

Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico

Jorge Carlos Ferreira Jorge¹, Luis Felipe Guimarães de Souza¹, Erick de Souza Marouco¹, Olavo Ribeiro dos Santos Filho², Jorge Luiz Coutinho Diniz³

¹ Diretoria de Pesquisa e Pós Graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Arinque Engenharia Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ JDiniz Consultoria e Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido: 18 Ago., 2015

Aceito: 28 Out., 2015

E-mails: jorgecferge@gmail.com (JCFJ),
olavo@arinque.com.br (ORSF), j.diniz@
jdiniz.com.br (JLCD)

Resumo: Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de aço carbono obtidas pelo processo a arco submerso automatizado com elevada energia de soldagem, visando o aumento de produtividade na fabricação de tubulações para equipamentos de ancoragem. Foram soldadas juntas de aço ASTM A-572 Gr.50 com 25mm de espessura pelo processo a arco submerso em passe único, com energia de soldagem variando de 7,8 até 14,0 kJ/mm. As juntas foram avaliadas através de ensaios de impacto Charpy-V realizados à temperatura de 0°C, microdureza Vickers com carga de 1 kgf. e metalográficos em corpos-de-prova retirados do metal de solda e zona termicamente afetada. Os resultados mostraram que as juntas soldadas apresentaram tenacidade ao impacto superior aos mínimos requeridos para a utilização na soldagem de aços C-Mn baixa liga com requisitos de impacto de 34 Joules à 0°C. Foi observado um aumento significativo da produtividade, sem prejuízo das propriedades mecânicas, permitindo a fabricação de tubulações para equipamentos de petróleo com redução significativa do tempo envolvido na fabricação.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Microestrutura; Energia de soldagem.

Mechanical and Microstructural Properties of Submerged Arc Weldments with High Heat Input

Abstract: The objective of the current work is to present a study of the mechanical and microstructural properties of welded joints of carbon steel obtained from automatic submerged arc welding process with high welding energy, in order to improve productivity on the fabrication of pipes for mooring equipment. Joints of 25mm-thick ASTM A-572 Gr.50 steel were welded by a single pass of submerged arc welding process, with heat input varying from 7.8 to 14.0kJ/mm. The welded joints were evaluated through Charpy-V impact test performed at 0°C temperature, hardness test with 1 kgf load and metallographic examination, performed on samples removed from weld metal and heat affected zone (HAZ). The results showed that the welded joints presented impact toughness higher than the minimum requirements for the welding of low-alloy C-Mn steel with impact toughness requirement of 34 Joules at 0°C. A significant increase on productivity was observed, without prejudice to the mechanical properties, allowing the fabrication of pipes for oil equipment with significant reduction of production time.

Key-words: Mechanical properties; Microstructure; Heat input.

1. Introdução

O aumento das atividades marítimas na área de petróleo têm exigido maiores volumes de fornecimento de materiais de alta resistência para atendimento das necessidades de operações de exploração e produção em águas profundas, onde se utilizam plataformas semi-submersíveis. Gonçalves e Costa [1] destacam que estas plataformas para operação offshore são unidades flutuantes cujo sistema de ancoragem consiste em longos trechos de amarras de aço, cabos de aço ou cabos de poliéster, conforme o sistema de ancoragem seja o sistema convencional em catenária ou vertical (Figura 1) e âncoras de diversos tipos para sustentação das linhas [2-4].



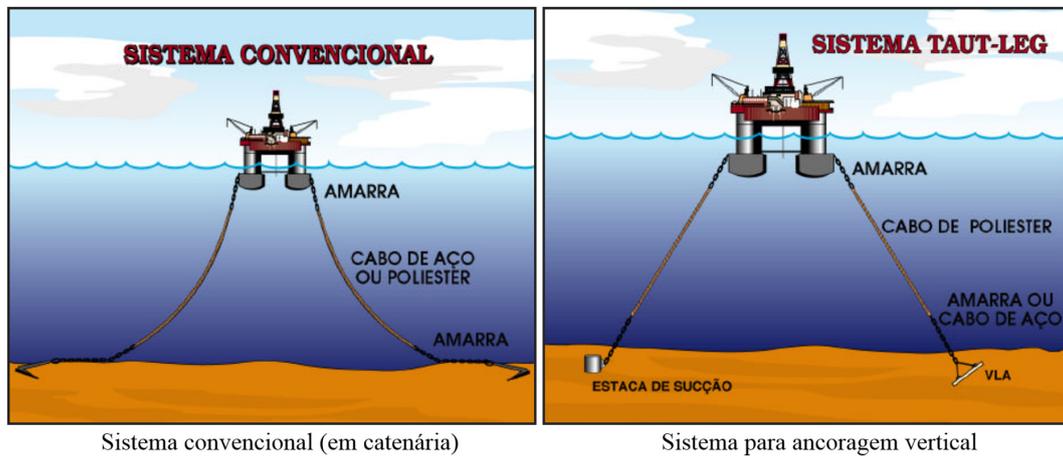


Figura 1. Esquema de sistema de ancoragem de plataforma semi-submersível [1].

No caso das âncoras, existem vários tipos possíveis para seleção, tais como âncoras de arraste, âncoras verticais (VLA), estacas de sucção, etc. (Figura 2). Mais recentemente, os torpedos de ancoragem (Figura 3) passaram a ser uma alternativa importante nesta área de atuação [1], por apresentar condições vantajosas de lançamento. Este último equipamento que consiste de estruturas tubulares com peso até 120 toneladas, utilizam a soldagem como principal processo de fabricação.

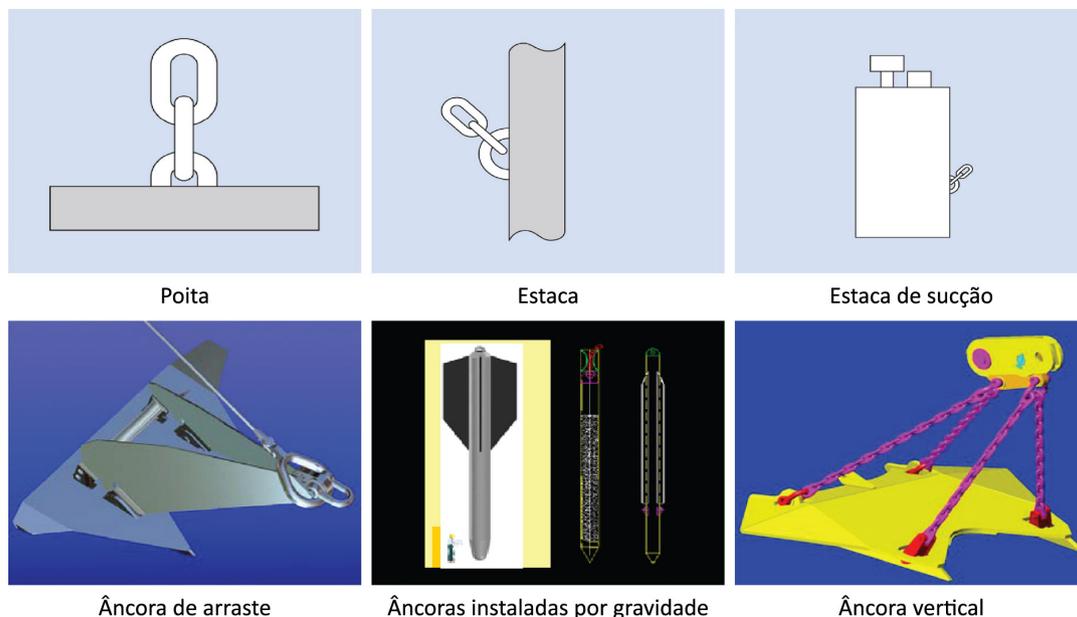


Figura 2. Tipos de âncoras [4].

A busca pela otimização dos custos e do tempo de fabricação de equipamentos navais e offshore [5-8] tem sido uma das principais questões na discussão da seleção dos processos e procedimentos de soldagem que, dentro dos requisitos técnicos de resistência e tenacidade, aliada a produtividade, questiona o estabelecimento do processo que pode oferecer a melhor combinação entre qualidade e produtividade. No aspecto da produtividade, a maior vantagem do processo ao arco submerso em relação a outros está associada a uma melhor eficiência e taxa de deposição, assim como da possibilidade da realização de soldagens completamente mecanizadas, evitando-se as limitações da dependência de mão-de-obra especializada [6]. Entretanto, a vantagem do processo ao arco submerso sob o ponto de vista produtivo deve ser acompanhada de uma análise das propriedades mecânicas do metal

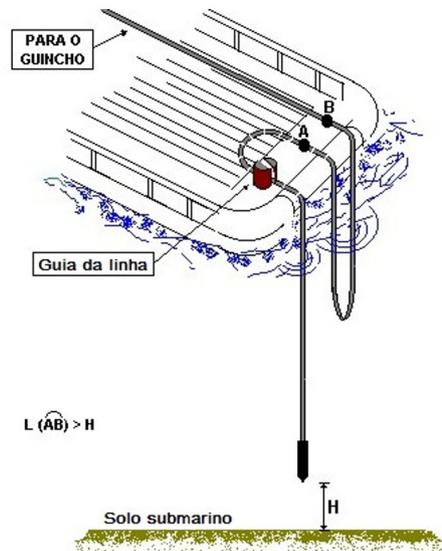


Figura 3. Estaca torpedo para ancoragem [3].

de solda e zona termicamente afetada (ZTA) produzidos por este processo, já que a melhoria da produtividade envolve a utilização de elevadas energias de soldagem, o que normalmente está associada à obtenção de valores mais baixos de tenacidade na junta soldada [8-12]. Neste contexto, a tenacidade aparece com grande importância nas soldagens aplicadas em equipamentos de amarração de plataformas para extração de petróleo em alto mar, pois uma baixa tenacidade sinaliza o caminho para ocorrência de uma fratura frágil com baixos níveis de tensão.

O presente trabalho tem por objetivo a análise de propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico, visando o aumento da produtividade na fabricação de tubulações para aplicação em equipamentos utilizados em acessórios de sistemas de ancoragem de plataformas de petróleo.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Como material base para a produção das juntas soldadas foram utilizadas chapas de aço de classificação ASTM A-572 Gr.50 [13] nas dimensões de 500 × 250 × 25,4 mm, cuja microestrutura composta de ferrita e perlita é mostrada na Figura 4. A Tabela 1 apresenta a composição química do material base utilizado. Como material de adição foi utilizado uma combinação arame + fluxo do tipo AWS 5.17 EM12K - F7A4 com arame sólido de 4,0 mm de diâmetro.

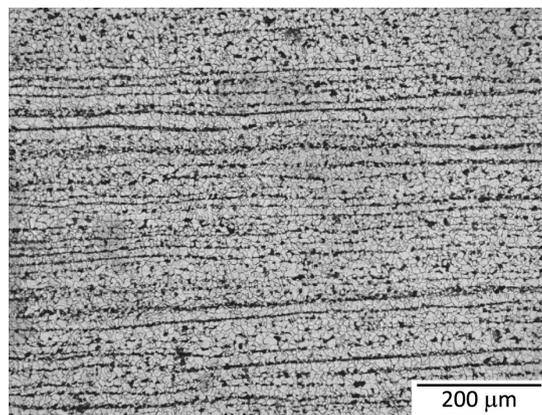


Figura 4. Microestrutura do metal base. Ataque: nital 2%.

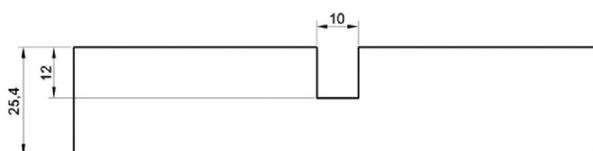
Tabela 1. Composição química do metal base utilizado.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ceq
% peso	0,13	0,24	1,29	0,020	0,008	0,007	0,012	0,007	0,028	0,003	0,381

2.2. Procedimento de soldagem

No sentido de ser possível a obtenção de juntas soldadas de passe único com o perfil de cordão de solda adequado para a remoção de corpos-de-prova de impacto Charpy-V com o entalhe posicionado integralmente no metal de solda, foram realizados testes preliminares que indicaram a utilização das características de geometria de chanfro mostradas na Figura 5.

As chapas foram preaquecidas à temperatura de 80°C e posteriormente foi realizada a soldagem em passe único, corrente contínua (CC+), stick-out de 45mm, na posição plana e com os parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 2.

**Figura 5.** Geometria da junta soldada.**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem utilizados.

Junta	Corrente (A)	Tensão (V)	vs (mm/min)	ES (kJ/mm)
A	850	34	120	14,3
B	850	34	150	11,7
C	850	34	180	9,7
D	750	31	120	11,7
E	750	31	150	9,4
F	750	31	180	7,8

Onde: vs – velocidade de soldagem; ES – Energia de soldagem.

2.3. Caracterização da junta soldada

Foram realizadas análises químicas dos metais de solda por espectrometria de emissão ótica.

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 1 kgf em corpos-de-prova transversais ao cordão de solda, sendo realizada uma varredura de dureza abrangendo o metal de solda, zona termicamente afetada (ZTA) e metal base em intervalos de 0,5 mm, para avaliação do comportamento das diferentes regiões da junta soldada, sendo considerada uma variação de 5% nos resultados dos ensaios para efeito de comparação.

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V à temperatura de 0°C, em corpos-de-prova normalizados conforme a norma ASTM A-370 [14] nas dimensões de 10 mm × 10 mm × 55 mm, retirados transversalmente ao cordão de solda e a 2 mm da superfície da junta, sendo realizados três ensaios para cada condição analisada, sendo obtida a média e desvio padrão destes resultados. O entalhe foi posicionado no plano da espessura e no centro do cordão de solda, conforme mostra a Figura 6.

Foram ainda realizados ensaios com o entalhe posicionado na linha de fusão para algumas condições selecionadas, de forma a avaliar o comportamento também do metal base quando submetido a elevadas energias de soldagem. Assim como no caso anterior, foram realizados três ensaios à temperatura de 0°C para cada condição analisada, em corpos-de-prova nas dimensões de 10 mm × 10 mm, retirados transversalmente ao cordão de solda e a 2 mm da superfície da junta (Figura 6).

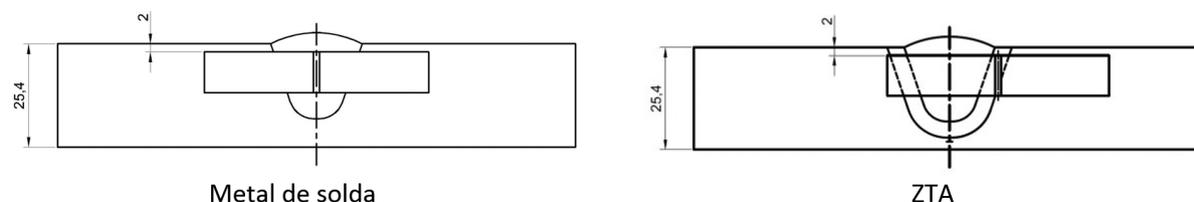


Figura 6. Posicionamento dos corpos-de-prova para ensaio de impacto.

Realizou-se a análise metalográfica das juntas soldadas, consistindo de macrografia, microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A preparação das amostras consistiu da técnica convencional de lixamento e polimento, seguido de ataque químico com reagente nital 2%. Foram avaliadas as microestruturas, tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada (ZTA), em uma posição correspondente à ponta do entalhe Charpy-V.

Foi ainda realizada análise quantitativa de constituintes microestruturais dos metais de solda por (MO) e de microfases por MEV. Utilizou-se a técnica da contagem por pontos em grade metalográfica com 100 pontos superposta à tela do microscópio, sendo contados, pelo menos, 10 campos escolhidos aleatoriamente para cada condição, perfazendo um total de 1.000 pontos por amostra.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise das propriedades

No presente trabalho realizou-se uma análise com enfoque na tenacidade, devido a reduzida variação da resistência mecânica com o aumento da energia de soldagem para metais de solda C-Mn [6,15].

A Tabela 3 mostra a composição química dos metais de solda, onde se percebe que não foram verificadas variações significativas nos elementos de liga mesmo com as diferenças verificadas na diluição com o metal base que variou de 47 a 69% (Figura 7), notadamente nos elementos C, Si e Mn, os quais podem ter seu teor reduzido por oxidação com o aumento da corrente de soldagem [16-18]. Adicionalmente, deve ser destacado que o teor de carbono é um pouco elevado, fato atribuído aos efeitos de diluição com o metal base e ainda que o teor de manganês apresenta resultados em torno de 1,40-1,50%, valor considerado adequado para metais de solda C-Mn [19,20].

Tabela 3. Análise química dos metais de solda.

Junta	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	V	Ceq
A	0,108	0,336	1,510	0,024	0,011	0,023	0,005	0,012	0,045	0,023	0,006	0,370
B	0,103	0,329	1,485	0,021	0,009	0,022	0,005	0,010	0,039	0,020	0,005	0,360
C	0,106	0,319	1,466	0,022	0,010	0,022	0,005	0,011	0,040	0,021	0,005	0,360
D	0,112	0,326	1,523	0,022	0,010	0,024	0,005	0,012	0,048	0,019	0,005	0,377
E	0,113	0,331	1,523	0,023	0,010	0,024	0,005	0,012	0,041	0,019	0,005	0,377
F	0,113	0,338	1,489	0,027	0,009	0,031	0,005	0,018	0,044	0,018	0,007	0,374

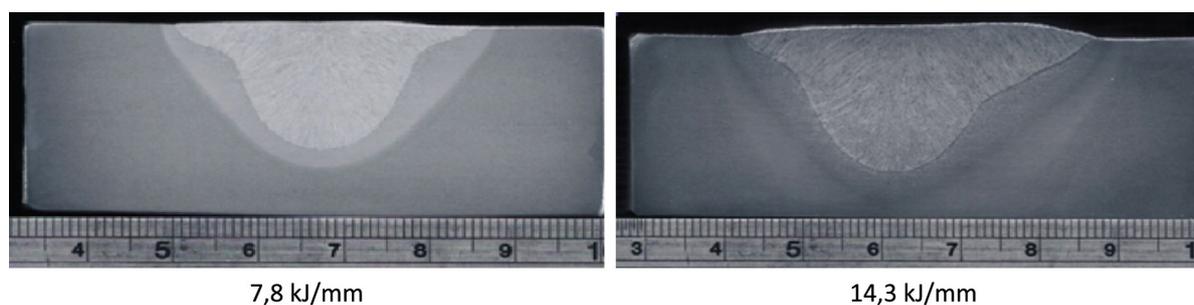


Figura 7. Macrografia das juntas soldadas. Ataque: nital 2%.

Estes resultados permitem inferir que a energia de soldagem será o fator de maior contribuição na formação da microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas.

A Figura 7 apresenta o aspecto macrográfico das juntas soldadas com a maior e menor energia de soldagem, onde se nota que foi possível produzir juntas isentas de defeitos o que permite a realização de ensaios de impacto Charpy-V nas regiões de interesse.

A Figura 8 mostra a variação microestrutural do metal de solda com o aumento da energia de soldagem, com o incremento de um metal de solda obtido com 4,8kJ/mm, o qual representa o procedimento de soldagem regularmente utilizado para soldagem de estruturas de ancoragem. Como esperado [11,16,21,22], a proporção de ferrita acicular apresenta patamares muito baixos para aportes térmicos elevados, sendo que esta diminuição da ferrita acicular é acompanhada de um aumento da ferrita primária e de agregados ferrita-carbonetos (AFC). Ainda, como esperado [10,11,23-26], verifica-se a ocorrência de estruturas mais grosseiras para maiores energias de soldagem (Figura 9). Um último aspecto importante, foi a verificação da baixa proporção de constituintes A-M (<3,0%) nestes metais de solda (Figura 10).

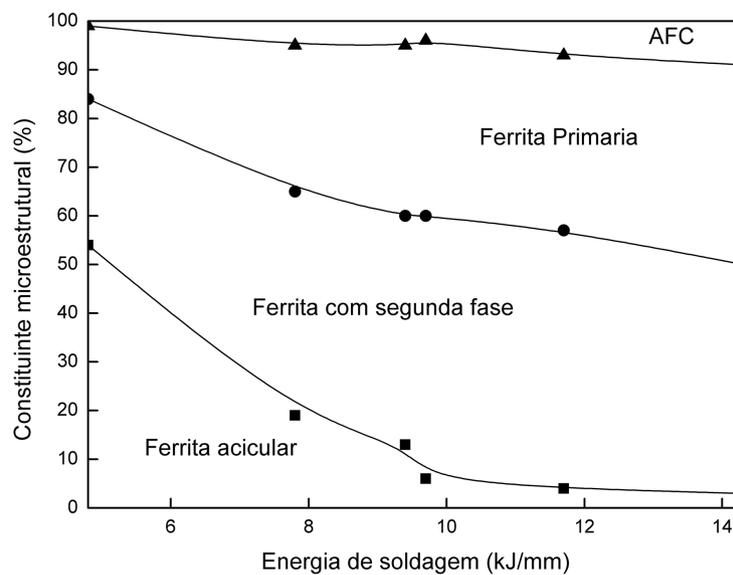


Figura 8. Efeito da energia de soldagem na microestrutura dos metais de solda.

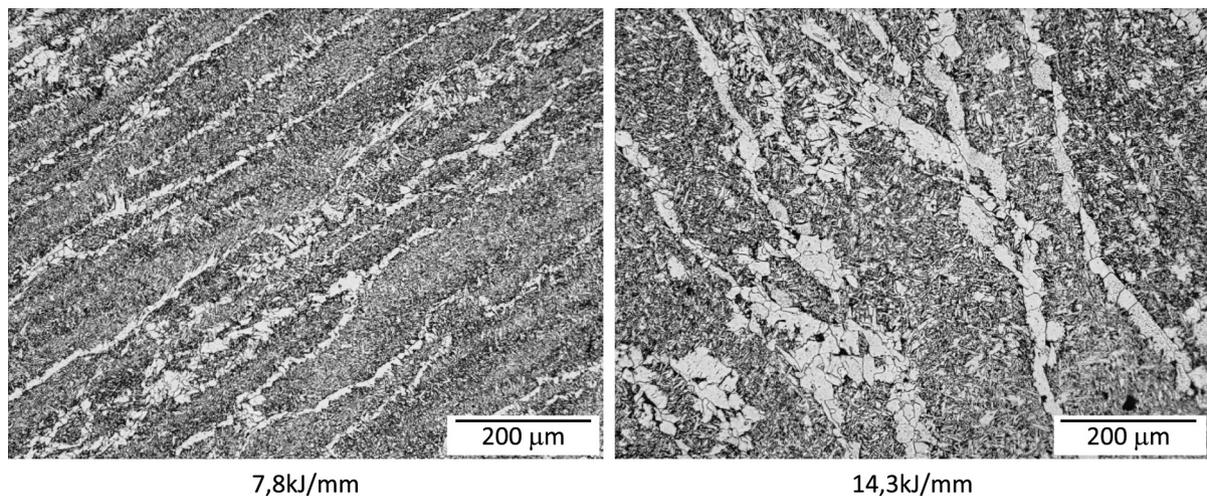


Figura 9. Microestrutura dos metais de solda (MO). Ataque: nital 2%.

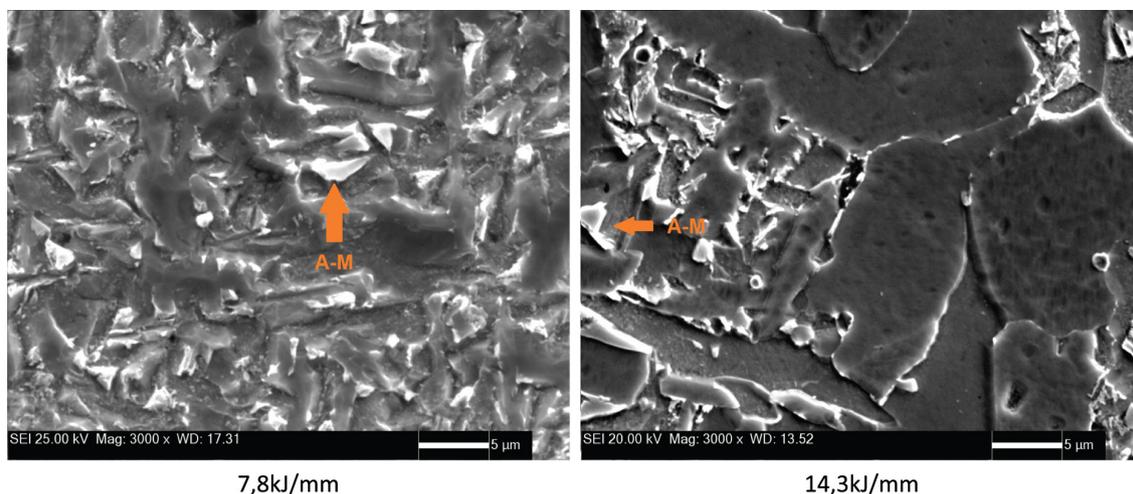


Figura 10. Ocorrência de constituintes A-M nos metais de solda. Ataque: nital 2%.

As Figuras 11 e 12 evidenciam que a ZTA apresentou comportamento similar ao metal de solda, com a ocorrência de microestrutura mais refinada para menores energias de soldagem. Além disso, nota-se na região de grãos grosseiros da ZTA (RGG) a substituição da microestrutura bainítica (FS) refinada por outra com maior proporção de constituintes de maior temperatura de transformação para maiores energias de soldagem. De fato, nota-se a ocorrência de ferrita de contorno de grão (FP) e perlita (P) nos contornos de grão da austenita prévia, ferrita de Widmanstätten intragranular (FN) e agregados ferrita-carbonetos (AFC) no interior dos grãos, constituintes normalmente observados na ZTA de aços carbono e de aços baixa liga [8], em substituição à bainita para maiores energias de soldagem (Figura 12). Nas outras regiões da ZTA, regiões de grãos finos (RGF), intercrítica (RIC) e sub-crítica (RSC), é de destaque o aumento da proporção de ferrita poligonal intragranular (FI), notadamente na última região.

Este mesmo comportamento foi verificado para os resultados dos ensaios de dureza (Figura 13), tanto para o metal de solda quanto para a ZTA. Nota-se que os maiores valores dureza ocorrem para a região de grãos grosseiros da ZTA (RGG) e uma tendência de queda desta propriedade para as outras posições da ZTA, o que está de acordo com a literatura [8,10,13,25]. Este comportamento pode ser atribuído à mudança microestrutural comentada previamente (Figura 11), devido ao aumento da ferrita poligonal nas regiões mais afastadas da linha de fusão.

A evolução microestrutural com destaque para a diminuição significativa da proporção de ferrita acicular (Figura 8) e ocorrência de estruturais mais grosseiras para maiores energias de soldagem (Figura 9), permite inferir sobre uma queda da tenacidade com o aumento da energia de soldagem [6,9,11,15,19,22,23,27]. Neste aspecto, a Figura 14 mostra uma diminuição significativa desta propriedade a partir de 4,8kJ/mm até 14,3 kJ/mm. No entanto, verifica-se ainda que em torno de 7,8 kJ/mm a redução é menos significativa com tendência à estabilização da tenacidade. Este comportamento permitiu a obtenção de resultados superiores aos mínimos exigidos [28,29] para a utilização destes metais de solda na soldagem de componentes de ancoragem de plataformas offshore, apesar da grande dispersão verificada nos resultados de impacto Charpy-V.

Estes resultados são de importância, já que o metal de solda é considerado a região da junta soldada que apresenta a maior preocupação, por apresentar valores de tenacidade inferiores ao metal de base [8,15,23,27].

No sentido de avaliar esta questão, já que o desempenho do componente depende do comportamento de todas as regiões desta junta soldada, foram realizados ensaios de impacto Charpy-V também na ZTA para algumas condições de análise. Os resultados deste experimento, mostrados na Figura 15, corroboram o acima exposto, já que os valores de energia absorvida da ZTA são superiores aos do metal de solda, o que presumivelmente está associado com a microestrutura formada. De fato, a literatura [8,23,30,31] registra que aços C-Mn e baixa liga apresentando constituintes microestruturais similares à do presente trabalho, podem apresentar resultados de tenacidade na ZTA superiores ao metal de solda, notadamente quando se utiliza energia de soldagem elevada, o que segundo Borba et al. [23], reforça a necessidade da escolha adequada do consumível de soldagem não apenas em função dos requisitos de projeto, mas também em relação ao metal base e ao procedimento de soldagem aplicado.

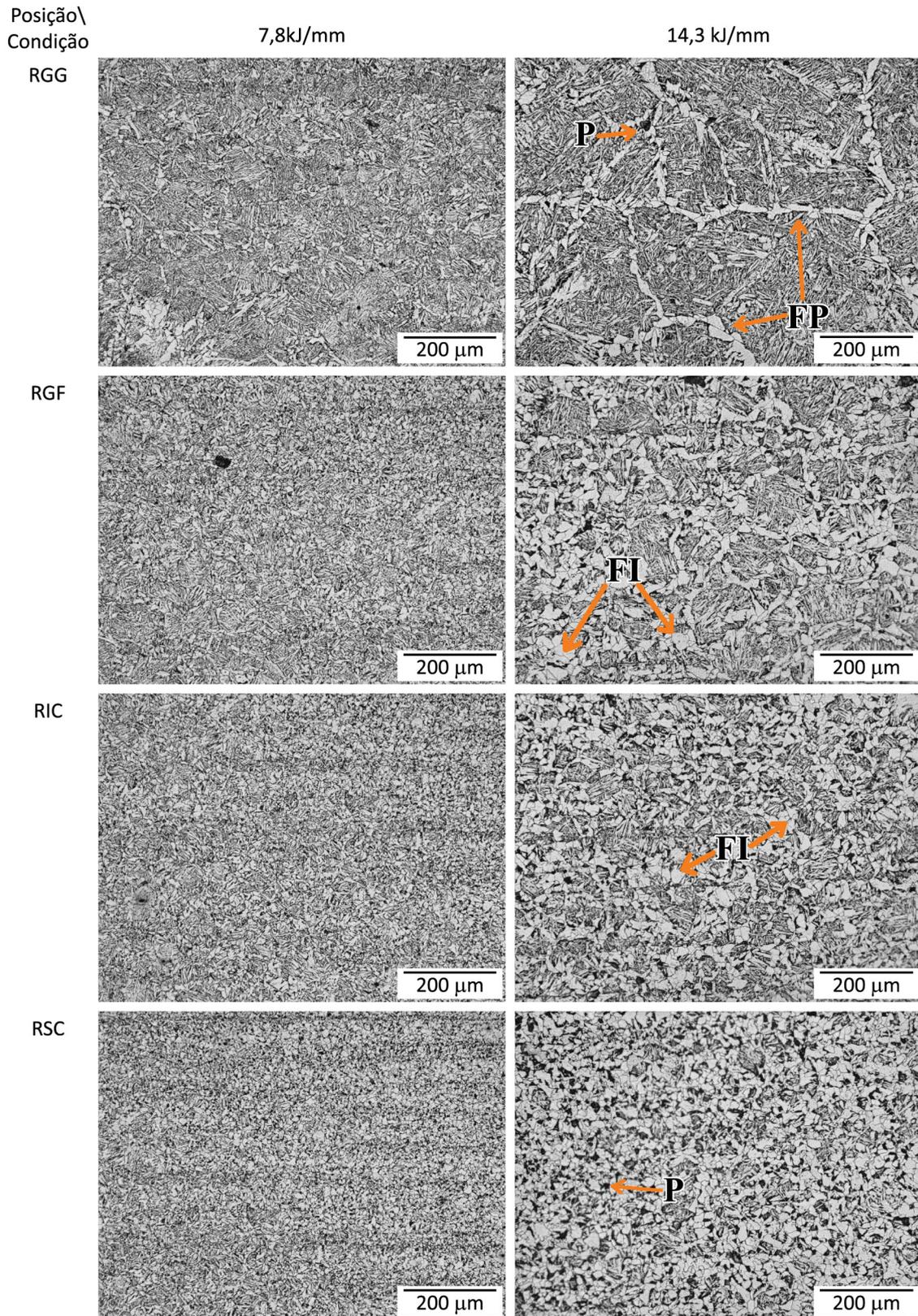


Figura 11. Microestruturas nas diferentes regiões da ZTA. Ataque: nital 2%. Onde: RGG – Região de grãos grosseiros; RGF – região de grãos finos; RIC – região intercrítica; RSC – região sub-crítica; FP – ferrita de contorno de grão; P – perlita; FI – ferrita poligonal intragranular.

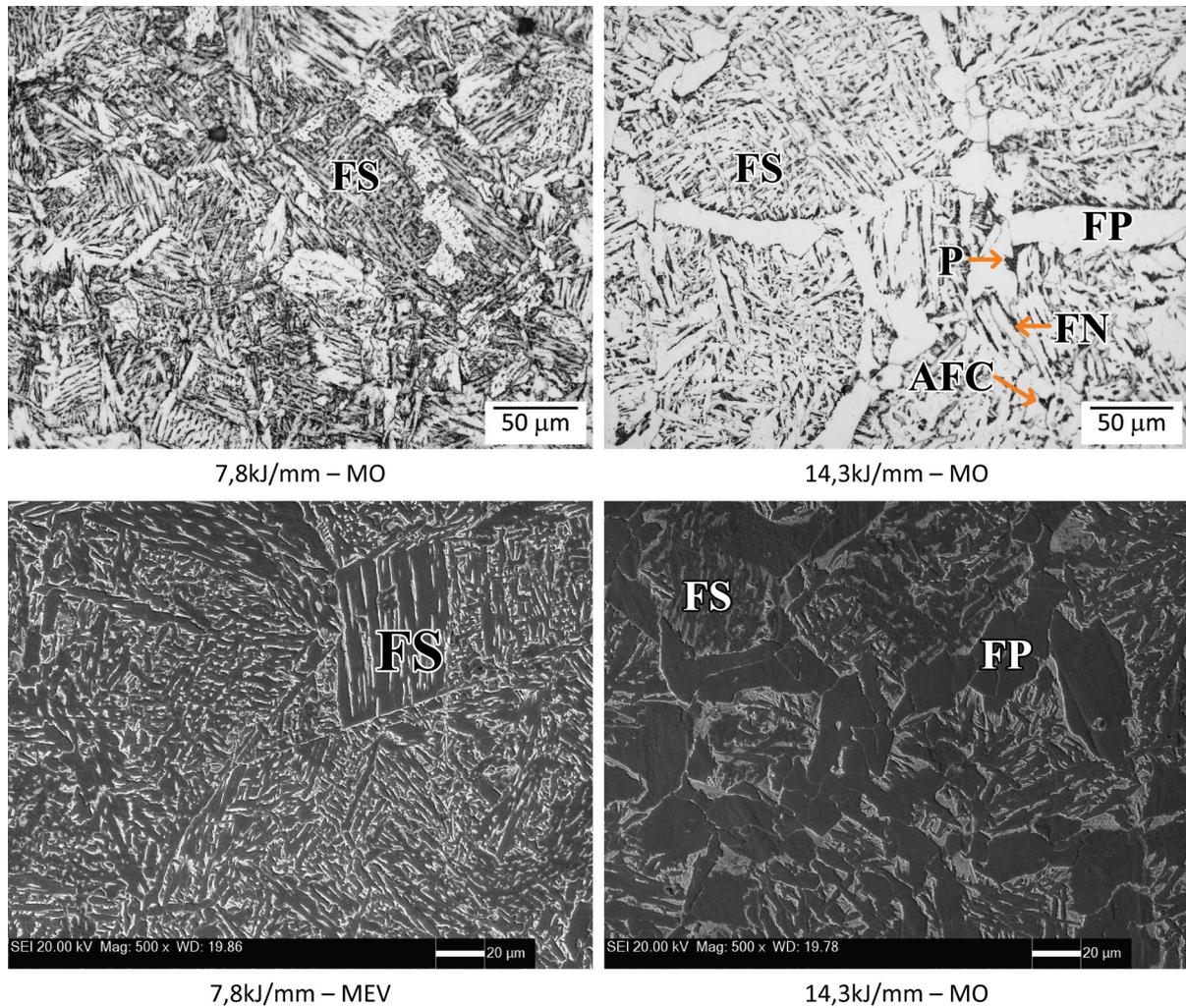


Figura 12. Microestruturas da região de grãos grosseiros da ZTA observadas por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) Ataque: nital 2%. Onde: FS – Bainita; FP – ferrita de contorno de grão; P – perlita; FN – ferrita de Widmanstatten intragranular; AFC – agregados ferrita-carbonetos.

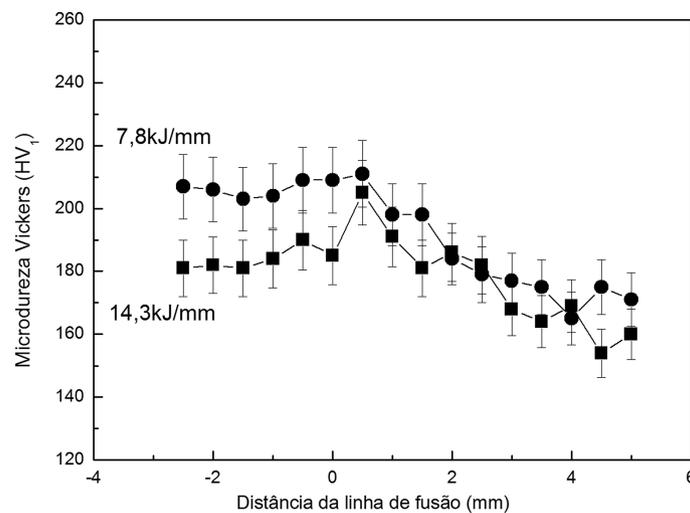


Figura 13. Efeito da energia de Soldagem na dureza da junta soldada.

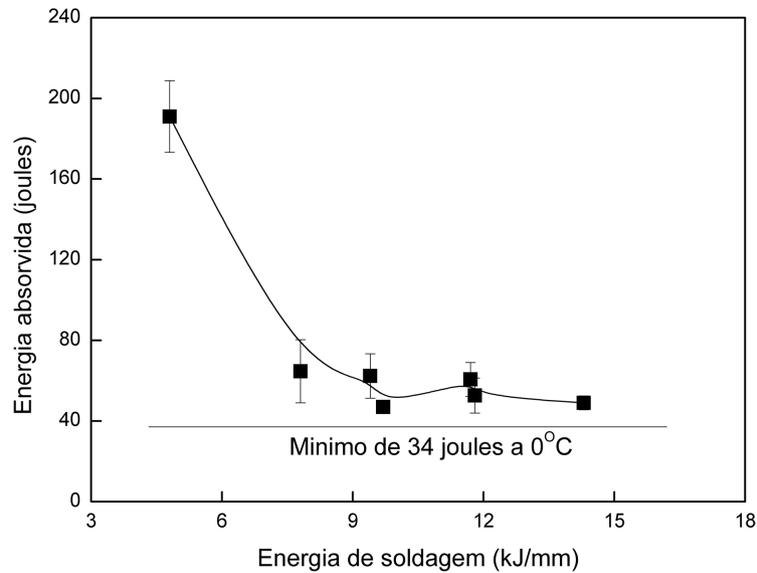


Figura 14. Efeito da energia de Soldagem na tenacidade ao impacto do metal de solda.

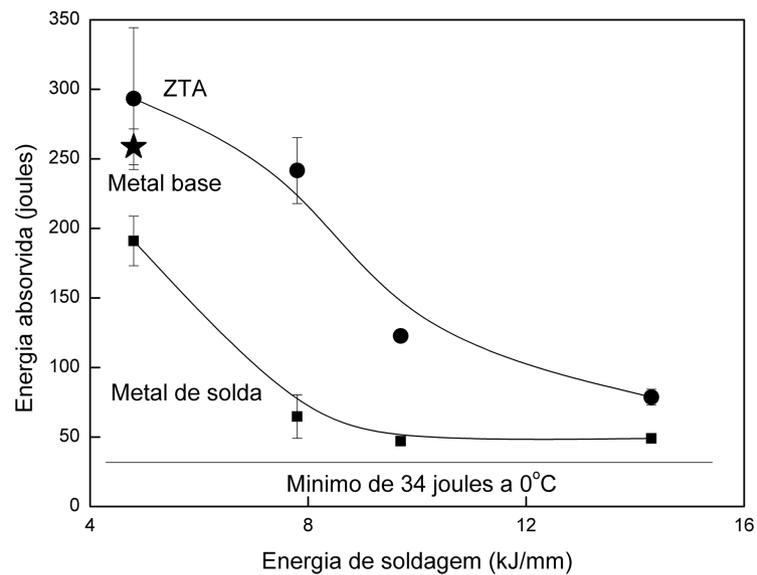


Figura 15. Variação da tenacidade ao impacto das regiões da junta soldada com a energia de soldagem.

3.2. Implicações práticas dos resultados

É importante comentar que apesar de existirem técnicas consolidadas para o aumento da taxa de deposição no processo arco submerso como, por exemplo, a técnica TANDEM e a adição de pó de ferro, o presente trabalho teve por objetivo realizar uma análise mais abrangente sobre a possibilidade de garantia de qualidade de estruturas soldadas pelo processo a arco submerso convencional com alta produtividade para fins industriais, em condições diferentes daquelas encontradas em uma produção seriada. Nesta situação, a constante necessidade de movimentação de mão-de-obra e mudança de layout para atendimento de fabricação e prestação de serviços de diversos itens com características próprias torna o investimento e treinamento em processos especiais inviável do ponto de vista econômico. Assim, a avaliação de propriedades mecânicas de juntas soldadas com elevadas energias de soldagem pelo processo a arco submerso convencional ainda carece de mais evidências experimentais, considerando que a literatura disponível para estas condições está relacionada à utilização do processo TANDEM [11,23,31,32].

Neste sentido, realizou-se juntamente com uma análise de produtividade, um estudo metalúrgico da relação tenacidade-microestrutura de metal de solda de elevada energia de soldagem (até 14kJ/mm), de forma a dar suporte técnico para conclusões efetivas sobre a adoção de procedimentos de soldagem confiáveis, com base em resultados de ensaios de impacto Charpy-V, além dos exigidos por normas de qualificação. Neste aspecto há de se considerar que o metal de solda continua a ser a região de maior preocupação, visto que, como comentado por Zhang et al. [33], as mudanças nas tecnologias de fabricação e laminação dos aços tem gerado um desafio adicional para os consumíveis de soldagem e para a tecnologia de união.

Os resultados de tenacidade ao impacto obtidos permitiram a adoção de um novo procedimento aprovado, com ganho expressivo de produtividade. Adicionalmente, mostra que ainda existe um campo de investigação na área industrial para metais de solda C-Mn baixa liga, onde a produtividade e a automação de processos são pontos fundamentais.

Como já comentado em trabalho anterior [6], onde se avaliou procedimento similar para a soldagem de aço ASTM A 36, foi possível obter uma melhora significativa da produtividade, da ordem de 58%. Adicionalmente, é importante destacar que a alteração do procedimento de soldagem manual para totalmente mecanizada, propiciou vantagens indiretas pelo fato de não haver o risco de erro humano ou mesmo falta de mão-de-obra especializada para a soldagem da raiz das juntas, ponto crítico para ocorrência de defeitos, o que permite um planejamento de produção mais eficaz. Finalmente, associa-se o fato de não haver necessidade de paradas na soldagem da tubulação para troca de processo, o que facilita sobremaneira a especificação de um layout otimizado nas instalações industriais.

Todas estas questões também foram verificadas no presente caso, tendo sido possível a alteração de um procedimento anterior com soldagem manual por arame tubular nos passes de raiz para a soldagem integral pelo processo a arco submerso, com uma melhoria da produtividade assegurada em torno de 50%.

4. Conclusões

Pelo exposto no presente trabalho, permite-se concluir:

- a) É possível realizar a soldagem de equipamentos de ancoragem de plataformas de petróleo em aço carbono, que tenham requisitos adicionais de qualidade, com aporte térmico até 14 kJ/mm;
- b) O metal de solda foi a região da junta soldada que apresentou a menor tenacidade, devendo ser uma preocupação o desenvolvimento de consumíveis para esta aplicação;
- c) O aumento do aporte térmico e alteração do processo de soldagem permitiram ganhos significativos de produtividade, reduzindo o tempo de fabricação de estruturas de ancoragem em 50%.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fluke Engenharia Ltda. e ao CEFET/RJ pelo suporte na execução do presente trabalho.

Referências

- [1] Gonçalves RCF, Costa LCS. Inspeção em linhas de ancoragem de unidades de produção. In: Anais do 21º Congresso Nacional de Ensaios não Destrutivos; 2002 Ago 19-22; Salvador, Brasil. Salvador: Abendi; 2002. p. 1-9.
- [2] Paiva AMC. Integridade de sistemas de ancoragem: contribuições às metodologias de análise [dissertação de mestrado]. Rio de Janeiro: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca; 2000.
- [3] Costa LCS, Castro GAV, Gonçalves RCF, Araújo RT. Polyester mooring systems – Petrobras Experience. In: Proceedings of the Deep Offshore Technology Conference; 2001 Set 17-21; Rio de Janeiro, Brasil. Rio de Janeiro: PennWell Corporation; 2001. p. 1-17.
- [4] Ozmutlu S. The use of drag embedment anchors in offshore applications. In: Proceedings of the International Conference on Offshore Renewable Energy; 2012 May 10-12; Porto, Portugal. Porto: Vryhof Anchors BV; 2012. p. 1-42.
- [5] Aderinola OO, Kah P, Martikainen J. Efficient welding technologies applicable to HSS arctic offshore structures. In: Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Anchorage; 2013 June 30-July 5; Alaska, EUA. Alaska: ISOPE; 2013. p. 257-264.
- [6] Marouco ES, Diniz JLC, Santos OR Fo, Souza LFG, Jorge JCF. Estudo do aporte térmico nas propriedades mecânicas de metais de solda de aço C-Mn obtidos pelo processo arco submerso. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2013;10(2):128-137.

- [7] Park JS, Jung B, Lee JB. Effect of high heat input on CTOD property of the thick steel plate for offshore engineering. POSCO Technical Report. 2007;10(1):46-49.
- [8] Turani LO, Borba TMD, Santos CC. Soldabilidade de Aços Navais TMCP e Ganhos de Produtividade na Indústria Naval – Estudo de Caso do Aço Sincron da Usiminas. In: Anais do 39º Congresso Brasileiro de Soldagem; 2013 Nov 25-28; Curitiba, Brasil. Curitiba: Associação Brasileira de Soldagem; 2013, p. 1-9.
- [9] Popovic O, Prokic-Cvetkovic R, Burzic M, Milutinovic Z. The effect of heat input on the weld metal toughness of surface welded joint. In: Proceedings of the 14th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology; 2010 Sept 11-18; Mediterranean Cruise. Mediterranean Cruise: TMT; 2010. p. 61-64.
- [10] Prasad K, Dwivedi DK. Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;36(5-6):475-483. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0855-1>.
- [11] Viano DM, Ahmed NU, Schumann GO. Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments. Science and Technology of Welding and Joining. 2000;5(1):26-34. <http://dx.doi.org/10.1179/stw.2000.5.1.26>.
- [12] Xu WW, Wang QF, Pan T, Su H, Yang CF. Effect of welding heat input on simulated HAZ microstructure and toughness of a V-N microalloyed steel. Journal of Iron and Steel Research, International. 2007;14(5 Supl 1):234-239.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM A-572/A 572M-04: standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel. West Conshohocken: ASTM International; 2004.
- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM A-370-05: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM International; 2005.
- [15] Xu L, Zhang J, Chen Y. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of 07MnCrMoVR weld joints. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2011;24(2):1-17.
- [16] Evans GM. Effect of heat input on the microstructure and properties of C - Mn all weld metal deposits. Welding Research Abroad. 1982;29(1):46-57.
- [17] Jorge JCF, Souza LFG, Santos OR Fo, Santos AMF Fo, Bott IS. Influência da composição química e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades mecânicas e microestruturais de metais de solda de alta resistência. In: Anais do 33º Congresso Brasileiro de Soldagem; 2007 Ago 27-30; Caxias do Sul, Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem; 2007. p. 1-8.
- [18] Surian ES, Rissone NM, Svoboda HG, Vedia LA. SMAW, FCAW and SAW high-strength ferritic deposits: the challenge is tensile properties. Welding Journal. 2010;8(3):54s-64s.
- [19] Evans GM. Effect of manganese on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits. Welding Research Abroad. 1983;29(1):2-12.
- [20] Zhang Z, Farrar RA. Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. Welding Journal. 1997;76(5):183s-196s.
- [21] Popovic O, Lukic U, Prokic-Cvetkovic R, Burzic M, Jovicic R. The effect of heat input on the content of acicular ferrite in weld metal of microalloyed steel. In: Proceedings of the 18th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”; 2014 Sept 10-12; Budapest, Hungary. Budapest: TMM; 2014. p. 61-64.
- [22] Jorge JCF, Souza LFG, Rebello JMA. Effect of dilution, heat input and stress relieving on the microstructure/ toughness relationship of C-Mn and low alloy steel weld metals. Revue de la Soudure. 1996;52(3):42-50.
- [23] Borba TMD, Flores WD, Turani LO, Cardoso R Jr. Avaliação da soldabilidade do aço naval EH36 TMCP soldado por arco submerso com elevado aporte de calor. Soldagem & Inspeção. 2015;20(1):92-104. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2001.10>.
- [24] Amanie J. Effect of submerged arc welding parameters on the microstructure of SA516 and A709 steel welds [tese de doutorado]. Saskatchewan: University of Saskatchewan; 2011.
- [25] Jaiswal D. Analysing the effect of parameters in multipass submerged arc welding process. International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering. 2013;2(2):60-70.
- [26] Rahul A, Arya HK, Saxena RK. Effect of cooling rate on microstructure of SAW welded mild steel plate (Grade C 25 as Per IS 1570). International Journal of Modern Engineering Research. 2014;4(1):222-228.
- [27] Masao Y, Masayuki H, Shinichi S. Steel plates with excellent HAZ toughness for offshore structures. JFE Technical Report. 2013;(18):43-49.
- [28] American Bureau of Shipping. Rules for materials and welding - Part 2: aluminum and fiber reinforced plastics. Houston: ABS; 2013.
- [29] Det Norske Veritas. DNV-OS-B101: offshore standard, metallic materials. Norway: DNV; 2009.
- [30] Sun W, Wang G, Zhang J, Xia D, Sun H. Microstructure characterization of high-heat-input welding joint of HSLA steel plate for oil storage construction. Journal of Materials Science and Technology. 2009;25(6):857-860.
- [31] Godoy JM, Cavalheiro BCC, Salani M. Tenacidade na junta soldada de aços API-DNV fabricados por laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. In: Anais da 6ª Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção – EXPOSOL 006-08; 2008 Set 24-26; Rio de Janeiro, Brasil. Rio de Janeiro: CTS–SENAI-RJ; 2008. p. 1-20.
- [32] Lima CAS. Influência do tratamento térmico de alívio de tensões associado à elevada energia de soldagem na tenacidade da zona termicamente afetada de um aço TMCP microligado aplicado em estruturas offshore [dissertação de mestrado]. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista; 2011.
- [33] Zhang T, Li Z, Young F, Kim HJ, Li H, Jing H, et al. Global progress on welding consumables for HSLA steel. ISIJ International. 2014;54(7):1472-1484. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.54.1472>.