

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA ABSORÇÃO DE OXIGÊNIO EM SOLDAGEM HIPERBÁRICA COM PROCESSO MAG

Valter Rocha dos Santos ¹

Jorge Fernandez dos Santos ²

João Marcos Alcoforado Rebello ³

Resumo

Na soldagem hiperbárica a seco com o processo MIG/MAG são pouco conhecidos os limites operacionais dos gases ativos presentes no gás de proteção. Assim, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência da pressão na faixa de 0,1 MPa a 11,1MPa (1 bar a 111 bar) e do teor de oxigênio presente no gás de proteção na composição química do metal de solda. As juntas de teste, depósitos sobre chapa e soldas multipasses em chanfro, empregando como metal de adição, aço com 1% Ni e 0,4% Mo, foram soldadas em simulador hiperbárico do GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Alemanha. As pressões absolutas de teste foram: 5,1 MPa (51 bar); 7,1 MPa (71 bar); 9,1 MPa (91 bar) e 11,1 MPa (111 bar). Foram empregados os seguintes gases de proteção: He-0,1%O₂, He-0,5%O₂, Ar-0,3%O₂, Ar-0,6%O₂ e Ar-1,0%O₂. Considerando as elevadas pressões parciais empregadas, são baixos os níveis de oxigênio atingidos no metal de solda e pequenas as variações de Mn, Si e C no metal de solda com o aumento da pressão parcial de oxigênio. Estes resultados não estão em concordância com dados apresentados na literatura, obtidos em soldagem atmosférica. Para explicar tal comportamento sugere-se que o fator determinante seja a maior taxa de evaporação desenvolvida com o aumento da pressão. A difusão do oxigênio através do vapor metálico que emerge das superfícies de metal fundido passa a ser um mecanismo a ser considerado e provavelmente o mais significativo.

Palavras-chave: Soldagem hiperbárica; Absorção de oxigênio; Processo MIG/MAG, Composição química.

INFLUENCE OF PRESSURE ON OXYGEN ABSORPTION DURING GMAW HYPERBARIC WELDING

Abstract

Few technological data are available concerning operational limits of shielding gases aiming the application of the GMAW process in hyperbaric welding. In order to contribute to this knowledge, this paper presents results correlating the pressure and the oxygen content in the shielding gas to the weld metal chemical composition. The welding of bead on plate and multipass test joints was performed in the hyperbaric simulator of the GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, in Germany. The absolute pressures of 5,1 MPa (51 bar); 7,1 MPa (71 bar); 9,1 MPa (91 bar) e 11,1 MPa (111 bar) were applied in combination with the following Helium and Argon based gas mixtures: He-0.1%O₂, He-0.5%O₂, Ar-0.3%O₂, Ar-0.6%O₂ Ar-1.0%O₂. The welding consumable was a low alloy steel wire containing 1% Ni and 0.4% Mo. Considering the high partial pressures attained the oxygen contents in the weld metals were unexpectedly low. In addition, increasing the oxygen partial pressure, small variations on the contents of Mn, Si and C in the weld metal were observed. These results do not follow the corresponding tendency reported in the literature for welding under the room pressure. To explain such behaviour it is suggested that under high pressures the oxygen partial pressure does not play an important role anymore. The oxygen diffusion throughout the metallic vapour which emerges from the molten metal surfaces is claimed to be a new mechanism to be considered and probably it becomes the most important controlling mechanism in the oxygen absorption by the weld metal.

Key words: Hyperbaric welding, oxygen absorption, GMAW, chemical composition.

1 INTRODUÇÃO

Estudos recentes sobre propriedades mecânicas e metalúrgicas de soldas MIG/MAG hiperbáricas mostraram que a combinação de arame sólido e argônio como gás de proteção é capaz de produzir soldas isentas de defeitos, na posição plana, com

propriedades mecânicas satisfatórias até 11,1 MPa⁽¹⁾ e até 25 MPa.⁽²⁾ Entretanto, são pouco conhecidos as influências e os limites operacionais dos gases ativos, principalmente do oxigênio e do dióxido de carbono, adicionados no gás de proteção.

¹ Pesquisador, DCMM, PUC-Rio

² Pesquisador, GKSS Forschungszentrum

³ Professor LABOEND/PEMM/EE/COPPE - UFRJ

A absorção de oxigênio pelo metal de solda no processo MAG em baixas pressões (próximas da ambiente), com gases de proteção Ar-O₂ sob diferentes pressões parciais de O₂ foi estudada teórica e experimentalmente por Sato e Kuwana^(3,4) e Coe e Moreton,⁽⁵⁾ dentre outros autores. Resultados experimentais^(3,4) obtidos a partir de depósitos de ferro comercialmente puro mostraram que o teor de oxigênio do metal de solda cresce com o aumento da pressão parcial de O₂ (pp O₂) até um valor da ordem de 0,26%, a partir do qual se mantém constante. Este teor de oxigênio está muito próximo ao limite de solubilidade do oxigênio no ferro líquido a temperaturas da ordem de 1600°C. Na soldagem de aços as quantidades de oxigênio absorvidas são inferiores em decorrência da ação desoxidante de elementos presentes neste material como, por exemplo, o silício e o manganês. Neste caso, o aumento da quantidade de oxigênio absorvido pelo metal líquido é acompanhado de redução das quantidades dos elementos desoxidantes remanescentes no metal de solda. Assim, os modelos teóricos existentes consideram que a absorção de oxigênio pelo metal líquido é comandada pela pressão parcial deste elemento na atmosfera envolvente e influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela atividade dos elementos químicos reativos presentes. Com base nestas premissas, na soldagem sob altas pressões, na presença de gases de proteção contendo oxigênio, os elevados níveis atingidos pela pressão parcial deste elemento sugerem quantidades de oxigênio absorvido extremamente elevadas e, portanto, indesejáveis. No presente trabalho, onde é investigada a influência da pressão e do teor de oxigênio do gás de proteção na composição química do metal de solda, os resultados obtidos não são explicados pelos mecanismos de absorção usualmente considerados. Um modelo qualitativo é então proposto, onde o mecanismo de absorção predominante passa a ser a taxa de evaporação metálica, acrescida pelo aumento da pressão.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O simulador hiperbárico de soldagem utilizado é um componente do complexo de testes hiperbáricos do GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Alemanha. A câmara de soldagem é um vaso de pressão cilíndrico com 700 mm de diâmetro interno e 1700 mm de comprimento, cuja pressão máxima de operação é 12 MPa. A fonte de soldagem é de fabricação ELMA

Technik, modelo A400, com ajustes de tensão em vazio para 65 V e 100 V e corrente máxima de 400 A a 60%. O metal de adição empregado foi um aço de baixa liga com 1%Ni e 0,4%Mo (OERLIKON CARBOFIL NiMo1), cujas características, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1. A composição química do metal de base empregado está apresentada na Tabela 2. O estudo das influências da pressão e do gás de proteção na composição química do metal depositado foi efetuado pela análise de depósitos sobre chapa (DSC) e de soldas multipasses (SM) executados na posição plana, com transferência metálica por curto-circuito.

Nas soldas DSC a corrente de soldagem variou entre 170 A e 180 A. O metal de base, cuja composição química é apresentada na Tabela 2, foi previamente revestido por solda em duas camadas, operação esta executada na pressão atmosférica, com o mesmo consumível, e utilizando Ar-18%CO₂ como gás de proteção. As pressões absolutas de teste foram: 5,1 MPa, 7,1 MPa, 9,1 MPa e 11,1 MPa. Em cada pressão foram empregados os seguintes gases de proteção: He-0,1%O₂ e He-0,5%O₂, obtendo-se a pressão parcial máxima de 0,055 Mpa de O₂. O gás de câmara (GCAM) empregado foi o gás de mergulho TRIMIX (He-5%N₂-1%O₂).

Nas soldas SM o metal de solda foi depositado em chanfro "V" com 15 mm de profundidade em chapa de 19 mm de espessura (composição química na Tabela 2). As soldas foram realizadas em seis camadas, com a corrente variando entre 140 A e 150 A. Cada camada foi depositada com oscilação lateral do eletrodo de borda a borda do chanfro. As soldas multipasses foram executadas nas pressões de 0,1 MPa, 5,1 MPa, 7,1 MPa, 9,1 MPa e 11,1 MPa em atmosfera de TRIMIX ou argônio puro. Os gases de proteção empregados foram argônio puro ou misturas Ar-0,3%O₂, Ar-0,6%O₂ e Ar-1,0%O₂, obtendo-se a pressão parcial máxima de 0,111 MPa. As soldas DSC e SM foram analisadas por espectrometria de massa para 16 elementos e por um sistema LECO para determinação de C, O e N.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As influências da pressão parcial do oxigênio do gás de proteção nos teores de oxigênio, silício, manganês e carbono no metal depositado são apresentadas nos gráficos das Figuras 1 a 4. Com exceção do oxigênio, os teores dos demais elementos presentes no metal de solda não variam em função da pressão parcial de oxigênio ou são muito pouco afetados por essa variável. Os

Tabela 1. Composição química do arame e do metal depositado, com gás de proteção Ar-18% CO₂, segundo o fabricante do arame (% em peso).

	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti
Arame	< 0,10	0,6	1,8	1,0	0,4	0,15
Metal Depositado	0,05-0,08	0,3-0,5	1,5-1,7	1,0	0,4	<0,10

Tabela 2. Composição química do metal de base (% em peso).

C	Si	Mn	O	Ni	Mo	Ti	P	S	Al	Nb	V
0,16	0,37	0,5	0,015	0,03	0,02	0,001	0,001	0,01	0,018	0,003	0,001

elementos de liga Ni e Mo mantiveram-se praticamente constantes enquanto que o titânio foi quase integralmente consumido resultando num teor de 0,001% em todas as amostras do metal de solda.

Os resultados obtidos no presente trabalho (Figuras 1 a 4) evidenciam que, com o aumento da pressão parcial de oxigênio no gás de proteção, o teor de oxigênio no metal de solda cresce com a tendência de estabilização em torno de 0,06% de oxigênio e que os teores dos demais elementos presentes no metal de solda não variam ou são muito pouco afetados por essa variável. Considerando que foram atingidas pressões parciais da ordem de 0,1 MPa, o que equivale a soldar com oxigênio puro em condições atmosféricas, os resultados obtidos estão em desacordo com os valores reportados na literatura quando da soldagem em condições atmosféricas nas mesmas pressões parciais. Nas Figuras 1 a 4 são apresentados, ainda, resultados experimentais publicados por Sato e Kuwana,^(3,4) Coe e Moreton⁽⁵⁾ e Grong e Christensen,⁽⁶⁾ nos quais em soldagem atmosférica, com o aumento da pressão parcial de oxigênio, os níveis de oxigênio absorvido são maiores e ocorre

redução acentuada nos teores de carbono e dos elementos desoxidantes Mn e Si. Em consequência, mostrou-se necessário buscar uma explicação para tais diferenças por meio de uma análise mais aprofundada dos resultados relativos à absorção de oxigênio pelo metal de solda, efetuada a seguir, onde os resultados obtidos no presente trabalho são comparados com as previsões baseadas nos modelos de absorção deste elemento estabelecidos na literatura e com resultados experimentais em soldagem atmosférica obtidos na literatura.⁽³⁻⁶⁾ Como a literatura especializada em metalurgia da soldagem hiperbárica é bastante limitada, poucos resultados disponíveis sobre composição química do metal depositado foram plotados, para comparação. Assim, nas Figuras 1 a 4 foram incluídos resultados em soldagem hiperbárica de Terlinde,⁽⁷⁾

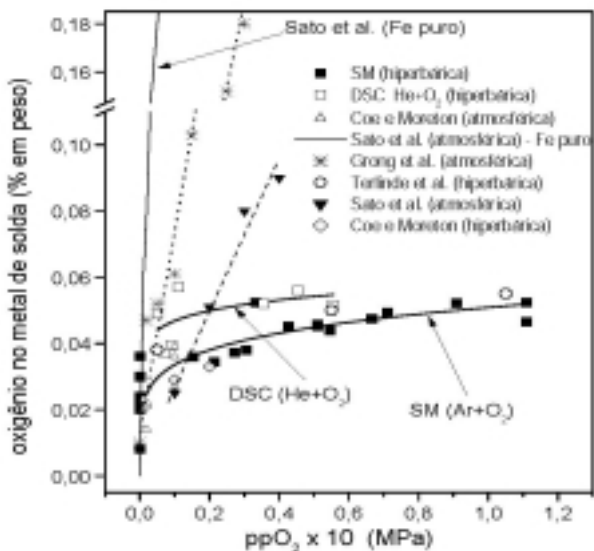


Figura 1. Teor de oxigênio no metal de solda em função da ppO₂ no gás de proteção, incluindo resultados de outros autores.

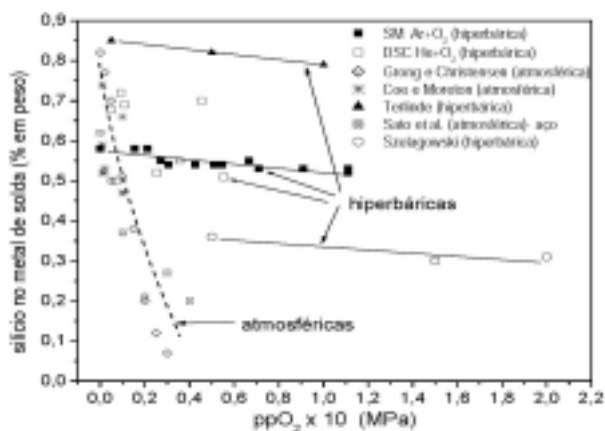


Figura 3. Teor de silício no metal de solda em função da ppO₂ no gás de proteção. Obs: as curvas indicam apenas as tendências, para facilitar a visualização.

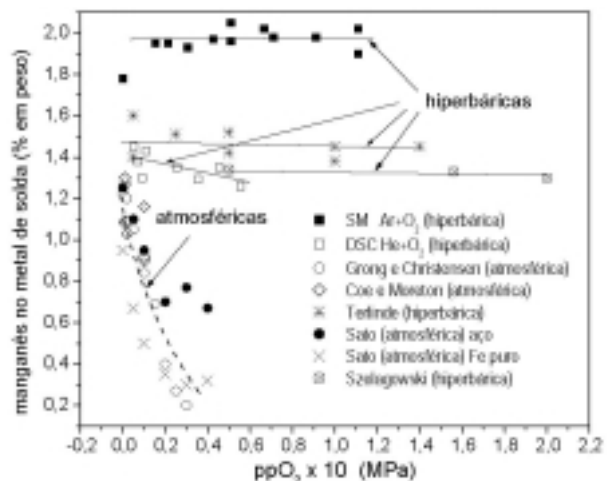


Figura 2. Teor de manganês no metal de solda em função da ppO₂ no gás de proteção. Obs: as curvas indicam apenas as tendências, para facilitar a visualização.

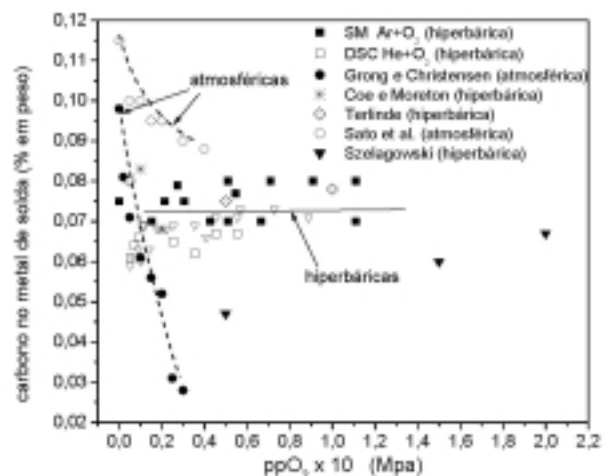


Figura 4. Teor de carbono no metal de solda em função da ppO₂ no gás de proteção. Obs: as curvas indicam apenas as tendências, para facilitar a visualização.

Szelagowski e col.⁽⁸⁾ e Coe e Moreton.⁽⁵⁾ A hipótese que é apresentada no presente trabalho, e discutida a seguir, é de que a pressão influencia a absorção do oxigênio por um mecanismo adicional, que passa a ser dominante em relação aos mecanismos já estudados nas condições atmosféricas.

Sob pressão crescente, o arco elétrico no processo MIG/ MAG sofre alterações de várias naturezas. A constrição do arco, com conseqüentes reduções da seção da coluna do arco e das áreas anódica e catódica, resulta em aumento da temperatura nestas regiões. Em conseqüência, cresce a taxa de evaporação do metal na ponta do eletrodo e na poça de fusão, o que parcialmente explica o aumento de condutibilidade elétrica do arco. Embora os mecanismos relacionados à emissão de vapores metálicos em soldas sob pressões elevadas não tenham sido ainda suficientemente estudados, a ocorrência de taxa de evaporação mais acentuada em soldagem hiperbárica está inequivocamente confirmada experimentalmente.⁽⁹⁻¹¹⁾ Burrell e Levin,⁽¹¹⁾ trabalhando com gás de proteção Ar+2%O₂ e transferência metálica por pulverização, relatam aumento de fumos e respingos acima de 1,1 MPa, escurecendo a coluna do arco. Perdas por evaporação e respingos superiores a 50% do peso de arame fundido foram estimados, pelos mesmos autores, na soldagem a 2,2 MPa. Trabalho recente de Richardson e col.⁽¹²⁾ apresenta importantes considerações sobre influências da pressão no comportamento do arco em altas pressões (até 25 MPa). Segundo estes autores, em polaridade direta, sob pressão de 0,1 MPa, o jato de plasma flui de forma estável do eletrodo em direção à poça de fusão. Com o crescimento da pressão, a área de emissão do eletrodo concentra-se na superfície da gota em crescimento e tem início a formação de fluxo de plasma a partir da mancha anódica, que tem sua área progressivamente reduzida. Sob pressões elevadas, intensifica-se o fluxo de plasma a partir da região anódica com a tendência de equivalência entre ambos os fluxos.

Estando o aumento do fluxo de plasma associado ao aumento da taxa de evaporação, é razoável supor que a ação do gás ativo sobre ambas as superfícies líquidas é então dificultada pela proteção promovida pelas camadas de vapor metálico cujas frentes emergem continuamente destas superfícies. Em conseqüência, o mecanismo de absorção de oxigênio pode ser governado não mais pelas reações de oxidação, mas sim pela difusão do oxigênio através destas camadas gasosas e sua modelagem quantitativa se torna bastante complexa. De acordo com os estudos de Corderoy, Wills e Wallwork,⁽¹³⁾ em

soldagem MIG/MAG de aços em condições atmosféricas, sob proteção gasosa de Ar+O₂ com até 20% de O₂, as perdas de Mn e Si na ponta do arame podem ser governadas pela difusão do oxigênio atômico através de uma camada de vapor metálico que envolve a gota de metal líquido. Segundo estes autores, em soldagem atmosférica com proteção gasosa de Ar+5%O₂ a correspondente taxa de difusão é da ordem de 0,01 g/s.cm² para a temperatura do plasma de 5000 °C. Por outro lado, a taxa de evaporação do ferro, na pressão atmosférica, calculada na temperatura de ebulição deste elemento (3343 K) é da ordem de 0,5 g/s.cm², caindo para valores da ordem de 0,04 g/s.cm² a 2273 K. Com base nestes dados, e considerando o efeito adicional do aumento da taxa de evaporação com a pressão, é razoável considerar que em soldagem hiperbárica a taxa de evaporação metálica seja superior à de difusão do oxigênio, significando que a evaporação impõe uma barreira à migração do oxigênio em direção à superfície de metal líquido.

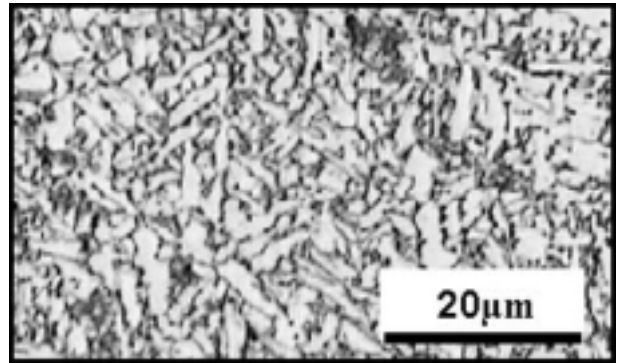
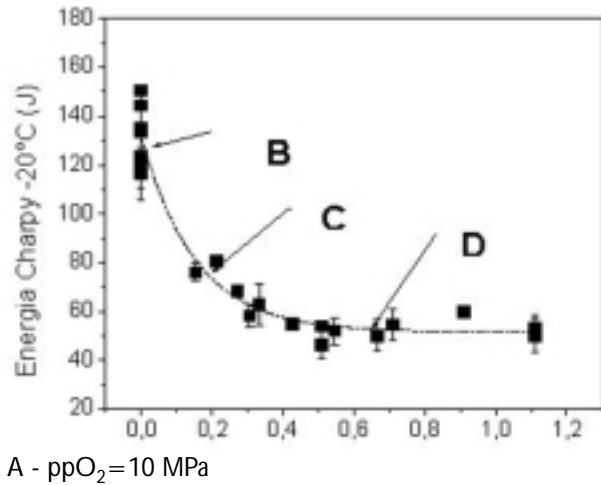
Estudos sobre as cinéticas de evaporação e oxidação de gotas de ferro líquido contribuem para a interpretação dos resultados obtidos no presente trabalho. Distin e Whiteway⁽¹⁴⁾ investigaram o comportamento de gotas de ferro levitadas e aquecidas a cerca de 1750 °C em contato com He contendo até 1,46% de O₂ em vazões de até 0,13 l.s⁻¹. Os autores concluíram que, no percurso do oxigênio em direção à gota, são formados óxidos que se condensam dando origem aos fumos e resultando em aumento da evaporação do ferro. Foi observado que o aumento da pressão parcial do oxigênio provoca aumento na taxa de evaporação do ferro.

Em soldagem hiperbárica o mecanismo proposto por Corderoy para a gota em formação na extremidade do arame pode ser estendido à poça de fusão, onde a temperatura aumenta com o acréscimo da pressão. Esta hipótese encontra suporte nos resultados de soldagem hiperbárica do presente trabalho, onde os teores de carbono, manganês, silício e titânio são praticamente independentes da pressão parcial de oxigênio, reforçando a hipótese de que os modelos que regem a absorção de oxigênio na soldagem atmosférica não podem ser diretamente aplicados à soldagem hiperbárica. Com o acréscimo da pressão e o conseqüente aumento da temperatura nas superfícies de metal líquido, sugere-se que a evaporação seja o mecanismo predominante na absorção de oxigênio.

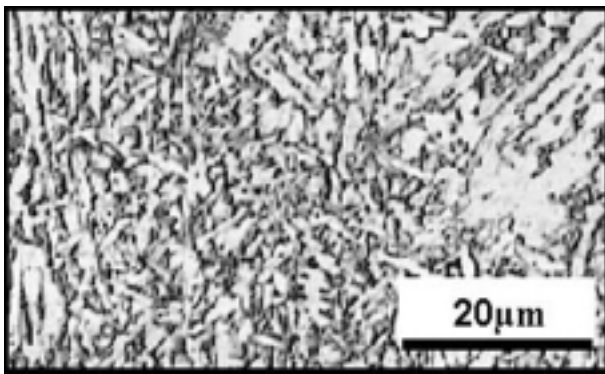
Alguns resultados extraídos de trabalho conduzido pelos presentes autores (15), nas mesmas soldas analisadas do presente trabalho, são mostrados nas figuras 5A a 5D e 6. Estes resultados ilustram a evolução microestrutural e de tenacidade do metal de solda em função da ppO₂ no gás de proteção e do teor de oxigênio do metal de solda. Foi observado⁽¹⁵⁾ que os microconstituintes predominantes e determinantes do valor da tenacidade são a ferrita acicular e a ferrita com presença de segundas fases, conforme a figura 6. Nesta figura observa-se que com o aumento do teor de oxigênio do metal de solda a ferrita acicular é de forma crescente substituída por outros microconstituintes de menor tenacidade, tais como ferrita com segundas fases alinhadas e agregados ferrita-carbeto. Algumas microestruturas representativas são apresentadas nas figuras 5B a 5D. Tal evolução microestrutural assemelha-se àquela em soldas atmosféricas, quando

relacionada à variação do teor de oxigênio no metal de solda de aços C-Mn e com adições de Mo e Ni. Assim, o resultado prático do aumento da ppO_2 no gás de proteção é um limitado aumento do teor de oxigênio do metal de solda com conseqüente decréscimo da tenacidade. Esta variação da tenacidade apresentou uma tendência assintótica em torno de 50 J (Figura 5A). Este valor

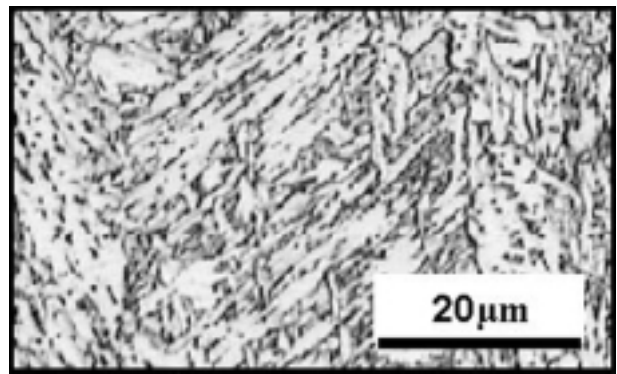
é superior ao mínimo exigido pelos principais códigos e normas para metais de solda de qualidade estrutural, viabilizando, sob este aspecto, a execução da soldagem hiperbárica em profundidades de até 1100 m.



B - Pressão na câmara: 0,1 MPa
 $ppO_2 = 0$ MPa Om.s. = 0,008%
 2%.

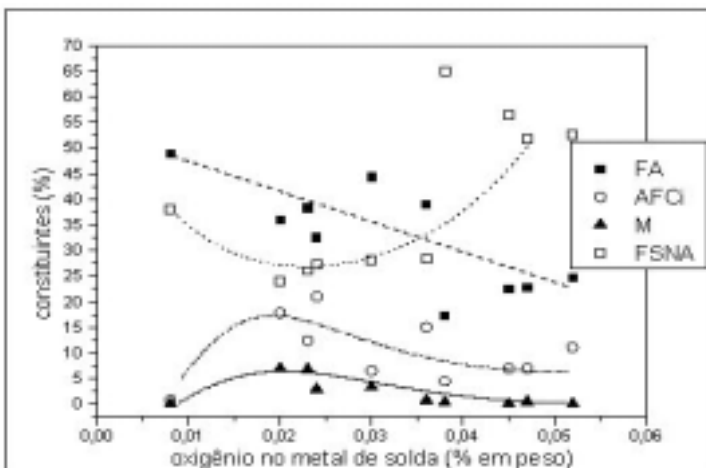


C - Pressão na câmara: 5,1 MPa
 $ppO_2 = 0,015$ MPa Om.s. = 0,036%



D - Pressão na câmara: 11,1 MPa
 $ppO_2 = 0,066$ MPa Om.s. = 0,047%

Figura 5. A: Tenacidade, medida pelo ensaio Charpy, em função da ppO_2 . B, C e D: Microestruturas típicas do metal de solda. Nital 2%



FA= Ferrita acicular
 AFCi= Agregados ferrita-carbeto
 M= Martensita
 FSNA= Ferrita com segundas fases alinhadas

Obs: Os demais microconstituintes não são apresentados.

Figura 6. Variação dos principais microconstituintes presentes no metal de solda em função do teor de oxigênio.⁽¹⁵⁾

4 CONCLUSÕES

A variação da composição química do metal depositado em função da pressão parcial de oxigênio apresentou um comportamento diferente daquele observado em soldas atmosféricas. Para explicar tais diferenças propõe-se que, em soldagem hiperbárica, as maiores taxas de evaporação metálica passem a assumir importância, juntamente com a pressão parcial de oxigênio nos mecanismos de absorção de oxigênio pelo metal de solda. A difusão do oxigênio através do vapor metálico que emerge das superfícies

de metal fundido passa a ser um mecanismo a ser considerado e provavelmente o mais significativo.

Houve queda de tenacidade com o aumento da ppO_2 , decorrente da menor quantidade de ferrita acicular. Entretanto, o valor mínimo de tenacidade atingido ainda é superior ao mínimo usualmente exigido, viabilizando, por este aspecto, a soldagem hiperbárica em profundidades de até 1100 m.

Agradecimentos

GKSS "Forschungszentrum Geesthacht GmbH" (Alemanha),
PETROBRAS/CENPES

REFERÊNCIAS

- 1 SANTOS, V. R.; JORGE, J. C. F.; SANTOS, J. F. Soldagem hiperbárica: perspectivas do processo MIG/MAG para aplicação em reparos de dutos submarinos em águas profundas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, 22., 1996, Blumenau. **Anais...** Blumenau : Associação Brasileira de Soldagem, 1996. p. 741-751.
- 2 RICHARDSON I. M. Comunicação pessoal.
- 3 SATO, Y.; KUWANA, T. Oxygen absorption in iron and steel weld metal. **ISIJ International**, v. 35, n. 10, p. 1162-1169, Oct. 1995.
- 4 SATO, Y.; KUWANA, T.; TOMITA, K. Oxygen absorption of steel weld metal during gas metal arc welding, **Welding International**, v. 7, n. 4, p. 38-43, Apr. 1993.
- 5 COE, F. R.; MORETON, J. Gas shielding welding –The reaction of oxygen in normal and hyperbaric environments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNDERWATER WELDING, 1., 1983, Bergen, Norway. **Proceedings...** Oxford : Pergamon Press, 1983. p. 293-302
- 6 GRONG, Ø.; CHRISTENSEN, N. Factors controlling mig weld metal chemistry. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.4, n.12, p. 155-165, Dec. 1983.
- 7 TERLINDE, G. T. MIG welding of offshore steels at pressures from 1 to 30 bar. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1983, Houston, Texas. **Proceedings...** USA: OTC, 1983. paper OTC 4598.
- 8 SZELAGOWSKI, P.; SANTOS, J. F.; LOEBEL, P.; SCHAFSTALL, H. G. Considerations of weld procedures for hyperbaric FCAW down to 450 msw, In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1988, Houston, Texas. **Proceedings...** USA: OTC, 1988. paper OTC 5818.
- 9 SANTOS, J. F.; SZELAGOWSKI, P. Properties of joints metal-arc active gas welded with flux cored wire electrode in a hyperbaric atmosphere. **Welding and Cutting**, v.12, n.12, p. E200-201, Dec. 1990.
- 10 SZELAGOWSKI, P.; PACHNIUK, I. State of art and practice of underwater hyperbaric dry welding. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON UNDERWATER WELDING OF MARINE STRUCTURES, 1984, New Orleans, Louisiana. USA : American Bureau of Shipping, 1995. p. 113-141.
- 11 BURRIL, E. L.; LEVIN, M. L. Effect of pressure on the MIG welding arc. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GAS DISCHARGES, 1970, London. London : Institution of Electrical Engineers, 1970. p 595-599.
- 12 RICHARDSON, M.; NIXON, J. H.; NOSAL, P.; HART, P.; BILLINGHAM, J. Deepwater Hyperbaric GMA Welding, **IIW Doc. SCUW 176-99**. Lisbon : International Institute of Welding Select Committee for Underwater Welding, 1999.
- 13 CORDEROY, D. J. H.; WILLS, B.; WALLWORK, G. R., Gas/weld metal reactions in MIG arc plasma. In: WELD POOL CHEMISTRY AND METALLURGY INTERNATIONAL CONFERENCE, 1980, London. Cambridge: The Welding Institute, 1980. p 147-153.
- 14 DISTIN, P. A.; WHITEWAY, S. G., Kinetics of vapourization and oxidation of liquid iron levitated in flowing helium-oxygen. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 9, n. 2, p. 419-426, 1970.
- 15 SANTOS, V. R. Influências do oxigênio do gás de proteção em propriedades do metal de solda na soldagem hiperbárica MIG/MAG até 111bar. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

Recebido em: 02/12/05

Aceito em: 10/03/06

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte, MG. São Paulo : ABM, 2005.