

ESTUDO DO APORTE TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE METAIS DE SOLDA DE AÇO C-Mn OBTIDOS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO

Erick de Sousa Marouço ¹
Jorge Luiz Coutinho Diniz ²
Olavo Ribeiro dos Santos Filho ³
Luís Felipe Guimarães de Souza ⁴
Jorge Carlos Ferreira Jorge ⁵

Resumo

O presente trabalho faz parte de um programa de pesquisas que tem por objetivo a avaliação da viabilidade técnica do aumento de produtividade na fabricação de componentes tubulares utilizados no segmento *offshore*, soldados integralmente pelo processo a arco submerso automatizado com elevado aporte térmico, sem prejuízo da tenacidade ao impacto do metal de solda. Foram soldadas juntas multipasse, pelo processo a arco submerso com combinação de arame/fluxo do tipo F7A4-EM12K com arame de 3,2 mm de diâmetro, com preaquecimento de 80°C, corrente contínua, posição plana e aporte térmico variando de 3,5 kJ/mm até 12 kJ/mm. Após a soldagem, realizaram-se ensaios de tração, impacto Charpy-V às temperaturas de -60°C, -40°C, -20°C, 0°C e 20°C e metalográficos pelas técnicas de microscopia óptica (MO) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em corpos-de-prova retirados integralmente do metal depositado, objetivando a avaliação da relação tenacidade/microestrutura. Foi verificado que os metais de solda obtidos mostraram níveis de tenacidade superiores aos mínimos requeridos para a utilização na soldagem de aços C-Mn baixa liga com requisitos de tenacidade ao impacto de 27 J a 0°C, para aportes térmicos até 12 kJ/mm. Desta forma é possível um aumento de produtividade de 58% nos tempos efetivos de fabricação.

Palavras-chave: Metal de solda; Tenacidade; Processo arco submerso; Produtividade.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE HEAT INPUT ON MECHANICAL PROPERTIES OF C-Mn STEEL WELD METALS OBTAINED BY SUBMERGED ARC PROCESS

Abstract

The present work is part of a research program that aims to evaluate the technical feasibility of increasing productivity in the manufacturing of tubular components for offshore oil industry, which are fully welded by automatic submerged arc welding process, with high heat input, but with no impairment on the impact toughness of the weld metal. Multipass welds were produced by the submerged arc welding process, with a combination of F7A4-EM12K (wire/flux), by using a 3.2 mm-diameter wire, preheating at 80°C, with direct current, in flat position, with heat input varying from 3.5 kJ/mm to 12 kJ/mm. After welding, tensile tests and Charpy-V impact tests at -60°C, -40°C, -20°C, 0°C and 20°C were carried out, as well as metallographic examination by both optical (OM) and scanning electron microscopy (SEM), of specimens obtained entirely from the weld metal, allowing the discussion over the toughness X microstructure relationship. The weld metals have shown higher toughness levels in relation to the minimum required for use with low-alloy C-Mn steels welding with requirements of impact toughness of 27 J at 0°C for heat input up to 12 kJ/mm allowing an increase in productivity of 58% on the effective manufacturing time.

Key words: Weld metal; Toughness; Submerged arc process; Productivity.

¹Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, Bloco E, 5º andar, Cep 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: emarouco@gmail.com

²Engenheiro Mecânico, MSc. Gerente de Engenharia, Fluke Engenharia Ltda, Av. Rio Branco, 135, 11º andar, Cep 20040-006, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: jorge.diniz@flukeengenharia.com.br

³Engenheiro Mecânico, MSc. Gerente de Unidade de Produtos, Fluke Engenharia Ltda, Av. Rio Branco, 135, 11º andar, Cep 20040-006, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: olavo.ribeiro@flukeengenharia.com.br

⁴Engenheiro Metalurgista, DSc. Professor Associado, CEFET/RJ, PPEMM, Rio de Janeiro, RJ. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, Bloco E, 5º andar, Cep 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: lfgs59@gmail.com

⁵Engenheiro Metalurgista, DSc. Professor Associado, CEFET/RJ, PPEMM, Rio de Janeiro, RJ. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, Bloco E, 5º andar, Cep 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: jorgecfcjorge@gmail.com

I INTRODUÇÃO

A necessidade do desenvolvimento tecnológico para processos de fabricação e de recuperação por soldagem em componentes naval e *offshore*, notadamente, aqueles submetidos a condições de serviço severas, como os sistemas de ancoragem de unidades de exploração e produção de petróleo, motiva a ampliação de pesquisas que venham trazer fundamentos técnico-científicos consistentes para esses processos.

A demanda da utilização de processos de soldagem em equipamentos de amarração de plataformas, atendendo aos requisitos técnicos de resistência e tenacidade, aliada à produtividade, questiona o estabelecimento do processo que pode oferecer a melhor combinação, exigindo uma análise dos benefícios e limitações trazidas pelas peculiaridades de cada um. Em se tratando do aspecto da produtividade dos processos de soldagem, os fundamentos que justificam a maior produtividade da soldagem realizada pelo processo ao arco submerso em relação a outros processos, estão associados a uma melhor eficiência e taxa de deposição, somadas a um alto ciclo de trabalho. Tais características estão em constante evolução, por meio de novas formulações de arames e fluxos, assim como da possibilidade da realização de soldagens completamente mecanizadas, evitando-se as limitações hoje impostas pelo problema sério de mão-de-obra especializada disponível no mercado *offshore* nacional.

Entretanto, a vantagem do processo ao arco submerso, sob o ponto de vista produtivo, requer o complemento com ponderações que envolvem as propriedades mecânicas dos metais de solda produzidos por este processo. 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.

Embora a literatura registre estudos⁽¹⁻⁷⁾ evidenciando que metais de solda produzidos em soldagens com elevado aporte térmico exibem uma tendência para redução da tenacidade ao impacto, Prasad e Dwivedi⁽⁷⁾ comentam que existem poucos estudos recentes abordando a influência de elevados aportes térmicos no comportamento de juntas soldadas realizadas pelo processo a arco submerso. Destacam apenas o trabalho de Viano, Ahmed e Schmann,⁽⁶⁾ que produziram juntas com aportes térmicos até 10 kJ/mm. Isto impõe limitações em suas aplicações, devendo ser objeto de análises mais detalhadas. O presente trabalho tem por objetivo a análise comparativa dos resultados obtidos em metais de solda produzidos por arco submerso com elevado aporte térmico, visando o aumento da produtividade nos processos de soldagem de tubulações para aplicação em equipamentos utilizados em acessórios de sistemas de ancoragem de plataformas de petróleo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Material de base

As juntas soldadas foram produzidas utilizando-se como material de base chapas de aço de classificação ASTM A-36 nas dimensões de 500 mm × 300 mm × 38 mm. Como o objetivo deste trabalho é estudar o metal de solda produzido com elevado aporte térmico, o aço ASTM A-36, usado como base, tem como finalidade somente atuar como suporte para deposição do metal de solda.

2.1.2 Material de adição

Como material de adição e objeto de estudo foi utilizada uma combinação arame/fluxo do tipo F7A4-EM12K com arame sólido de 3,2 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química do metal depositado, após análise química realizada no cordão produzido pela soldagem com 12 kJ/mm.

2.2 Procedimento de Soldagem

As juntas foram preparadas a partir das chapas conforme discutido no item 2.1.1, objetivando simular a soldagem em posição interna e externa em tubos. A Figura 1 apresenta as dimensões e características da geometria do chanfro utilizado.

As chapas foram preaquecidas à temperatura de 80°C e, posteriormente, foi realizada a soldagem, na posição plana. Os parâmetros de soldagem empregados são apresentados na Tabela 2.

Para efeito de comparação de resultados, foram ainda soldadas as juntas:

- Soldagem passe único com 12 kJ/mm de forma a obter um metal de solda constituído integralmente por região colunar para esse aporte térmico;
- Soldagem passe único com 6 kJ/mm de forma a obter um metal de solda constituído integralmente por região colunar para esse aporte térmico; e
- Soldagem multipasse com 3,5 kJ/mm de forma a realizar uma análise comparativa com o procedimento utilizado atualmente, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Composição química do metal depositado da soldagem com 12 kJ/mm

Elemento	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	V
% peso	0,085	0,37	0,18	0,01	1,57	0,01	0,03	<0,01

O processo de soldagem multipasse constituiu-se como o procedimento utilizado anteriormente na fabricação de equipamentos de ancoragem de navios e plataformas. Nesse procedimento, o passe de raiz foi realizado através de soldagem por arame tubular e o preenchimento posterior com arco submerso. O arame utilizado foi do tipo E71T-1, com 1,20 mm de diâmetro e utilizando gás de proteção 100% de CO₂. Para enchimento com arco submerso utilizou-se o mesmo metal de adição descrito no item 2.1.2.

2.3 Ensaios Mecânicos e Metalográficos

Foram retirados corpos-de-prova longitudinais e transversais ao cordão de solda, para ensaios de tração, impacto Charpy-V e metalográficos. Os ensaios de tração foram executados à temperatura ambiente, em corpos-de-prova retirados longitudinalmente ao cordão de solda, sendo realizados dois testes para cada condição e calculada a média aritmética dos valores. Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V às temperaturas de -60°C, -40°C, -20°C, 0°C e 20°C, em corpos-de-prova normalizados (10 × 10 × 55 mm) e retirados transversalmente ao cordão de solda, a 2 mm da superfície da junta. O entalhe foi posicionado no plano da espessura e no centro

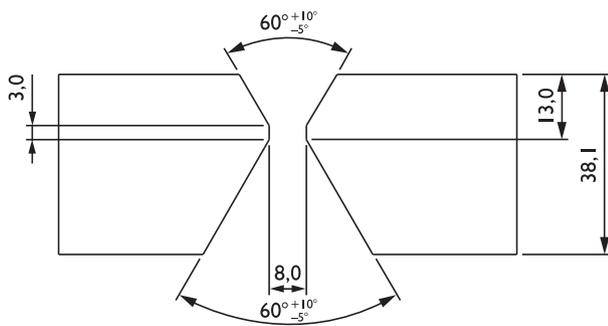


Figura 1. Detalhes da geometria da junta utilizada.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados

Passe	Posição	Corrente (A)	Tensão (V)	AT (kJ/mm)(*)
1	Interno	730-750	35	12
2	Externo	730-750	35	12
3	Externo	730-750	35	6
4	Externo	730-750	35	6

(*)AT – Aporte Térmico (considerando a eficiência do processo igual a 1).

Tabela 3. Parâmetros da soldagem multipasse

Processo	Número de passes	Corrente (A)	Tensão (V)	AT (kJ/mm)
Arame tubular	1-3	292-308	32-36	2,6
Arco submerso	4-26	492-499	37-40	3,5

(*)AT – Aporte Térmico (considerando a eficiência do processo arame tubular igual 0,9 e arco submerso igual 1).

do metal de solda. Para cada nível de temperatura foram realizados cinco testes, excluídos o maior e o menor resultado e calculou-se a média aritmética dos três valores restantes. Realizou-se a análise metalográfica dos metais de solda, 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 nas regiões colunares, quanto nas regiões reaquecidas dos metais de solda, sendo que as regiões analisadas corresponderam à área do entalhe Charpy-V. Realizou-se, ainda, análise quantitativa do percentual das regiões colunar e reaquecida na ponta do entalhe Charpy-V, de forma a verificar a influência do reaquecimento dos passes posteriores na tenacidade ao impacto em soldagens multipasse.

Foi ainda realizada análise quantitativa do percentual do constituinte ferrita acicular na região colunar dos metais de solda, devido a sua importância para a obtenção de uma boa tenacidade ao impacto em metais de solda de aço C-Mn.^(1,2,8-12) Para contagem do percentual de ferrita acicular, utilizou-se a técnica da contagem por pontos em grade metalográfica com 100 pontos. Foram contados 10 campos para cada condição, escolhidos aleatoriamente, perfazendo um total de 1.000 pontos por amostra.

2.4 Análise de Produtividade

A análise de produtividade constituiu-se como uma grande preocupação durante a aprovação de procedimentos de soldagem, em virtude da necessidade de aumento de produção com a diminuição dos tempos de soldagem, com a garantia da manutenção da qualidade. Para a realização dessa análise foram levados em consideração a taxa de deposição, a quantidade de passes, a alteração da geometria do chanfro e os processos de fabricação e de inspeção dos equipamentos de ancoragem. Para o cálculo da taxa de deposição foram levados em consideração o diâmetro do arame e a velocidade de alimentação do arame, obtendo-se a massa do material depositada em horas.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Metalográfica

A Figura 2 apresenta o aspecto macrográfico da junta obtida integralmente pelo processo arco submerso, estando indicada a sequência de deposição. A Figura 3 apresenta o aspecto macrográfico da junta soldada com aporte térmico de 3,5 kJ/mm.

O efeito do reaquecimento dos passes subsequentes nas juntas soldadas é avaliado a partir da Tabela 4, que apresenta a quantificação dos percentuais de região colunar e reaquecida à frente do entalhe nos corpos-de-prova de ensaio de impacto Charpy-V obtidos.

As Figuras 4 e 5 apresentam o aspecto microestrutural dos metais de solda para as regiões colunar e reaquecida da junta soldada da Figura 2, passe interno e externo, respectivamente. A Figura 6 apresenta o aspecto microestrutural da junta soldada mostrada na Figura 3, quando observadas pela técnica de microscopia óptica (MO).

As Figuras 7 e 8 apresentam o aspecto da ferrita acicular e dos microconstituintes, respectivamente, na região colunar dos metais de solda, quando observados pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 9 mostra a variação do percentual de ferrita acicular com o aumento do aporte térmico.

3.2 Ensaios Mecânicos

3.2.1 Ensaio de tração

A Tabela 5 apresenta o resultado do ensaio de tração para os metais de solda, na condição de como soldado.

3.2.2 Ensaio de impacto Charpy-V

A Tabela 6 e a Figura 10 apresentam os resultados dos ensaios de impacto Charpy-V realizados nos metais de solda.

4 DISCUSSÃO

4.1 Análise Metalográfica

A Tabela 4 apresenta os percentuais das regiões colunar e reaquecida na ponta do entalhe do corpo-de-prova de impacto Charpy-V para os passes interno e externo. Pode-se notar que o passe interno apresenta maior percentual de região colunar em relação ao passe externo.

Na análise das regiões do metal de solda pela técnica de microscopia óptica deve-se destacar que a microestrutura da região colunar do passe externo (Figura 5), além de possuir uma estrutura mais refinada que aquela produzida pelo passe interno (Figura 4), apresenta o constituinte ferrita acicular em maior percentual (Figura 9). Isso caracterizaria uma expectativa de ocorrência de valores de tenacidade muito superiores ao do passe interno devido à reconhecida capacidade desse constituinte em contribuir para a melhoria da tenacidade ao impacto do metal de solda,⁽⁸⁻¹⁶⁾ notadamente devido ao seu pequeno tamanho de grão e aos contornos de alto ângulo que consomem mais energia na propagação de trinca antes da fratura.^(11,12)

De fato, segundo Zhang et al.,⁽¹¹⁾ o desempenho do metal de solda depende de sua microestrutura, a qual é influenciada pela composição química e parâmetros de soldagem. Com o objetivo de obter juntas soldadas de aços baixa liga com propriedades mecânicas satisfatórias, é necessário conseguir um metal de solda com elevada proporção de ferrita acicular, constituinte microestrutural que apresenta contornos de alto ângulo e alta densidade de discordâncias, o que dificulta a propagação de trincas, fazendo com que a ferrita acicular no metal de solda permita a obtenção da combinação ótima de resistência e tenacidade ao impacto, concordando com as afirmações de Qinglei et al.⁽¹²⁾ No entanto, observa-se que tal fato

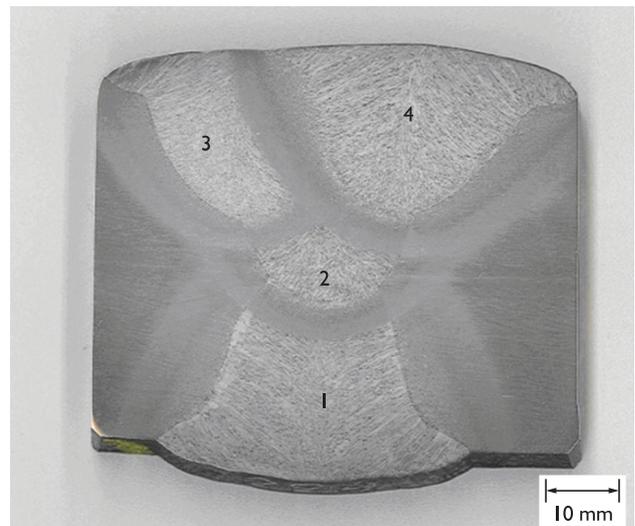


Figura 2. Aspecto macrográfico da junta soldada integralmente pelo processo arco submerso.



Figura 3. Aspecto macrográfico da junta soldada com aporte térmico de 3,5 kJ/mm. Processos de arame tubular e de arco submerso.

Tabela 4. Quantificação do percentual de reaquecimento a frente do entalhe Charpy-V

Posição	% região colunar	% região reaquecida
Interno (1)	70	30
Externo (4)	60	40
Multipasse	42	58

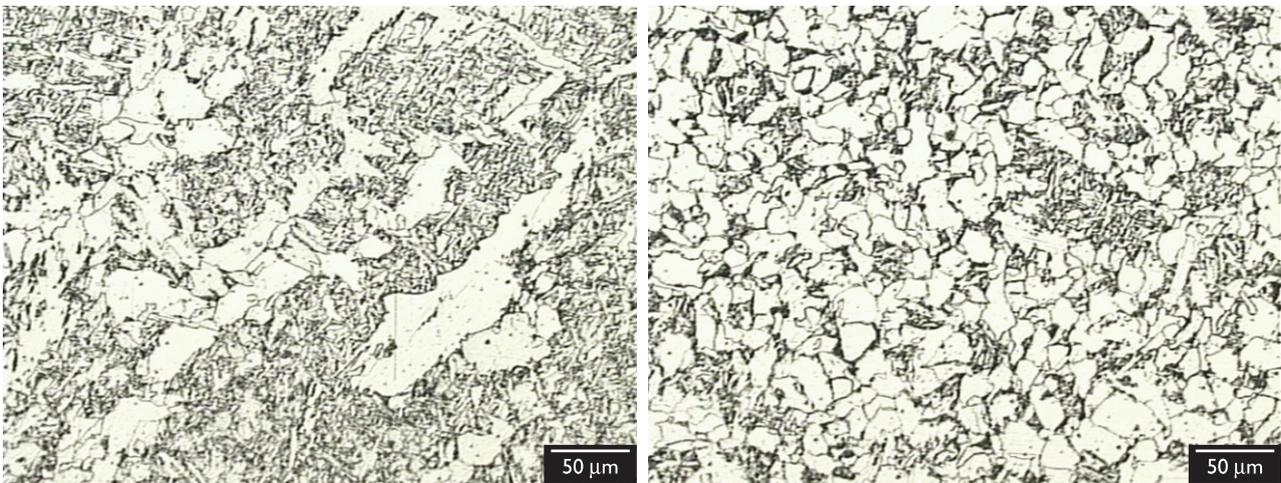


Figura 4. Microestruturas do passe interno (1) (12 kJ/mm) (MO). Ataque: Nital 2%.

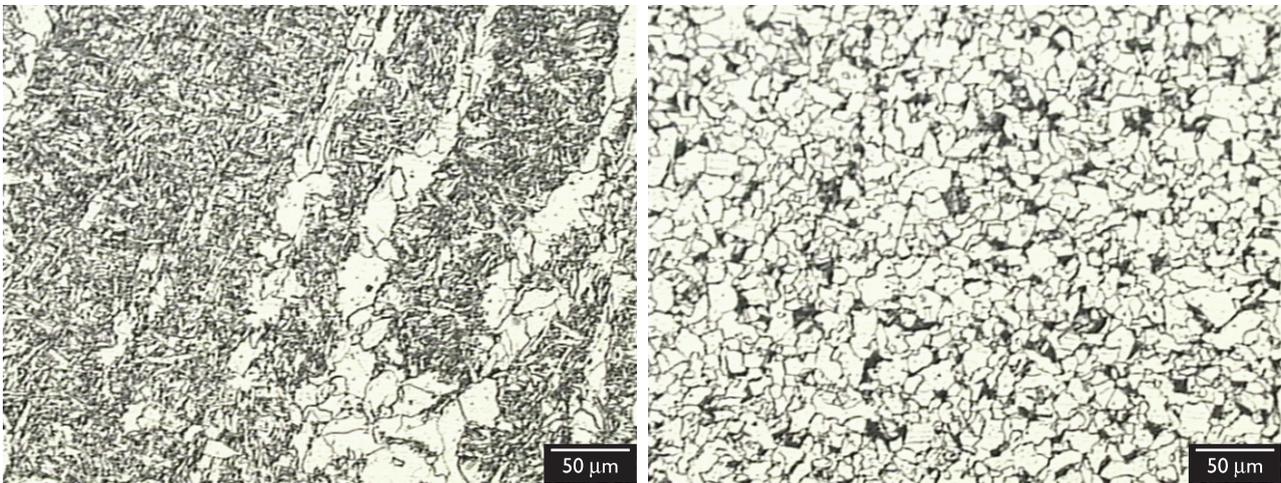


Figura 5. Microestruturas do passe externo (4) (6 kJ/mm) (MO). Ataque: Nital 2%.

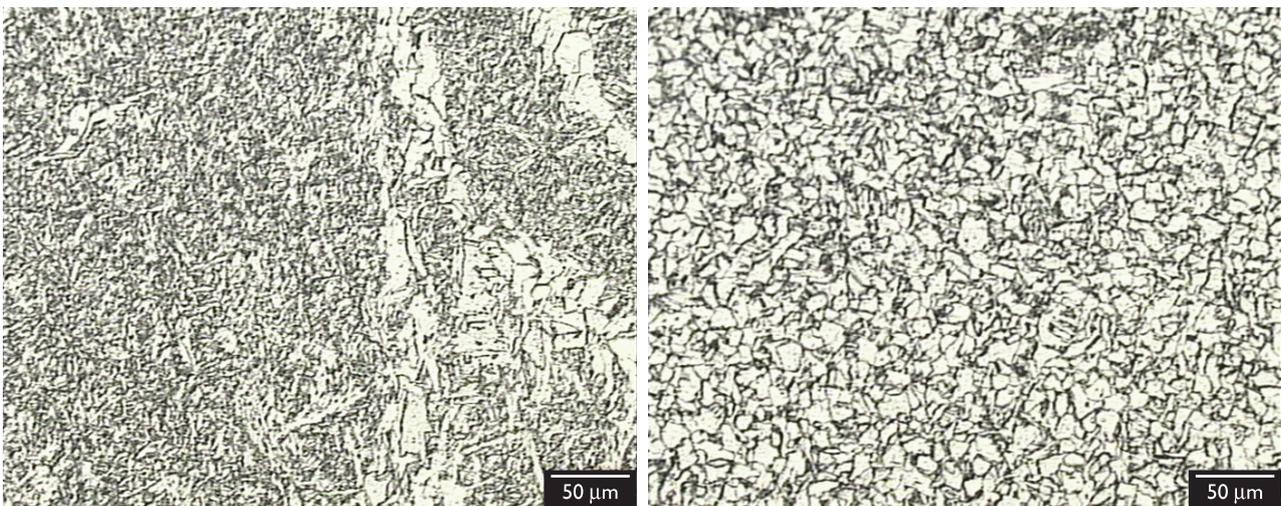


Figura 6. Microestruturas do metal de solda com 3,5 kJ/mm (MO). Ataque: Nital 2%.

não é verificado (Tabela 6), o que caracteriza que outros fatores também devem estar influenciando a tenacidade ao impacto do metal de solda neste caso.⁽⁶⁾ Desta forma, como comentado em trabalho de Jorge, Souza e Rebello,⁽¹⁷⁾ deve-se contemplar também a microestrutura da região reaquecida do metal de solda. De fato, ao observar esta região (Figura 5), nota-se a ocorrência de um significativo percentual de perlita, em torno de 8%, sendo este constituinte de menor tenacidade. Já na região reaquecida

do passe interno, percebe-se que há uma decomposição da perlita (Figura 4), em função do reaquecimento pela deposição dos passes externos, propiciando uma microestrutura composta de ferrita poligonal e carbonetos, o que trouxe benefícios à tenacidade ao impacto. Além disto, como se pode observar pela Figura 8, há a decomposição dos microconstituintes A-M na região colunar deste metal de solda, ambos os fatores sendo benéficos para a tenacidade ao impacto.

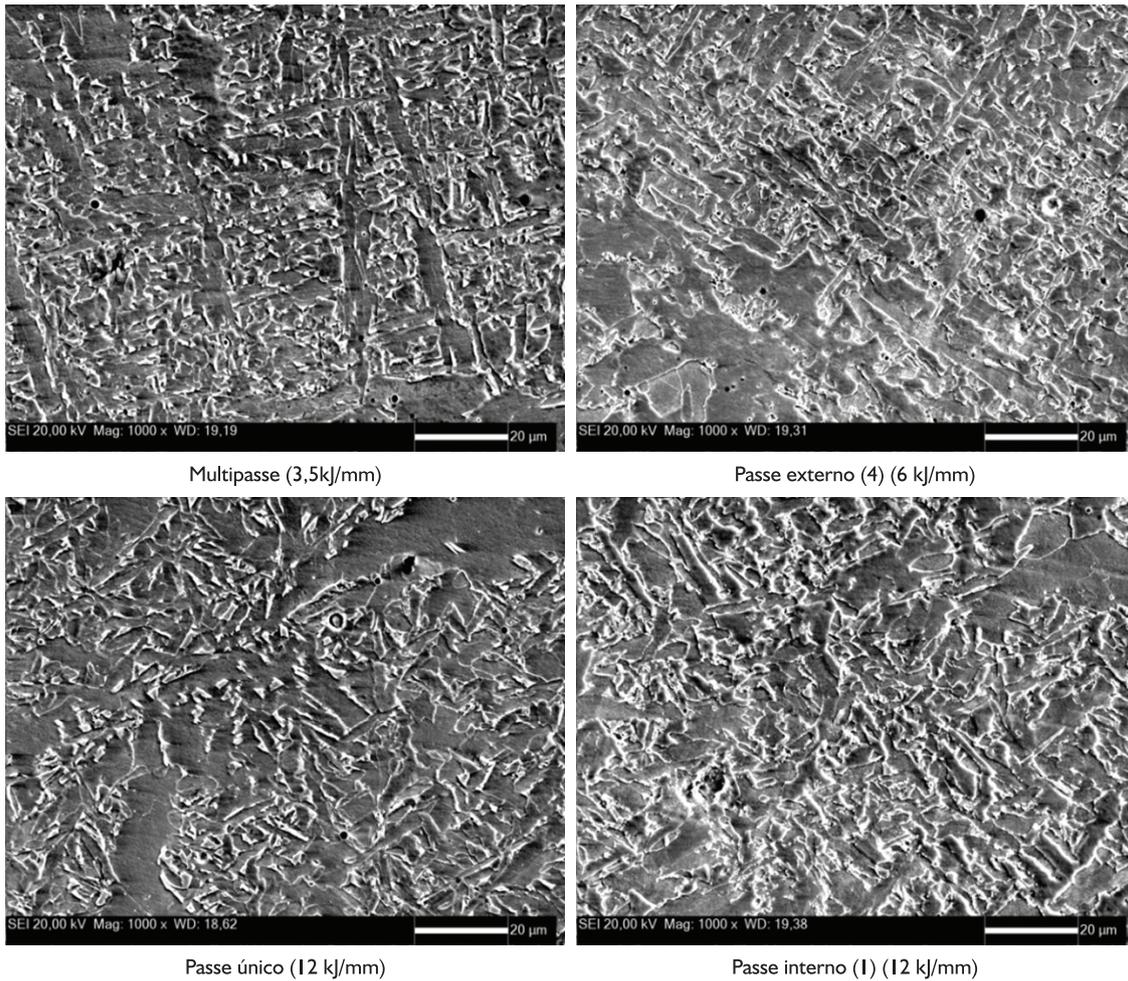


Figura 7. Detalhes das microestruturas da região colunar dos metais de solda (MEV). Ataque: Nital 2%.

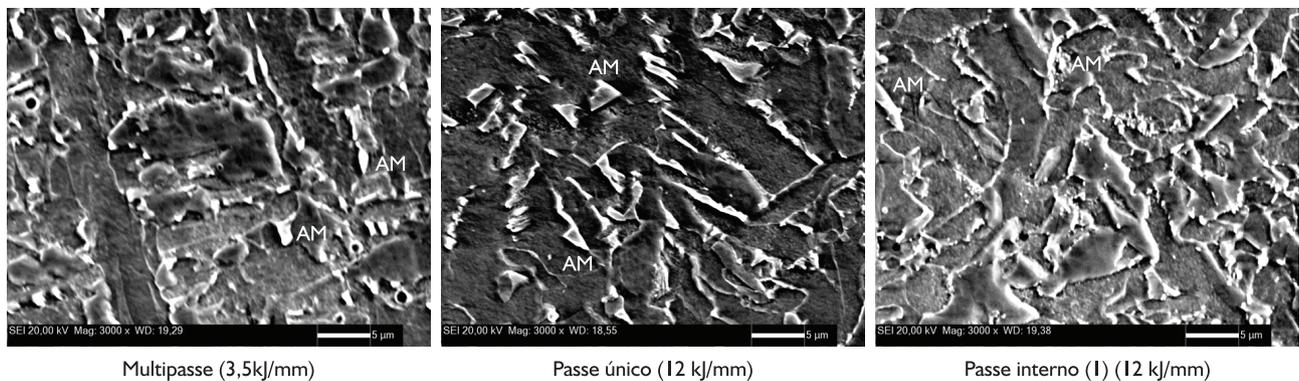


Figura 8. Detalhes dos microconstituintes na região colunar dos metais de solda (MEV). Ataque: Nital 2%.

A deposição do passe “2” (Tabela 2) com alto aporte térmico propicia um reaquecimento no passe interno, garantindo a manutenção dos valores de tenacidade do passe interno (Tabela 6). De fato, com o objetivo de testar esta hipótese de reaquecimento, foram realizados alguns experimentos com tratamento térmico pós-soldagem (Tabela 6), para 6,0 kJ/mm e 3,5 kJ/mm, os quais ratificam que este tratamento propicia melhorias significativas na tenacidade ao impacto do metal de solda. Esta combinação de passes de soldagem permite a adoção do procedimento de soldagem aqui estabelecido e, particularmente, do metal de solda escolhido, para as operações *offshore* dos equipamentos em questão, visto

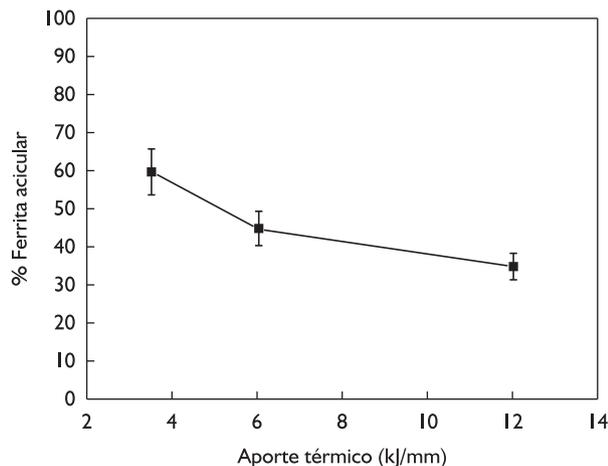


Figura 9. Variação do percentual de ferrita acicular com o aporte térmico.

os resultados obtidos. Nos procedimentos de soldagem anteriormente utilizados, o preenchimento do chanfro era realizado através de arame tubular e arco submerso (Figura 3). Eram realizados três passes de raiz com o processo arame tubular e, posteriormente, o enchimento com arco submerso (Tabela 3). Este enchimento poderia ser realizado com 23 passes, 18 passes ou 19 passes, dependendo da espessura da peça a ser soldada, conforme apresentado na Tabela 7. A quantificação dos percentuais das regiões colunar e reaquecida (Tabela 4) mostram valores similares aos encontrados por Evans⁽⁵⁾ resultando em valores de impacto Charpy-V (Tabela 6) superiores ao mínimo exigido para esse procedimento de soldagem.

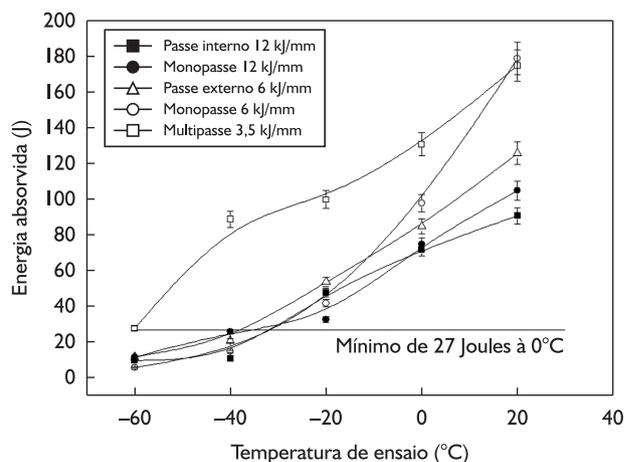


Figura 10. Variação da energia absorvida com a temperatura de ensaio para diversas condições de análise.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de tração (*)

Posição	AT(kJ/mm)	LE(MPa)	LR(MPa)	AI(%)	RA(%)
Interno (1)	12,0	437	564	28,0	71
Externo(4)	6,0	505	631	22,5	67
Multipasse	3,5	452	584	24,5	68

(*) Valor médio de dois ensaios.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de impacto Charpy V(*)

Posição	Condição	% região colunar	AT (kJ/mm)	Energia absorvida (J)	
				-20°C	0°C
Único	CS	100	12	33	75
Interno (**)	CS	70	12	48	72
Único	CS	100	6	42	98
Único	TTAT(***)	100	6	60	144
Externo	CS	60	6	55	85
Multipasse	CS	38	3,5	85	131
Multipasse	TTAT(***)	38	3,5	158	185

(*) Valor médio de três ensaios; (**) Passe reaquecido por um passe externo com 12 kJ/mm, sofrendo um reaquecimento com pico de temperatura da ordem de 540°C; (***) Os tratamentos térmicos de alívio de tensões (TTAT) foram realizados a 600°C por 1 hora.

4.2 Ensaios Mecânicos

4.2.1 Ensaios de tração

A Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios de tração da junta soldada com passes interno e externo e da soldagem multipasses com 3,5 kJ/mm. A comparação com os resultados da Tabela 7, que é proveniente de vários procedimentos de soldagem qualificados previamente para o mesmo material base, espessura e requisitos de propriedades mecânicas, mostra que os valores obtidos no estudo atual são compatíveis com aqueles anteriores, mesmo nas condições dos resultados mais baixos, ou seja, permitem a qualificação dos procedimentos de soldagem.

4.2.2 Ensaios de impacto Charpy-V

A literatura^(6,7,13,18) registra que a diminuição da taxa de resfriamento, pelo aumento do aporte térmico ou do preaquecimento em metais de solda de aço C-Mn baixa liga, provocam uma queda da tenacidade ao impacto, devido à mudança microestrutural ocasionada pela diminuição contínua da proporção de ferrita acicular, notadamente para aportes térmicos superiores a 5,0 kJ/mm.⁽⁶⁾

No caso do presente trabalho, tal fato também é verificado. Como observado na Figura 10 e Tabela 6, nota-se que os valores da tenacidade ao impacto são decrescentes com o aumento do aporte térmico. No entanto, deve ser destacado que, independente desta constatação em perfeita sintonia com os dados da literatura,⁽⁶⁾ percebe-se que estes mesmos valores mostrados na Figura 10 e a Tabela 6 atendem aos requisitos para qualificação dos procedimentos de soldagem, dado que os valores de tenacidade obtidos, mesmo na pior condição, são muito superiores aos 27 J a 0°C, relativo à soldagem com aporte térmico de 12 kJ/mm. Na verdade estes

valores são, pelo menos, 2,6 vezes superiores ao mínimo requerido e, o que é mais importante, como mostrado pela Figura 10, este requisito é suportado até uma temperatura da ordem de -30°C, o que propicia um fator de segurança confortável para a operação dos equipamentos. É importante destacar que, apesar da microestrutura grosseira, os valores de energia absorvida obtidos mostram-se satisfatórios e indicam a viabilidade da aplicação de aportes térmicos ainda maiores, que possibilitariam maior aumento de produtividade. De fato, embora tenha sido verificada uma queda acentuada da tenacidade ao impacto com o aumento do aporte térmico, é importante ressaltar que, para o presente projeto, os requisitos exigidos (Figura 10) permitem ainda assim uma variação possível de ser atingida com os valores obtidos no presente trabalho.

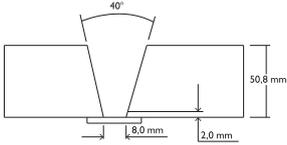
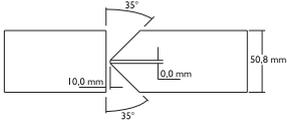
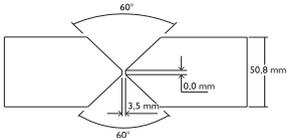
Em relação à questão da mudança de espessura para qualificação de outros procedimentos de soldagem, os resultados do presente trabalho também são importantes, visto que garantem que, para espessuras menores no qual se necessite de um menor número de passes, a tenacidade ainda assim estará em patamares suficientes para garantir os requisitos necessários, visto que a soldagem com passe único gera resultados superiores ao mínimo requerido.

Já na soldagem de juntas de grandes espessuras, no qual se necessite de tratamento térmico de alívio de tensões, a tenacidade também será favorecida (Tabela 6), razão pela qual se realizaram alguns experimentos com tratamento térmico pós-soldagem.

4.3 Análise de Produtividade

A análise de produtividade deste novo procedimento está subdividida em duas etapas: na primeira etapa é considerado apenas o ganho de produtividade na soldagem quando com arco aberto; na segunda etapa são analisados outros ganhos de produtividade levando-se em conta todas as etapas do processo de fabricação.

Tabela 7. Resultados de ensaios de impacto para diferentes condições

EPS	Total de passes (*)	Tipo de chanfro	AT (kJ/mm)	Ec _v a 0°C	LR (MPa)
EPS I	26		3,55	128 (AS) 63 (AR)	552 (AS) 563 (AR)
EPS 2	21		2,81	124 (AS) 118 (AR)	564 (AS) 556 (AR)
EPS 3	22		3,15	153 (AS) 107 (AR)	560 (AS) 538 (AR)

(*)Arame Tubular(AR) na raiz (três passes), Arco Submerso (AS) no enchimento.

Durante a soldagem, o ganho de produtividade é de 300%, quando considerado apenas o tempo de arco aberto. Esse ganho tão elevado ocorre pelo aumento em 33% na corrente, diminuição em 45% da área da geometria do chanfro a ser soldado e diminuição do número de passes de 26 para 4. A taxa de deposição verificada na soldagem multipasse era de 5,5 kg/h, com a alteração dos parâmetros de soldagem e do processo de soldagem, a taxa de deposição passou a ser 12 kg/h.

Quando todos os outros aspectos do processo de fabricação são levados em consideração, o ganho de produtividade é de 58%. Para esta análise são considerados tempos para corte de chapas, biselamento, calandragem, montagem das estruturas, preparação para soldagem, tempo de volta da máquina de solda para o ponto inicial e inspeções visuais e por meio de líquido penetrante.

4.4 Considerações Adicionais

O presente trabalho tem por objetivo dar uma contribuição no sentido de unir conhecimentos científicos e tecnológicos, de modo a realizar uma análise mais abrangente sobre a possibilidade de garantia de qualidade de estruturas soldadas com alta produtividade para fins industriais.

Neste sentido, realiza-se, juntamente com uma análise de produtividade, um estudo metalúrgico da relação tenacidade-microestrutura de metal de solda de alto aporte térmico (até 12 kJ/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.

Os resultados de tenacidade ao impacto obtidos permitem decisões gerenciais seguras não somente para adoção do procedimento aprovado, com ganho expressivo de produtividade, mas também, pela continuidade da pesquisa para análise do comportamento deste metal de solda com um aporte térmico ainda maior, o que será objeto de estudo posterior.

Adicionalmente, mostra que, contrariamente ao que se acredita, ainda existe muito campo de pesquisa, mesmo para metais de solda C-Mn baixa liga, no ramo

industrial, nesta fase do desenvolvimento industrial brasileiro, cuja produtividade e a automação de processos são pontos fundamentais. Neste aspecto, a soldagem com aportes térmicos elevados, da ordem de 12 kJ/mm, é interessante, e poucos estudos específicos sobre metal de solda nesta condição estão disponíveis.

5 CONCLUSÃO

Pelo exposto no presente trabalho, permite-se concluir:

- É possível realizar a soldagem de equipamentos de ancoragem de plataformas de petróleo em aço carbono, que tenham requisitos adicionais de qualidade, com o procedimento aqui estipulado com aporte térmico até 12 kJ/mm e com qualidade assegurada;
- O aumento do aporte térmico e alteração do processo de soldagem permitem ganhos significativos de produtividade, reduzindo o tempo de fabricação de estruturas de ancoragem em 58%;
- No presente estudo a combinação de ciclos térmicos que favorecem a decomposição da perlita e dos constituintes A-M contribuíram de forma significativa para os valores satisfatórios de tenacidade ao impacto; e
- Com base nos resultados apresentados, incentiva-se a realização de mais estudos em metais de solda obtidos com elevados níveis de aporte térmico, de forma a confirmar os resultados aqui obtidos, tendo em vista os mesmos terem sido tão satisfatórios.

Agradecimentos

Os autores agradecem às Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: à Fluke Engenharia Ltda. pelo suporte experimental; ao CEFET/RJ pelo suporte na análise microestrutural, à Capes, ao CNPq e à Finep pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 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;52:42-50.
- 2 Paranhos RPR. Relação tenacidade/microestrutura de metal de solda de aço baixo C-Mn obtido por arco submerso em soldas multipasse. In: Anais do 10. Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem; 1984; Vitória, Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1984. p. 95-116.
- 3 Trindade VB. Paranhos RPR, Payão JC, Souza LFG. Influência da adição de níquel na tenacidade de metais de solda de aços C-Mn antes e após tratamento térmico de alívio de tensões. *Soldag Insp*. 2005;10:164-172.
- 4 Jorge JCF, Souza LFG, Rebello JMA. The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C-Mn weld metal deposits. *Mater Charact*. 2001;47:195-205. [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803\(01\)00168-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00168-1)

- 5 Evans GM. Effect of heat input on the microstructure and properties of C - Mn all weld metal deposits. *Weld Res Abroad*. 1983;29:46-57.
- 6 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. *Sci Technol Weld Joi*. 2000;5:26-34. <http://dx.doi.org/10.1179/136217100322910642>
- 7 Prasad K, Dwivedi DK. Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints. *International J Adv Manuf Tech*. 2008;36:475-483. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0855-1>
- 8 Hoekstra S, Burg MAMS, Ouden G. Microstructure and notch toughness of ferritic weld metal. *Met Constr*. 1986;18:772-775.
- 9 Harrison PL, Farrar RA. Microstructural development and toughness of C-Mn and C-Mn-Ni weld metals. Part I: microstructural development. *Met Constr*. 1987;19:392R-399R.
- 10 Zhang Z, Farrar RA. Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. *Weld J*. 1997;76:183s-196s.
- 11 Zhang L, Li Y, Wang J, Jiang Q. Effect of acicular ferrite on cracking sensibility in the weld metal of Q690+Q550 high strength steels. *ISIJ Int*. 2011;51:1132-1136. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.51.1132>
- 12 Jiang Q, Li Y, Wang J, Zhang L. Characterization on strength and toughness of welded joint for Q550 steel. *Bull Mater Sci*. 2011;34:161-167. <http://dx.doi.org/10.1007/s12034-011-0039-y>
- 13 Bajic N, Sijacki-Zeravcic V, Bobic B, Cikara D, Arsic M. Filler metal influence on weld metal structure of microalloyed steel. *Weld J*. 2011;90:55s-62s.
- 14 Albuquerque SF, Macieal TM, Santos MA, Bracarense AQ. Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de metais de solda obtidos por processos de soldagem manual e automatizado utilizado na soldagem de aço API 5L X80. *Soldag Insp*. 2011;16: 322-332.
- 15 Trindade VB, Payão JC, Souza LFG, Paranhos RR. The role of addition of Ni on the microstructure and mechanical behavior of C-Mn weld metals. *Exacta*. 2007;5:177-183.
- 16 Pinheiro MM. Influência do preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades mecânicas do metal de solda de aços de alta resistência obtidos por processo arame tubular tipo metal cored [mestrado]. 2012. Rio de Janeiro: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca; 2012.
- 17 Jorge JCF, Souza LFG, Rebello JMA. Uma contribuição ao estudo da relação tenacidade/microestrutura de metais de solda C - Mn baixa liga. In: *Anais do 19. Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*; 1993; Águas de São Pedro, Brasil. São Paulo: ABS; 1993. p. 1-19.
- 18 Martins WP, Nascimento CCF, Meneses VA, Paiva AEM, Leal VS. Influência dos parâmetros de soldagem no comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas de juntas soldadas em aços ARBL. In: *Anais do 6. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*; 2011; Caxias do Sul, Brasil. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e das Ciências Mecânicas; 2011.

Recebido em: 19/10/2012

Aceito em: 10/04/2013