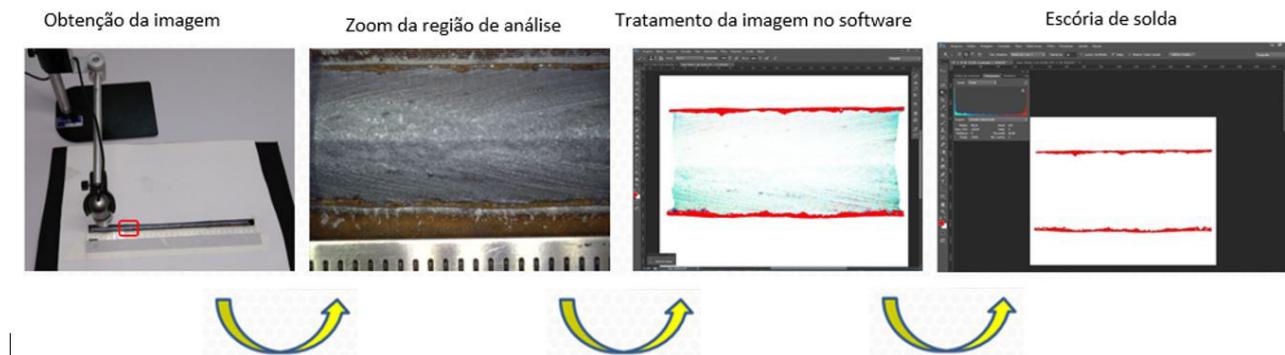


Figura 2. Etapas do processo de quantificação da escória de solda.

perdida na forma de respingos e salpicos. Esta avaliação é feita através da Equação 2:

$$\eta r = \left(\frac{M_f - M_i}{m.e.c} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Onde: ηr = rendimento de deposição [%]

M_f = massa final do corpo de prova [g]

M_i = massa inicial do corpo de prova [g]

$m.e.c$ = massa linear do arame em [g/m]

c = consumo linear em [m]

Antes e após a realização de cada solda, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se o valor da massa inicial e final para os mesmos. Os dados do consumo linear médio foram obtidos através do sistema de aquisição de dados, que permitia obter o valor real de arame consumido em cada ensaio.

A taxa de deposição de arame é calculada através da Equação 3:

$$TD = \left(\frac{M_f - M_i}{t} \right) \quad (3)$$

Onde: TD = taxa de deposição do arame [kg/h]

M_f = massa final do corpo de prova [g]

M_i = massa inicial do corpo de prova [g]

t = tempo de arco aberto [h]

Com os valores de massa inicial e final já coletados, os resultados de tempo de arco aberto foram obtidos através do sistema de aquisição de dados, fornecendo o tempo exato de soldagem de cada corpo de prova.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O cálculo da área de escória foi realizado conforme a Equação 1, em que leva em consideração a metodologia previamente descrita para obtenção da escória de solda por meio do processamento e análise digital das imagens, dividida pela área total de solda de cada corpo de prova. A Figura 3 apresenta a porcentagem de escória para os diferentes gases.

Observa-se que os menores valores de vitrificação no cordão são obtidos com a mistura de gás 95% argônio + 5% O₂,

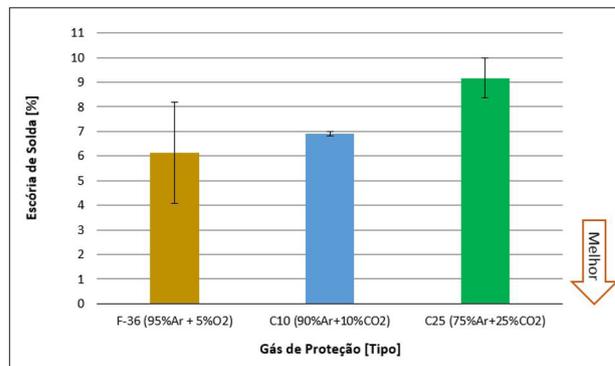


Figura 3. Escória de solda (vitrificação) para as diferentes vazões de gás de proteção.

representando em média 6% do cordão de solda. A mistura de gás C25 (75%Ar + 25%CO₂) produziu uma vitrificação, ao longo do cordão soldado, equivalente a 9% da área solda, ou seja, um acréscimo de 53,3% de escória em relação aos resultados obtidos com o gás de proteção F-36 (95% Ar + 5% O₂). Com a utilização do gás C10 (90%Ar + 10%CO₂) a porcentagem da escória de solda representa 7% da área total do cordão de solda.

A maior incidência de vitrificação nas misturas ricas em CO₂ pode estar relacionada ao fato de estas misturas possuírem uma maior capacidade de realizar troca de calor, devido à recombinação. Isso implica em uma maior quantidade de energia transferida para o metal base. Outra característica de misturas contendo elevados teores de dióxido de carbono é a existência de um número maior de curtos circuitos, gerando uma maior quantidade de salpicos, escória e podendo reduzir a quantidade de calor efetivo que é transferido para a peça [2].

Pela Figura 3 é possível perceber que uma maior quantidade de escória de solda foi gerada com a utilização da mistura de gás C25 (75%Ar + 25%CO₂).

A Figura 4 apresenta os valores médios do rendimento depositado para cada condição de vazão testada.

É possível de se notar, na Figura 4, uma pequena vantagem (~2 pontos %) do rendimento do gás de proteção F-36, semelhantes aos obtidos por Kobayashy [9]. Resultado similar foi observado no trabalho de Nascimento et al. [10],

onde para os gases com adição de CO_2 na mistura foram observados os menores valores de taxa de deposição, comprometendo as taxas de fusão devido às menores correntes de soldagem utilizadas, suprimindo o efeito de maiores temperaturas em atmosfera com CO_2 devido as reações exotérmicas, fazendo com que a taxa de deposição acompanhasse este comportamento.

A Figura 5 apresenta os resultados da taxa de deposição do arame.

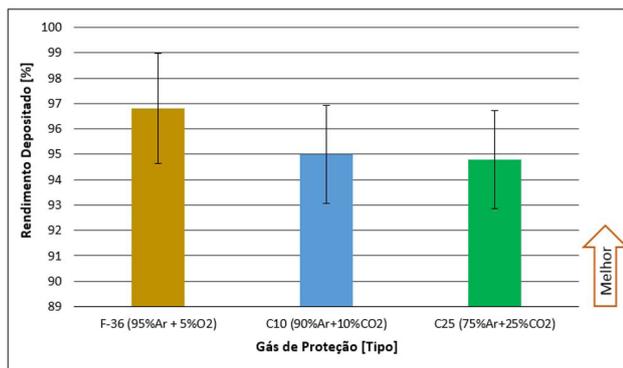


Figura 4. Rendimento depositado para as diferentes vazões de gás de proteção.

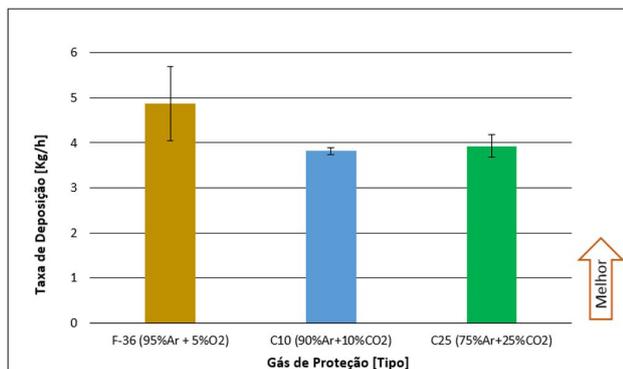


Figura 5. Taxa de deposição para as diferentes vazões de gás de proteção.

Na Figura 5 é verificado que a maior taxa de deposição foi alcançada com a mistura de gás 95%Ar + 5%O₂, comparado aos demais gases (~ 5kg/h). Este feito está relacionado aos melhores resultados de estabilidade de arco e de transferência metálica, resultando em menores perdas e maior deposição [10].

Nos resultados da análise macrográfica, apresentados na Figura 6, é possível observar que o gás mais concentrado em CO_2 (C25), produz perfil de cordão mais largo e arredondado, o que pode estar relacionado à maior transferência de calor para o metal base. Podemos também observar porosidade na região central das juntas soldadas com os gases F-36 e C-10. Elevadas correntes de soldagem contribuem para o surgimento da porosidade, pelo fato de que, com elevadas temperaturas na poça de fusão, a solubilidade do oxigênio e dos gases presentes na poça aumenta, porém, por possuírem uma solubilidade menor no metal sólido, os elementos constituintes dos gases podem ficar aprisionados no interior do cordão na medida em que acontece seu resfriamento e solidificação. Com tudo, todas as condições estão aprovadas, conforme norma ISO 5817:2003, classe C, que permite uma área máxima de 1,5% de porosidade.

O perfil de microdureza ao longo da seção transversal da junta soldada, para cada gás de proteção, medido conforme norma DIN EN 9015-1:201 é mostrado na Figura 7.

Como era esperado em todos os casos, os valores de dureza na região da zona fundida foram maiores, comparados com o metal de base e a zona termicamente afetada (ZTA), visto que o metal de adição possui valores de resistência maiores que o metal de base. Este fato pode estar relacionado às precipitações de fases frágeis, em função da menor velocidade de resfriamento na região da zona fundida, podendo contribuir para valores de microdureza mais elevados nesta região.

Apesar de existirem ensaios mecânicos utilizados a fim de avaliar a qualidade das juntas soldadas, a norma AWS D1.1/D1.1M [11] menciona que, para evitar trincas a frio, os valores de microdureza na ZTA devem estar abaixo

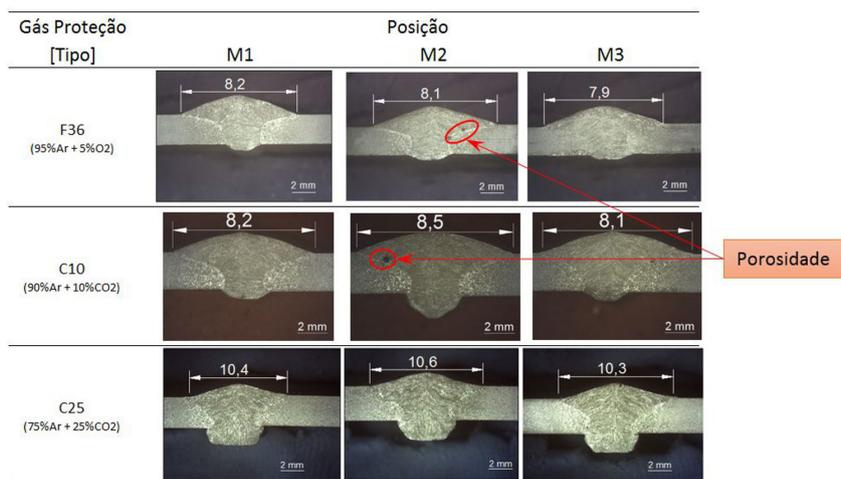


Figura 6. Macrografia da solda para as diferentes vazões de gás de proteção.

de 350HV. Portanto, os resultados do presente estudo estão aprovados, considerando que os valores atendem ao especificado por norma.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, retirados em corte transversal em relação à direção de soldagem, apresentaram valores muito próximos para as propriedades mecânicas avaliadas, como pode ser visto na Tabela 4.

Em todos os testes o rompimento dos corpos de prova ocorreu no metal de base, como pode ser visualizado na Figura 8.

A ruptura no metal base evidencia que as propriedades mecânicas do cordão são superiores às do metal base, indicando a boa qualidade das juntas soldadas.

Para avaliar a ductilidade do cordão de solda, foram realizados ensaios de dobramento de face e raiz, ver Figura 9.

As amostras foram deformadas até um ângulo de 180° tanto no dobramento de face como de raiz, com os três gases de proteção. Em todas as condições de soldagem, as falhas foram inferiores a 3,00mm e, portanto, aprovadas quanto à ductilidade, conforme norma DIN EN ISO 15615-1:2012.

Tabela 4. Ensaio de Tração – Média, desvios padrões das juntas soldadas

| Gás de proteção [Tipo] | Média limite resistência [MPa] | Média limite de escoamento [MPa] | Alongamento [%] | Local de Ruptura |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|
| F36 (95%Ar+5%O ₂) | 462,9 ± 5,9 | 350,6 ± 14,4 | 13,8 ± 5,2 | Metal Base |
| C10 (90%Ar+10%CO ₂) | 465,9 ± 3,5 | 373,7 ± 3,9 | 15,5 ± 1,6 | Metal Base |
| C25 (75%Ar+25%CO ₂) | 499,7 ± 0,1 | 404,2 ± 0,6 | 16,1 ± 2,0 | Metal Base |

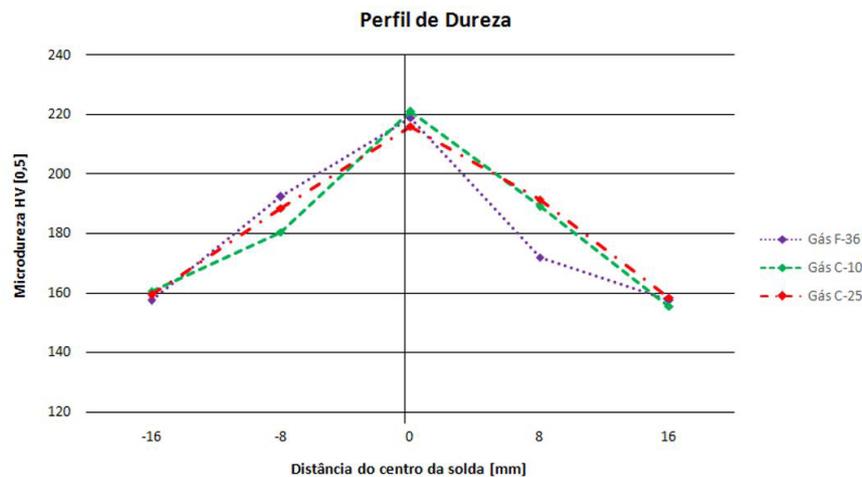


Figura 7. Perfil de microdureza Vickers.

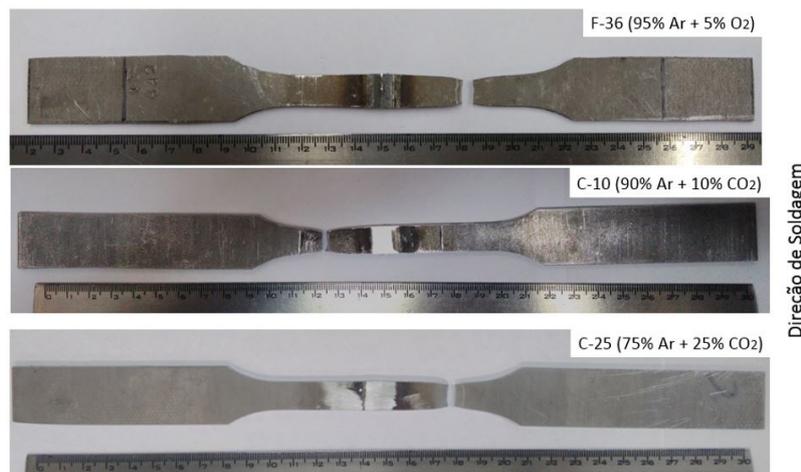


Figura 8. Imagens Ensaio de Tração.

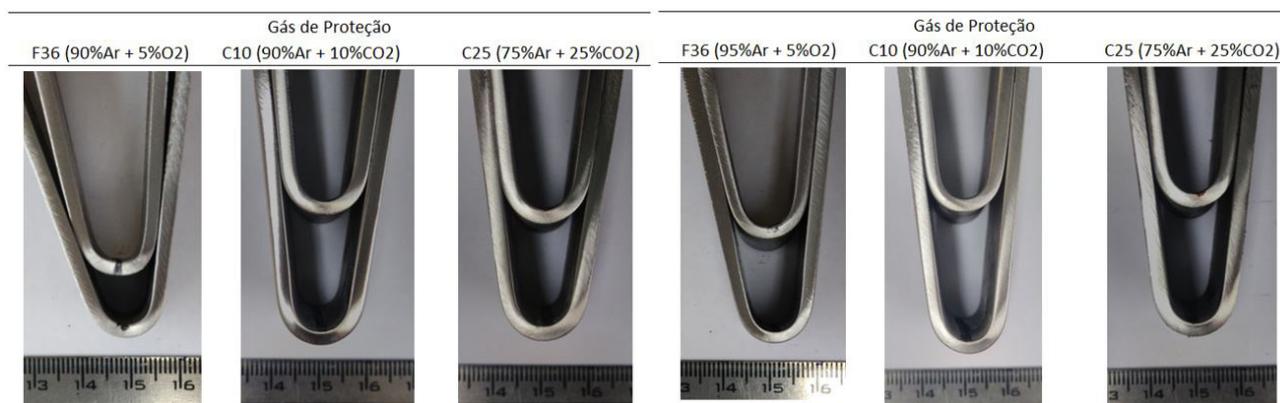


Figura 9. Ensaio de Dobramento de Face (esquerda), Dobramento de Raiz (direita).

4. CONCLUSÕES

Pelo exposto no presente trabalho, tendo como base os materiais, parâmetros de soldagem e métodos utilizados foi possível concluir que:

- O tipo do gás de proteção afeta diretamente o perfil de penetração do cordão de solda. Dentre os gases investigados, as maiores penetrações foram obtidas com a mistura de gás de proteção com 75%Ar + 25%CO₂ (C25). Contudo, essa mistura gera maior quantidade de escória de solda. Isso eleva os custos de produção onde se faz necessário a utilização de processos de limpeza da junta soldada, como no caso da soldagem multipasses.
- Os resultados demonstram que a melhor condição para redução da vitrificação é obtida com o uso da mistura com 95%Ar + 5%O₂ (F-36). E, esta mistura também demonstra os melhores resultados no rendimento depositado e taxa de deposição, que são variáveis importantes na avaliação de produtividade no processo de soldagem.

- Não foram observadas variações significativas nas discontinuidades (porosidade, inclusões de escória e mordedura). A única mistura de gás que não produziu porosidade interna foi o gás com maior teor de CO₂ (C25). As misturas de gases de proteção com 95%Ar + 5%O₂ e 75%Ar + 25%CO₂ produziram porosidade, porém não comprometeram as propriedades mecânicas, como visto no ensaio de tração.
- O gás de proteção com 95%Ar + 5%O₂ mostrou-se mais adequado para redução da vitrificação, porém, apresenta os menores valores para as propriedades mecânicas avaliadas.

Agradecimento

Os autores agradecem à empresa Bruning Tecnometal, pelo apoio e colaboração no que diz respeito a este projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Machado IG. Soldagem & técnicas conexas: processos. Porto Alegre: UFRGS; 1996.
- 2 Bohrer CB. Influência do gás de proteção sobre o aporte de energia na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono [monografia]. Porto Alegre: UFRGS; 2013.
- 3 Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2009.
- 4 Lyttle KA, Stapon FG. Select the best shielding gas blend for the application. *Welding Journal*. 1990;69(11):21-28.
- 5 Lancaster JF. *Metallurgy of welding*. 4. ed. London: George Allen & Unwin; 1987.
- 6 Kou, S. *Welding metallurgy*. New lork: John Wiley & Sons; 1987.
- 7 Dillenbeck VR, Castagno L. The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel. *Welding Journal*. 1987;66:45-49.
- 8 Jönsson PG, Murphy AB, Szekely J. The influence of oxygen additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc welding processes. *Welding Research Supplement - Welding Journal*. 1995;2:48-s-58-s.

- 9 Kobayashi Y, Anastacio ACSA. Estudo da influência da corrente de curto circuito, através da indutância, sobre as características geométricas e rendimento real de deposição. Bauru: Unesp, Cobef; 2002.
- 10 Nascimento AS, Menezes LC Jr, Vilarinho LO. Efeito do formato de onda e gás de proteção sobre a taxa de fusão e geometria do cordão na soldagem MIG/MAG-PV. Soldagem e Inspeção. 2012;17(1):41-47.
- 11 American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M: structural welding code – steel. Miami: AWS; 2010.

Recebido em: 20 Abr. 2017

Aceito em: 10 Ago. 2017