



Associação Brasileira de Soldagem

**XLVI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
II CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
Uberlândia/MG de 26 a 28 de agosto de 2024**

Influência da Composição do Gás de Proteção na Formação de Sílica em Operações de Reparo Mecanizado Usando GMAW e Arame de Aço ER70S6

(Influence of shielding gas composition on silica formation in mechanized repair operations using GMAW and ER70S6 steel wire)

Giulia Ciacci Zanella¹, Daniel Galeazzi¹, Regis Henrique Goncalves e Silva¹, Mateus Barancelli Schwedersky¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, giulia.ciacci.zanella@posgrad.ufsc.br

Resumo

A soldagem de reparo é uma operação comumente realizada em superfícies que sofreram desgaste e perda de massa, comprometendo as propriedades mecânicas. Este artigo tem como objetivo explorar a influência da composição química do gás de proteção na formação de sílica nos cordões de solda. Para atingir esse objetivo, foram avaliadas três misturas gasosas: 8% de CO₂, 25% de CO₂ e 2% de O₂, todas balanceadas com argônio. Os experimentos concentraram-se na deposição de blocos com duas camadas de altura, utilizando o processo GMAW convencional e arame de aço ER70S6. Para a análise, foram comparadas as variáveis de soldagem e a formação de sílica por meio das filmagens de processo, inspeção visual, análise química, raio-X e macrografia. Os resultados indicam que o aumento da concentração de CO₂ tende a aumentar a presença de sílica nos flancos dos cordões. Por outro lado, a presença de O₂ tende a aglomerar as sílicas em ilhas. Sob as condições estudadas, a sílica pode gerar defeitos de irregularidade superficial, contudo, não foram verificados defeitos de inclusão de sílicas. Portanto, pode-se concluir que, dentre as misturas analisadas, a mistura com 8% de CO₂ teve desempenho superior, reduzindo a formação de sílica e os defeitos associados.

Palavras-chave: Soldagem de revestimento; Sílica; GMAW; Manufatura aditiva.

Abstract: Repair welding is a commonly performed operation on surfaces that have experienced wear and mass loss, compromising mechanical properties. This article aims to explore the influence the chemical composition of the shielding gas has on the formation of silica in weld beads. To achieve this goal, three gas mixtures were evaluated: 8% CO₂, 25% CO₂, and 2% O₂, all balanced with argon. The experiments focused on depositing blocks with two layers, using conventional GMAW process and ER70S6 steel wire. To assess the experiments, welding variables and silica formation were compared through process filming, visual inspection, chemical analysis, X-ray and macrography. The results indicate that an increase in CO₂ concentration tends to increase silica presence on the sides of the weld beads. Conversely, the presence of O₂ tends to cluster the silicon dioxide into islands. Under the studied conditions, silica may cause surface irregularity defects; however, no silica inclusion defects were observed. Therefore, it can be concluded that among the analyzed mixtures, the mixture with 8% CO₂ offers superior performance, reducing the formation of silica and associated defects.

Key-words: Cladding welding; Silica; GMAW; Additive manufacturing.

1. Introdução

As aplicações de revestimentos metálicos usando metais especiais como aços inoxidáveis e ligas de níquel têm sido estudadas em diversos trabalhos, e existe uma grande quantidade de artigos publicados cobrindo variados aspectos dessas aplicações, especialmente considerando que esses metais de adição apresentam maior dificuldade de desenvolvimento de procedimentos de soldagem. A soldagem com o metal de adição ER70S6, que é o arame de aço de maior utilização na indústria, é considerada como uma tarefa mais simples, e muitas vezes ganha menor atenção nos trabalhos científicos, pois trata-se de um arame que apresenta natural boa soldabilidade.

Os gases utilizados na soldagem exercem múltiplas funções, sendo a mais reconhecida para proteger o metal

fundido contra os elementos do ar atmosférico. O argônio é considerado como um gás de proteção apropriado devido à sua natureza inerte, porém a utilização de um gás com teor oxidante é indispensável na soldagem de metais, com exceção do alumínio, portanto é comum a utilização de misturas gasosas com diferentes concentrações de CO₂ ou O₂ balanceadas em argônio. Segundo Kah, et al. [1], por se tratar de um gás molecular apresenta uma energia de dissociação e ionização relativamente alta, o que implica em tensões de arco maiores em função de sua concentração, uma vez que para ocorrer a ionização antes é necessário ocorrer a dissociação de parte das moléculas. A dissociação do CO₂ gera um aumento do volume e da pressão do arco, favorecendo assim a penetração. Por outro lado, quando utilizado sozinho confere certa instabilidade ao processo, por isso a utilização em conjunto, por exemplo, com argônio é interessante. De acordo com Hertel et al. [2] corroborando com Kah et al. [1], valores excessivamente maiores que 10% de CO₂ tendem a gerar instabilidade no processo devido ao perfil de ancoramento anódico influenciado pelo aumento da vaporização metálica, dentre outros fatores, como por exemplo, o favorecimento da formação de ilhas de sílica na superfície e nos flancos de cordões soldados com aço carbono, o que é indesejável na fabricação de peças por manufatura aditiva. Kou [3] afirma que o dióxido de carbono utilizado com o gás de proteção pode ser decomposto em CO e O sob a alta temperatura do arco, aumentando potencialmente o nível de oxigênio da solda e também a oxidação do carbono e outros elementos de liga no metal líquido.

Teske e Martins [4] conduziram um estudo sobre a influência da composição do gás de proteção na soldagem de aço carbono ASTM A516 e encontraram que o potencial de oxidação é diretamente proporcional à formação de inclusões de óxidos e ao empobrecimento dos elementos Si e Mn no metal de adição. A redução de O₂ e CO₂ no gás de proteção leva a um aumento na resistência ao impacto, devido à redução dos óxidos e uma estrutura de grão fino [5, 6]. Os limites para a melhor porcentagem de gás ativo ou potencial de oxidação são incertos. Liskevych e Scotti [7] defendem a ideia de que o teor de CO₂ deve estar entre 10 e 30% para garantir os melhores parâmetros geométricos, e que o aumento de gás ativo provoca instabilidade na transferência metálica, levando à geração excessiva de respingos e à aparência irregular do cordão. Num quesito de saúde operacional e aspectos ambientais, quanto mais rica em CO₂ for a composição do gás de proteção, mais CO e CO₂ serão gerados pelo arco e liberado para o ambiente, no entanto essa geração não sofre influência da corrente ou estabilidade do processo [8], ao contrário dos fumos [9,10].

Quando se busca desenvolver procedimentos de soldagem para revestimento, aplicados de forma mecanizada, é possível verificar problemas de formação de ilhas de sílica depositadas sobre e nas laterais do cordão, e ainda, defeitos geométricos que se caracterizam como regiões onde a adesão dos diferentes cordões não ficou ideal, gerando uma região de vale com menos material. Uma das hipóteses é que os depósitos de sílica possam estar relacionados com a formação desse tipo de defeito geométrico. Considerando o desejo de produzir depósitos com menor ocorrência de defeitos geométricos, o presente trabalho buscou avaliar o papel da composição do gás de proteção na quantidade de sílica formada e também avaliando essa influência sobre a falta de preenchimento entre os passes.

2. Matérias e Métodos

Para realização dos experimentos foi utilizada uma bancada composta por um robô antropomórfico Yaskawa Motoman XRC UP6 de 6 graus de liberdade integrado à uma fonte de soldagem IMC Digiplus A7. Nos testes realizados foi utilizado o processo GMAW convencional com transferência metálica por curto-circuito, arame de aço AWS ER70S6 de 0,8 mm de diâmetro. A deposição foi realizada sobre chapa de aço carbono ASTM A36 na posição plana. A bancada foi instrumentada com um sistema de aquisição de variáveis de soldagem portátil (SAP) e câmera de processo Xiris XVC-1000. A Figura 1 apresenta uma foto da bancada utilizada.

Os experimentos concentraram-se na fabricação de um Pads (Blocos) variando a composição química da mistura gasosa entre gases com 8% de CO₂, 25% de CO₂ e 2% de O₂. Os Pads foram produzidos com duas camadas de altura, alternando o sentido de soldagem entre elas. Foram compostos por nove cordões filetados, sobrepostos horizontalmente, com uma distância entre centros de cordões de 4,3 mm, velocidade de soldagem de 30 cm/min e uma distância entre o bico de contato e a peça de 15 mm.

Para análise e comparação dos dados, concentrou-se nos aspectos físicos por meio da inspeção visual da formação e concentração da sílica. Além disso, foram realizadas análises dos sinais elétricos em função da mistura gasosa, avaliando seu impacto sobre a corrente e tensão média, potência, frequência de destacamento, pico de corrente e pico de potência. Adicionalmente, a partir da filmagem do processo, foram realizadas análises e observações acerca dos mecanismos de formação e seu impacto sobre a estabilidade do processo em função do gás de proteção. Também foram realizados testes de raio-x e macrografia para verificação de inclusões internas de sílica ou falhas de fusão decorrentes. Por fim, foi realizada uma análise química da superfície dos cordões por meio de espectrometria óptica para verificar a concentração principalmente de silício, verificando assim se existe uma relação entre o maior empobrecimento de silício do metal de base e a maior formação desse óxido.



Figura 1. Bancada de experimentos utilizada para a realização dos ensaios: A- Fonte de soldagem IMC Digiplus A7; B- robô antropomórfico Yaskawa Motoman XRC UP6; C- Sistema de aquisição de variáveis de soldagem portátil (SAP).

3. Resultados e Discussão

A inspeção visual dos pads demonstrou que utilizando o gás com 25% de CO_2 se tem maior formação de sílica, a qual tende a se acumular na interface entre os cordões, na região dos flancos do início até o final do cordão. A mistura com 8% de CO_2 , apresentou um mecanismo de formação e ancoramento da sílica similar, no entanto em menor volume. O pad fabricado com 2% de O_2 apresentou uma quantidade de sílica semelhante ao pad com 8% de CO_2 , porém na forma de ilhas distribuídas na interface de sobreposição dos cordões. Além disso, apresentou regiões com falta de fusão, resultado da deflexão da poça metálica, fenômeno este que será abordado em profundidade com as filmagens do processo, a seguir. A Figura 2 apresenta uma vista superior dos pads, onde é possível observar os óxidos e defeitos supracitados.

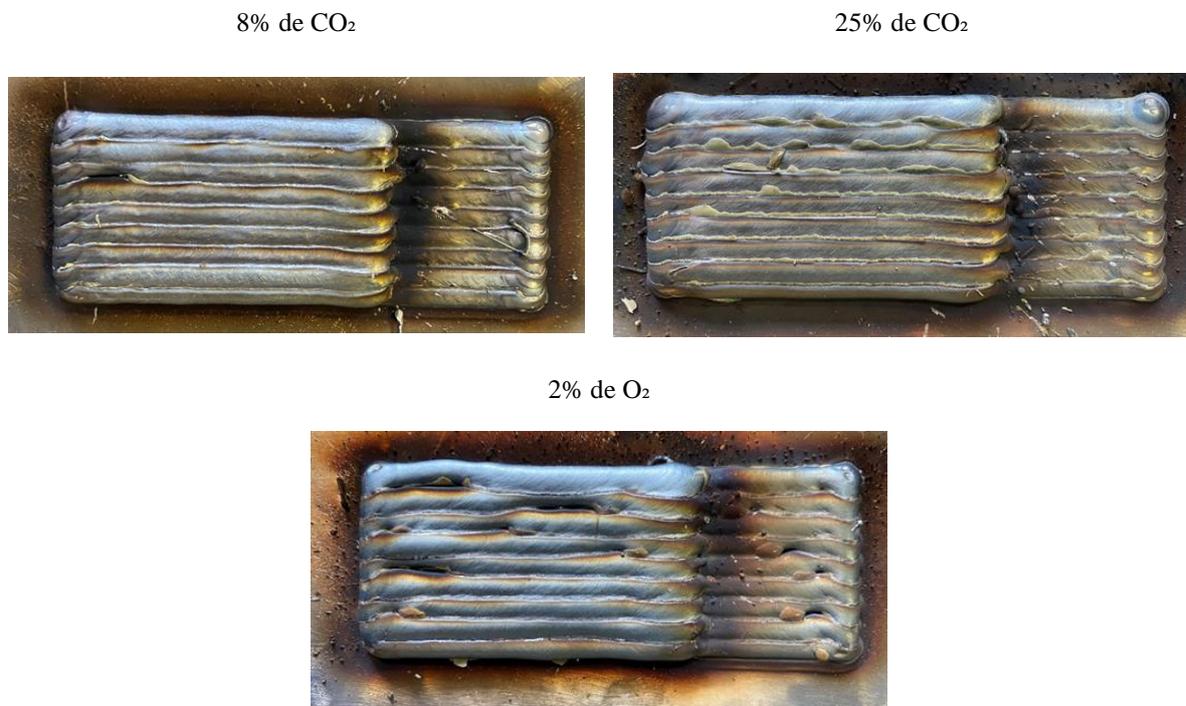


Figura 2. Vista superior dos pads como fabricados ilustrando a presença da sílica e dos defeitos decorrentes

Observando os sinais elétricos médios é possível notar que a mistura gasosa com 25% de CO_2 apresentou valores de tensão média e potência significativamente maiores que os demais. Além disso, essa mistura gerou picos de corrente e potência de pico ou reabertura da mesma forma significativamente maiores que os demais, o que incorreu também na formação de respingos. Entre a mistura com 8% de CO_2 e 2% de O_2 não embora haja uma pequena diferença não é possível afirmar que é significativa. Acredita-se que os valores mais altos para a mistura

com 25% de CO₂ são em decorrência do potencial de ionização dessa mistura, a qual demanda maior quantidade de energia para realização inicialmente da dissociação e em seguida da ionização e, além disso, dos efeitos físicos causados no arco em função da concentração de CO₂. A tabela 1, apresenta os valores médios lidos para cada cenário analisado.

Tabela 1. Valores das correntes de soldagem.

Mistura Gasosa	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Potência (kW)	Frequência (Hz)	Pico de Corrente (A)	Potência de Pico (kW)
8% CO ₂	114	17,2	1,9	73	190,8	4,4
25% CO ₂	118	19,0	2,2	73	207,7	5,1
2% O ₂	116	16,7	1,9	82	193,7	4,1

O mecanismo de formação da sílica diferente entre os gases com O₂ e C25 é evidenciado durante as filmagens com a câmera de processo. Nas imagens retiradas da filmagem foi possível capturar o momento em que uma concentração grande de sílica em forma de ilha, identificada na imagem “a” da figura 3, que estava aderida na lateral do cordão anterior, provocou um defeito, impedindo a fusão entre os passes. Nas imagens “b” e “c” é possível visualizar a concentração de sílica sendo fundida e se movimentando junto com o metal líquido, formando uma barreira e impedindo o mesmo de encostar no outro cordão. Ao longo das imagens “d”, “e”, “f”, “g” e “h” é possível ver a sílica fundida se deslocando para cima da poça enquanto o metal se solidifica. Na imagem “i” o metal em solidificação fica destacado e é possível identificar o defeito provocado e a falta de material na região entre os cordões.

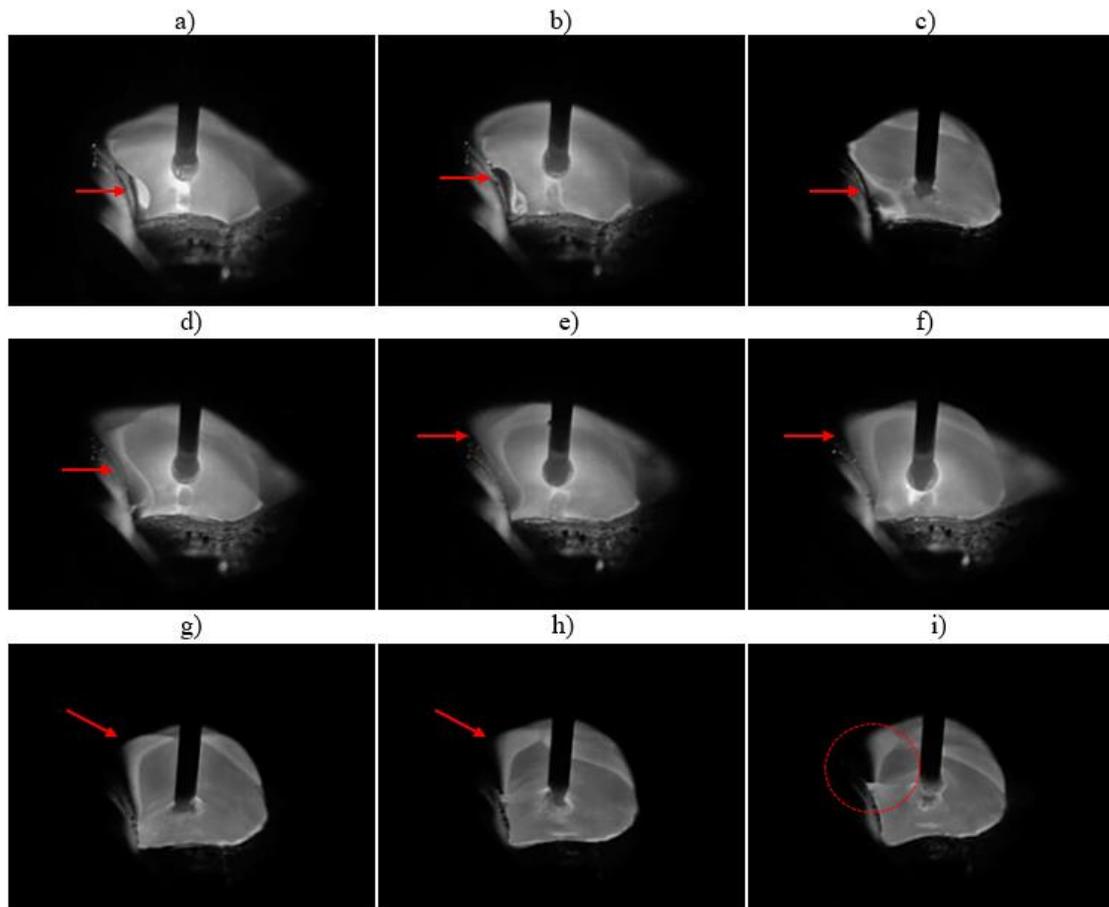


Figura 3. Frames da filmagem com gás O₂ evidenciando a ação da sílica no arco e poça de metal líquido. As setas apontam a presença de sílica na imagem

Nas filmagens com C25, a quantidade superior, porém mais distribuída de sílica, evidenciada na imagem “a” da figura 4, é conduzida pelo metal líquido de modo diferente do caso anterior. A sílica fundida nessa condição é direcionada para as laterais da poça e não para cima, como identificado nas imagens “b” e “c” da figura 4.

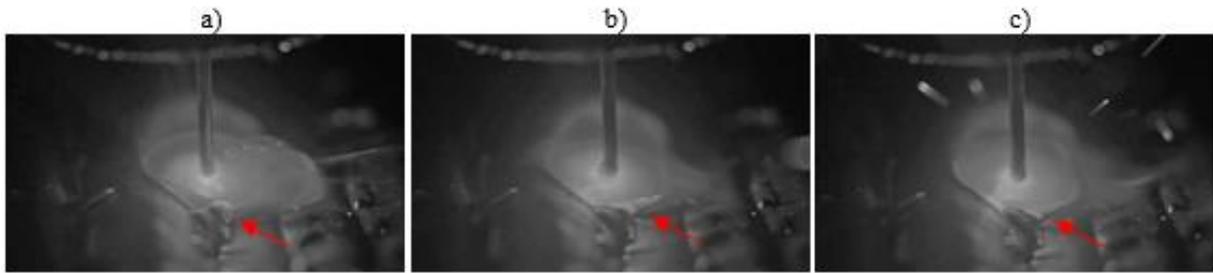


Figura 4. - Frames da filmagem com gás C25 evidenciando movimentação da sílica na poça de metal líquido. As setas apontam a presença de sílica na imagem

Quando soldando com C25, também ocorreram situações em que a sílica foi expulsa da poça, como registrado na figura 5. A geometria das concentrações de sílica, nessa condição, consiste de formações ininterruptas finas e longas que costeiam os cordões de solda. Quando a extremidade da concentração mais próxima do arco, identificada na imagem “a”, entrou em contato com a poça metálica na imagem “b”, a ação de fusão e incorporação da sílica na poça metálica provocou um efeito gangorra, que separou e elevou a outra extremidade do fragmento de sílica sólida, evidenciada na imagem “c”. Com a aproximação do arco, essa sílica suspensa no “ar” foi fundida e expelida para fora, como observado nas imagens “e” e “f”.

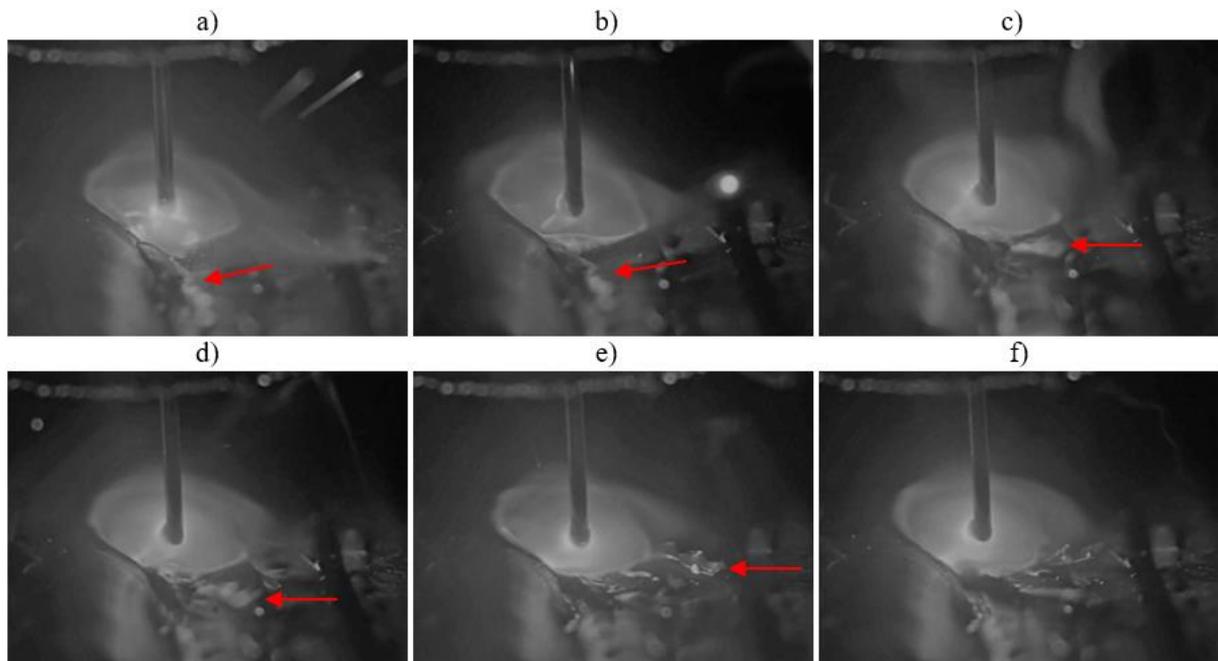


Figura 5 - Frames da filmagem com gás C25 mostrando a sílica sendo expulsa da poça metálica. As setas apontam a presença de sílica na imagem

Os resultados referentes aos ensaios de raio-x não demonstraram a presença de inclusões e nem poros entre os cordões, apesar de haver regiões onde são encontrados os defeitos geométricos gerando regiões de vale na superfície do depósito, conforme ilustra a Figura 6. Reforçando o entendimento de que a sílica fundida é conduzida para fora, seja para cima ou para as laterais, da poça metálica e não fica retida como uma inclusão no metal de solda.

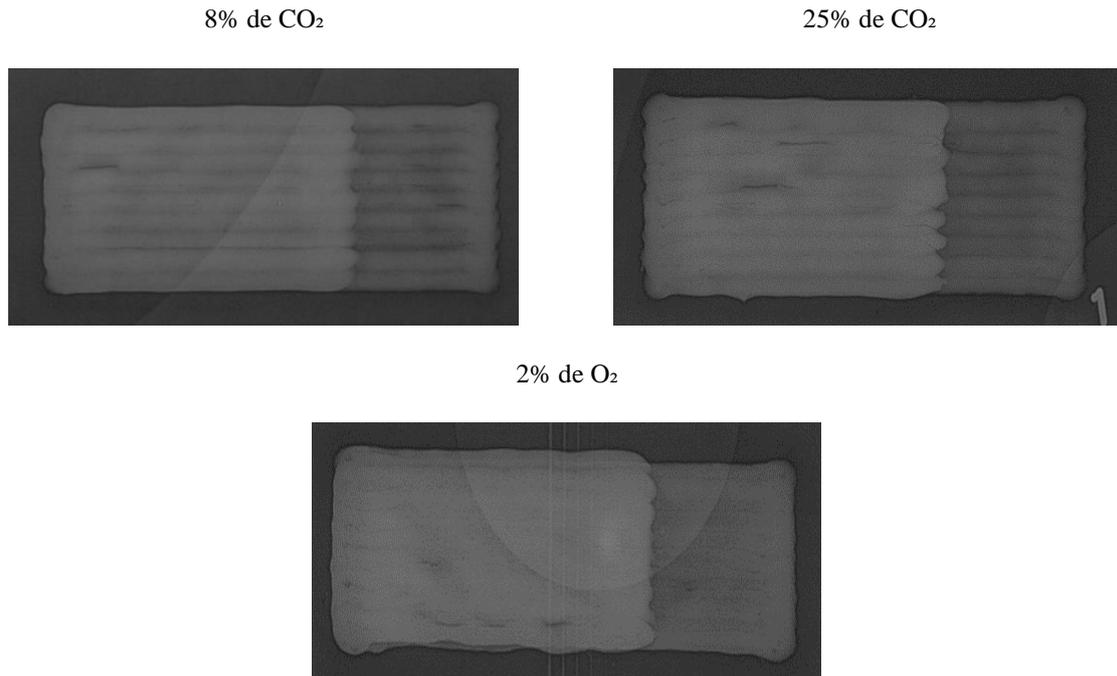


Figura 6. - Resultados dos ensaios de raio-x

Os resultados das macrografias, apresentados na Figura 7, diferentemente dos resultados de raio-x, mostram que, nos pads soldados com C8 e 2% O₂, existem inclusões grandes de sílica entre os cordões sobrepostos em ambas as camadas. O posicionamento dessas inclusões de sílica retida, na interseção entre um cordão e o outro, ajuda a mascarar a sua presença nos ensaios de raio-x, já que as linhas mais escuras reveladas aparentam fazer parte da geometria natural do cordão. A peça soldada com gás C25, apesar de visualmente apresentar maior formação de sílica, não houve sílica retida dentro do pad na forma de inclusão entre os cordões e teve boa fusão entre os passes.

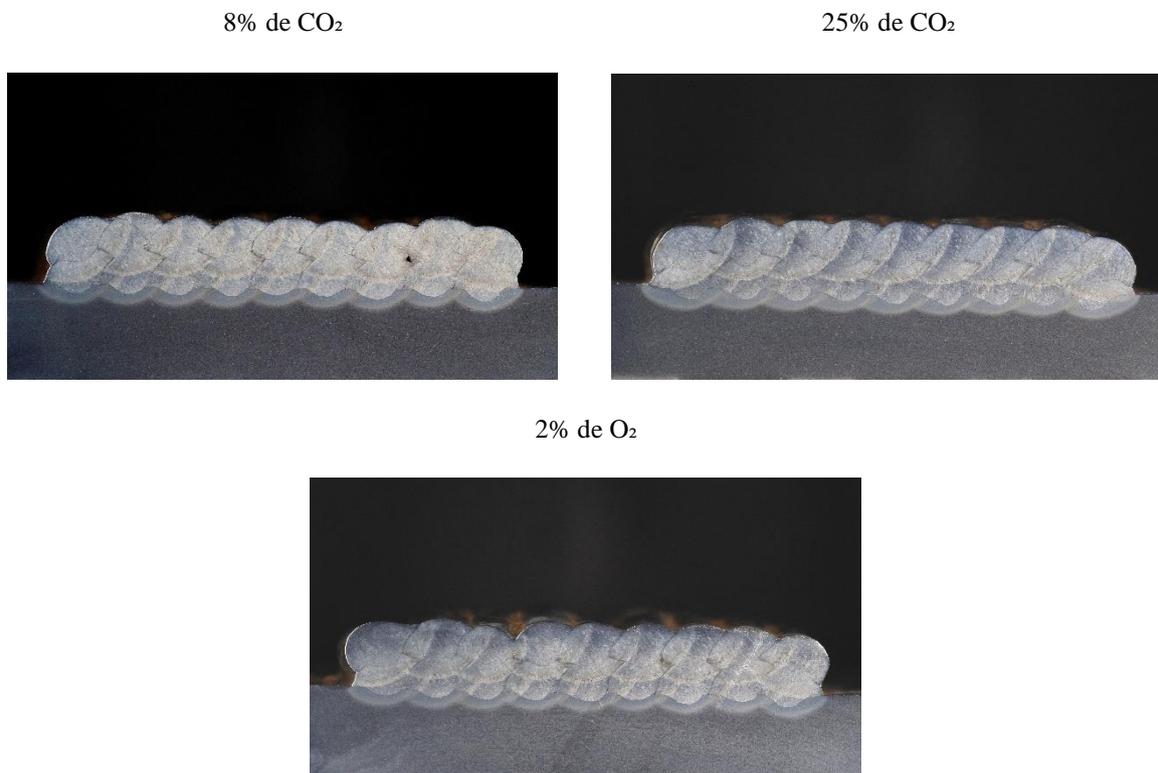


Figura 7. - Resultados de macrografia da seção transversal dos pads

Por meio da análise química da superfície dos pads constatou-se um empobrecimento em silício e manganês da amostra fabricada com a mistura de 25% de CO₂ em relação às demais, conforme é apresentado na Tabela 2. Esse comportamento reforça o fato de que para a amostra com 25% de CO₂ houve uma maior formação desse óxido, portanto, um empobrecimento em silício da composição química do metal de solda. Além disso, é possível notar um leve aumento de carbono da ordem de 0,02% que pode ser proveniente, possivelmente, da dissolução desse elemento a partir do gás de proteção com maior concentração de carbono.

Tabela 2. Composição química medida na superfície dos pads

Mistura Gasosa	C	Si	Mn	P	S	Cr
8% CO ₂	0,03	0,90	1,49	0,01	0,02	0,04
25% CO ₂	0,05	0,78	1,22	0,01	0,02	0,04
2% O ₂	0,03	0,90	1,38	0,01	0,02	0,03

4. Conclusões

O estudo realizado permitiu verificar que a composição da mistura gasosa determina a quantidade de sílica que se deposita sobre os cordões, sendo que a mistura com 25% de CO₂ apresentou a tendência de produzir maior quantidade. A utilização das misturas 8% de CO₂ e 2% de O₂ produziu menor quantidade de sílica, porém, no caso da mistura com 2% de O₂, os depósitos de sílica se apresentam de forma concentrada causando maior perturbação do arco no caso de uma soldagem multipasse em comparação com os depósitos de sílica com a mistura 8% de CO₂, os quais se apresentam forma mais bem distribuída ao longo do cordão. Usando técnicas de filmagem, foi possível caracterizar a deflexão do arco por conta do depósito de sílica, com formação da falha de continuidade na sequência e também registrar a sua ação expulsando ou refundindo os depósitos de sílica que estavam presentes no pé do cordão anterior. Mesmo apresentando visualmente menor formação de sílica e uma boa aderência entre cordões por raio-x, as misturas de Ar+8%CO₂ e 2% de O₂, não promoveram uma boa fusão entre cordões em decorrência de grandes concentrações de sílica que foram reveladas nas análises das seções transversais. Mostrando a análise por raio-x não é confiável nesse tipo de validação. Dessa forma, foi possível concluir que a utilização da mistura Ar+25%CO₂ se apresentou como melhor alternativa por produzir os depósitos com melhor fusão entre os cordões, mesmo apresentando regiões de defeitos na superfície.

5. Agradecimentos

A equipe do LABSOLDA agradece aos financiadores CNPq, CAPES, ANP PRH 45, Shell e PETROBRAS e POSMEC-UFSC.

6. Referências Bibliográficas

- [1] KAH, P.; MARTIKAINEN, J.. Influence of shielding gases in the welding of metals. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 64, n. 9-12, p. 1411-1421, 12 abr. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.
- [2] HERTEL, M.; TRAUTMANN, M.; JÄCKEL, S.; FÜSSEL, U.. The Role of Metal Vapour in Gas Metal Arc Welding and Methods of Combined Experimental and Numerical Process Analysis. **Plasma Chemistry And Plasma Processing**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 531-547, 30 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-017-9790-1>.
- [3] KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. New Jersey, USA, v. 431, n. 446, p. 223-225, 2003.
- [4] TESKE, Mario; MARTINS, Fábio. The influence of the shielding gas composition on GMA welding of ASTM A 516 steel. **Welding International**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 222-230, mar. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09507110902843875>.
- [5] MENZEL, M. The influence of individual components of an industrial gas mixture on the welding process and the properties of welded joints. **Welding International**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 262-264, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2003.3111>.
- [6] PURWANINGRUM, Yustiasih; TRIYONO, Triyono; PU, M. Wirawan; ALFARIZI, Fandi. Effect of Shielding Gas Mixture on Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Low Carbon Steel (LR Grade A). *Key Engineering Materials*, [S.L.], v. 705, p. 250-254, 15 ago. 2016. Trans Tech Publications, Ltd..

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.705.250>.

[7] LISKEVYCH, Olga; SCOTTI, Américo. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. *Welding In The World*, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 217-224, 18 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-014-0196-x>.

[8] MENESES, Valter Alves de; LEAL, Valdemar Silva; SCOTTI, Américo. Influence of Metal Transfer Stability and Shielding Gas Composition on CO and CO₂ Emissions during Short-circuiting MIG/MAG Welding. *Soldagem & Inspeção*, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 253-268, set. 2016. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2103.02>.

[9] Pires I, Rosado T, Costa A, Quintino L (2007) Influence of GMAW shielding gas in productivity and gaseous emissions. In: 10th international aachen welding conference. Aachen, Germany.

[10] CARPENTER, K.R., MONAGHAN, B.J., NORRISH, J., 2009. Influence of shielding gas on fume formation rate for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel. *Proceedings of the 8th International Conference. Trends Weld. Res.*, 436-442. DOI: 10.1361/cp2008twr436.