

ESTUDO COMPARATIVO DE METAIS DE SOLDA DE AÇOS DE EXTRA ALTA RESISTÊNCIA PARA UTILIZAÇÃO EM COMPONENTES DE LINHAS DE ANCORAGEM DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO¹

Antonio José Mendes Gomes²
Jorge Carlos Ferreira Jorge³
Luís Felipe Guimarães de Souza³
Ivaní de Souza Bott⁴

Resumo

O presente trabalho apresenta os resultados de propriedades mecânicas e microestruturais de metais de solda obtidos a partir de 2 consumíveis com variações de Ni e Mn desenvolvidos em um programa de pesquisas, onde se avalia o desenvolvimento de diferentes formulações de eletrodos revestidos para a obtenção de elevadas resistência mecânica e tenacidade ao impacto, da ordem de 860 MPa e 50 Joules à -20°C, respectivamente, e dá sequência à discussão para um melhor entendimento da relação tenacidade X microestrutura destes metais de solda. Foram soldadas juntas multipasse, pelo processo de eletrodo revestido com 4 mm de diâmetro, com preaquecimento de 250°C, corrente contínua, posição plana e aporte térmico médio de 1,5 kJ/mm. Após a soldagem, realizaram-se ensaios de impacto Charpy-V, dureza e metalográficos por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) em corpos-de-prova retirados integralmente do metal depositado, tanto na condição de como soldado quanto após tratamento térmico pós-soldagem (TTPS). Os tratamentos térmicos pós-soldagem consistiram de aquecimento a 600°C por 1 h, 2 h e 3 horas seguido de resfriamento ao ar. Os resultados mostraram que os metais de solda obtidos de ambos os consumíveis apresentaram tenacidade ao impacto adequadas a utilização na soldagem do aço IACS W22 GRAU R4.

Palavras-chave: Metal de solda; Propriedades mecânicas; Tratamento térmico.

COMPARATIVE STUDY OF EXTRA HIGH STRENGTH STEEL WELD METAL FOR MOORING COMPONENTS OF OFFSHORE PLATFORMS

Abstract

The present work show the results of mechanical and microstructural properties weld metals obtained from two different covered electrodes containing nickel and manganese variations developed in a wide research program which the main goal is the development of different welding consumables for high mechanical strength and impact toughness, of the order of 860 MPa and 50 Joules at -20°C, respectively. Welded joints were produced by using 4 mm diameter covered electrodes in multi-pass technique, using preheat of 250°C, direct current, flat position and heat input of 1,5 KJ/mm. After welding, mechanical tests (impact Charpy-V, hardness) and metallographic examination (optical microscopy and scanning electron microscopy) were performed in specimens removed integrally from the weld metal both in the as welded condition and post weld heat treatment at 600°C for 1 h, 2 h and 3 hours. The results show that the weld metals obtained from both consumables has impact toughness levels appropriate for application on IACS W22 R4 Grade steel welding.

Key words: Weld metal; Mechanical properties; Heat treatment.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PEMM), Cefet-RJ, Rio de Janeiro, Brasil.

³ Eng. Metalúrgico, D.Sc., PEMM, Cefet-RJ, Rio de Janeiro, Brasil.

⁴ Física, Professora, Ph.D. Departamento de Eng. Materiais, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ.

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera, sobretudo as atividades offshore, tem apresentado importante papel no cenário mundial. A exploração inicialmente em terra teve seu foco deslocado para os mares onde os grandes campos são responsáveis por percentuais cada vez maiores pela produção mundial. O grande potencial exploratório em águas cada vez mais profundas motiva o desenvolvimento de novas tecnologias que viabilizem a exploração e a respectiva produção. Ao mesmo tempo se busca também a redução a níveis mínimos os riscos de falha nas operações de extração, produção e transporte já que tais falhas ensejam em acidentes de proporções incalculáveis com perdas de equipamentos, danos ao meio ambiente, interrupção da produção e principalmente perdas humanas.

Considerando as atividades de exploração do petróleo, os sistemas de ancoragem continuam demandando o desenvolvimento de novos aços de alta resistência mecânica e elevada tenacidade para viabilizar a produção de amarras e acessórios que atendam aos requisitos das normas específicas para o segmento offshore. Adicionalmente, não basta somente o progresso na produção de novos aços; importante também é o desenvolvimento de novos consumíveis que produzam metais de solda com propriedades compatíveis com os metais de base.

O presente trabalho dá sequência à estudo anteriormente realizado por Jorge et al.,⁽¹⁾ onde se iniciou uma avaliação mais sistemática do comportamento dos metais de solda de resistência superiores à 860 MPa, através do estudo de quatro metais de solda obtidos de consumíveis nacionais e importados disponíveis no mercado. Com base nos resultados de ensaios mecânicos e metalográficos foi possível constatar que apenas um daqueles consumíveis atendeu as exigências da norma IACS W22.⁽²⁾

De forma conclusiva, ficou ainda a recomendação de um estudo complementar para utilização da microscopia eletrônica de varredura afim de permitir conhecimento dos constituintes e microfases presentes buscando melhor entendimento da relação tenacidade versus microestrutura.

Neste contexto, o presente trabalho irá realizar análise investigativa se valendo dos resultados obtidos através da utilização da microscopia eletrônica de varredura. A identificação das microestruturas presentes em cada condição servirá para explicar os comportamentos encontrados nos ensaios mecânicos tanto na condição como soldado como também após o tratamento térmico pós-soldagem. Além disso, será realizada avaliação quanto à influência da composição química, mais especificamente quanto ao balanço Ni-Mn e tenacidade.

O principal objetivo deste trabalho é prosseguir com avaliação sistemática do comportamento dos metais de solda de resistência superiores a 860 MPa e tenacidade ao impacto de 50 Joules a -20°C, que são requisitos mínimos considerando-se as exigências para um aço grau R4 da norma IACS W22,⁽²⁾ através da avaliação de dois metais de solda obtidos a partir de um consumível nacional e outro importado disponíveis no mercado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Realizou-se o estudo com eletrodos revestidos, cujas composições químicas dos metais depositados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do metal depositado (% em peso)

Consumível	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	V	Ceq(*)
B	0,064	0,451	0,018	0,005	1,373	0,634	2,207	0,788	0,0145	0,727
W	0,054	0,154	0,024	0,012	2,026	0,411	3,018	0,269	<0,005	0,729

(*) $Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$

2.2 Soldagem dos Corpos de Prova

As juntas foram soldadas a partir de chapas com 19 mm de espessura e 700 mm de comprimento. A geometria e demais dimensões da junta são apresentadas na Figura 1. As juntas foram preaquecidas à temperatura de 250°C.

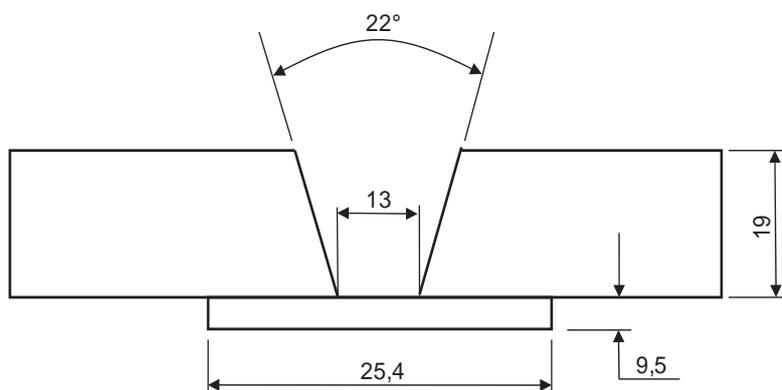


Figura 1. Detalhes da geometria da junta utilizada. Cotas em mm.

A Tabela 2 apresenta o conjunto de parâmetros médios utilizados para a soldagem.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados

Consumível	Φ (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	AT (kJ/mm)	Nr. Passes
B	4,0	180-190	20-30	1,51	23
W	4,0	174-184	21-28	1,40	22

Nota: Φ - diâmetro do eletrodo; AT - aporte térmico.

2.3 Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem (TTPS)

Foram realizados tratamentos térmicos consistindo de aquecimento a 600°C por 1 h, 2 h e 3 horas, sendo estas condições comparadas à condição da junta de como soldada.

2.4 Ensaio Mecânicos

Foram removidos corpos-de-prova longitudinais e transversais ao cordão de solda para ensaios de impacto Charpy-V e dureza.

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V à temperatura de -20°C, em corpos-de-prova normalizados nas dimensões de (10x10x55 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 do cordão de solda.

Foram realizados ensaios de dureza Vickers com aplicação de carga de 10 Kgf em corpos-de-prova transversais ao cordão de solda, sendo realizada uma varredura de dureza da superfície até a raiz do metal de solda.

Todos os ensaios mecânicos foram realizados tanto na condição de como soldado (CS) como após os TTPS, para avaliação de possíveis alterações das propriedades devido à variação do tempo de tratamento.

2.5 Ensaio Metalográficos

Foram realizados ensaios macro e micrográficos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos metais de solda, para avaliação das microestruturas.

O preparo das amostras para análise consistiu do procedimento convencional de lixamento e polimento e polimento com pasta de diamante com granulometrias 6 µm, 3 µm, 1 µm e 1/4 µm, seguido de ataque químico com o reagente nital 2%.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaio de Impacto Charpy-V

A Tabela 3 e a Figura 2 mostram os resultados dos ensaios de impacto realizados nos metais de solda, onde se notam as seguintes características principais.

3.1.1 Para o consumível B

- O tratamento térmico pós-soldagem propiciou uma ligeira redução nos valores de tenacidade ao impacto em relação à condição de como soldado, situação que foi verificada em toda a faixa de temperaturas de ensaio estudadas, quando se analisa os valores médios obtidos de energia absorvida. No entanto, quando se analisam os valores individuais e suas variações, verifica-se que a dispersão indica que a variação não é significativa;
- o aumento do tempo de tratamento não provocou mudanças significativas nos valores de tenacidade ao impacto; e
- todos os valores obtidos apresentaram-se acima do requisito mínimo para o aço grau R4.

3.1.2 Para o consumível W

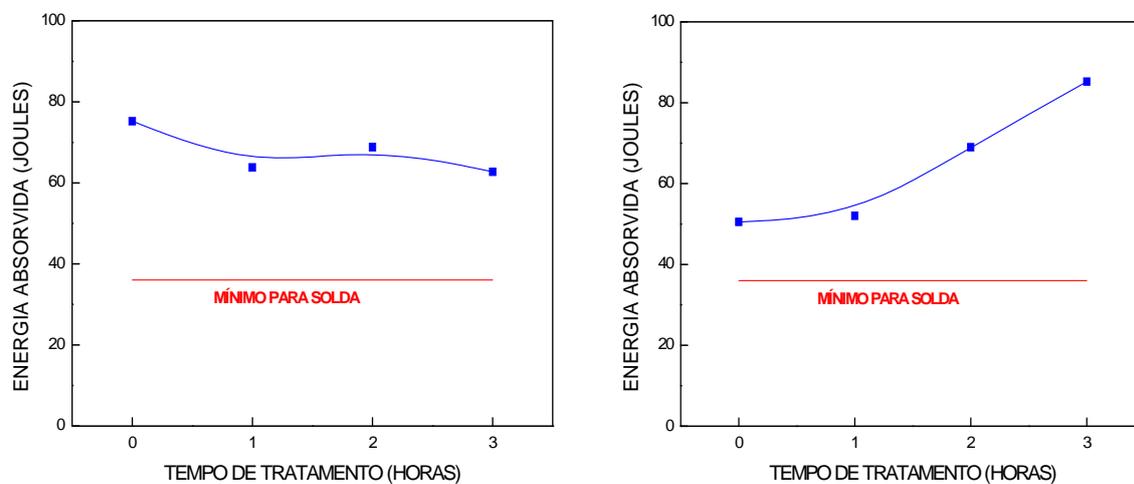
- O tratamento térmico pós-soldagem propiciou um aumento nos valores de tenacidade ao impacto em relação à condição de como soldado, situação que foi verificada em toda a faixa de temperaturas de ensaio estudada;
- o aumento do tempo de tratamento provocou mudanças significativas nos valores de tenacidade ao impacto; e
- todos os valores obtidos apresentaram-se acima do requisito mínimo para o aço grau R4.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de impacto à -20°C (joules)

Metal de Solda	Condição	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio	Média
B	CS	66,0	80,5	79,0	75,2
B	TTPS 1 h	68,0	58,5	65,5	64,0
B	TTPS 2 h	77,5	73,5	55,5	68,8
B	TTPS 3 h	65,0	60,0	63,0	62,7
W	CS	40,4	64,5	46,5	50,5
W	TTPS 1 h	56,5	52,0	47,5	52,0
W	TTPS 2 h	63,5	70,5	73,0	69,0
W	TTPS 3 h	83,5	86,0	86,0	85,2
Mínimo ⁽²⁾ metal de solda					36,0

Nota: CS – Como Soldado; TTPS – Tratamento Térmico Pós-Soldagem.

A Figura 2 apresenta em forma gráfica os resultados dos ensaios de impacto apresentados na Tabela 3.



Consumível B
Consumível W
Figura 2. Variação da energia absorvida com o tempo de tratamento térmico.

3.2 Ensaio De Dureza Vickers

A Figura 3 mostra os resultados dos ensaios de dureza, realizados nos metais de solda, onde se nota que os resultados se concentram na faixa entre 300 HV a 350 HV para as diversas condições de análise. Nota-se ainda que os resultados obtidos para os metais de solda com o consumível B, propiciaram maiores valores de dureza que os do consumível W.

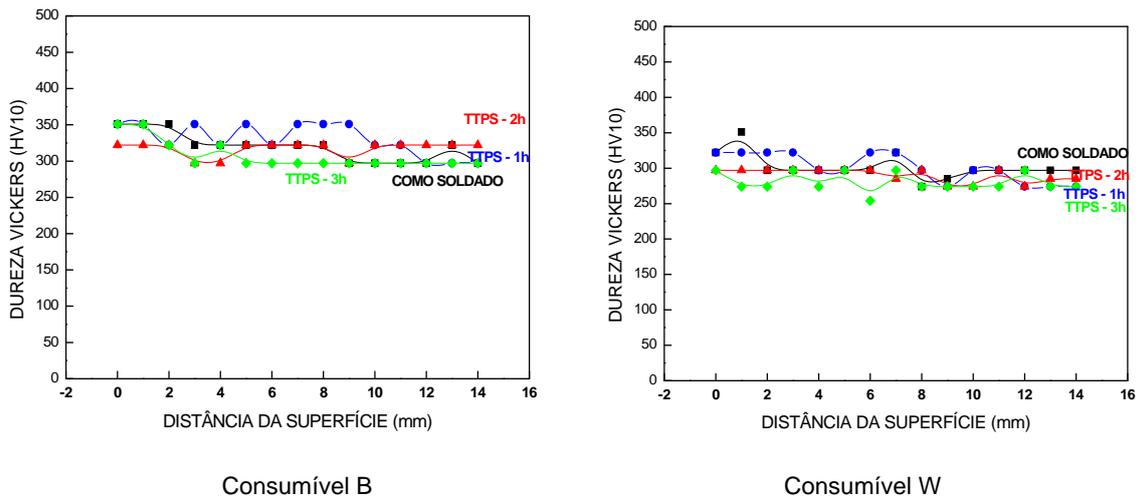


Figura 3. Resultados dos ensaios de dureza Vickers (HV10) dos metais de solda.

3.3 Ensaios Metalográficos

A Figura 4 apresenta o aspecto macrográfico das juntas soldadas, onde se observa que não existem indicações de porosidades, inclusão de escória ou trincas.

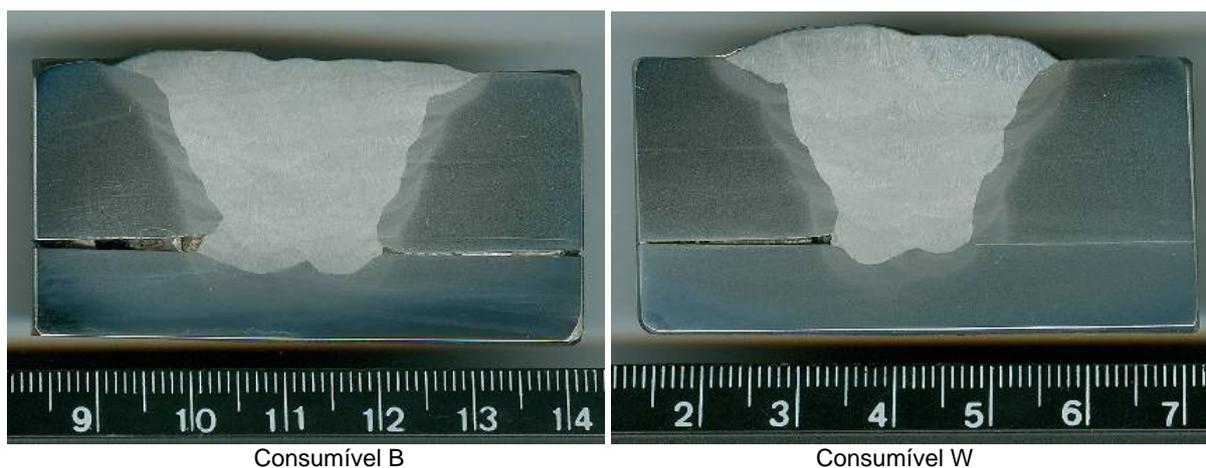


Figura 4. Aspecto macrográfico das juntas soldadas.

As Figuras 5 e 6 mostram as micrografias dos metais de solda obtidos para as diferentes condições, quando observados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde se notam as seguintes características:

- observa-se no metal de solda proveniente do consumível B, uma microestrutura constituída de martensita e bainita revenida (indicadas nas Figuras **quais figuras?**), com predominância deste último constituinte, tanto na região colunar quanto na região reaquecida, para todas as condições de análise. Nota-se ainda, que o tratamento térmico propiciou uma ligeira precipitação de carbeto no contorno de grão como mostrado mais detalhadamente na Figura 7.
- já no caso do consumível W, observou-se uma microestrutura constituída de martensita, bainita e ferrita acicular (indicadas nas Figuras **quais figuras?**), com predominância de bainita granular, havendo ainda grande incidência de constituintes A-M. Note-se ainda, que o tratamento térmico propiciou uma

extensiva decomposição dos constituintes A-M em ferrita e carbeto (Figura 8).

4 DISCUSSÃO

O presente trabalho dá sequência a estudos apresentados em publicações anteriores^(1,3) procurando avaliar uma evolução de consumíveis que sejam adequados à soldagem com requisitos desafiadores de resistência mecânica e tenacidade.⁽¹⁾ Realiza-se então uma abordagem mais específica e comparativa a cerca de dois consumíveis disponíveis no mercado, com diferentes composições químicas e, particularmente, balanços diferentes dos elementos níquel e manganês, elementos que segundo a literatura,⁽⁴⁻¹⁶⁾ são fundamentais para obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias e altos patamares de tenacidade ao impacto.

A análise dos resultados do ensaio de impacto Charpy-V (Figura 2), evidencia que ambos os metais de solda apresentam resultados superiores aos mínimos especificados para aço grau R4 da norma IACS W 22.⁽²⁾ No caso do metal de solda B, se verificou uma ligeira queda da tenacidade ao impacto (-20°C) em relação à condição de como soldado. Comparando estes resultados com o patamar mínimo de 36 Joules⁽²⁾ evidencia-se que todas as condições em estudo apresentam resultados satisfatórios, bem superiores ao patamar mínimo sendo portanto aptas para a utilização ao que se pretende, em particular aquelas que foram tratadas termicamente onde se promoveu alívio das tensões residuais.

Por outro lado, o metal de solda W, apresenta um comportamento completamente oposto ao do metal de solda B. Nota-se pela análise da Figura 2, que os resultados de tenacidade ao impacto são crescentes e com variações bem representativas. A curva ascendente de resultados pode, presumivelmente, estar relacionada com as microestruturas presentes no metal de solda, já que o mesmo apresenta grande incidência de microconstituente A-M que provoca efeito prejudicial à tenacidade.⁽¹⁷⁾

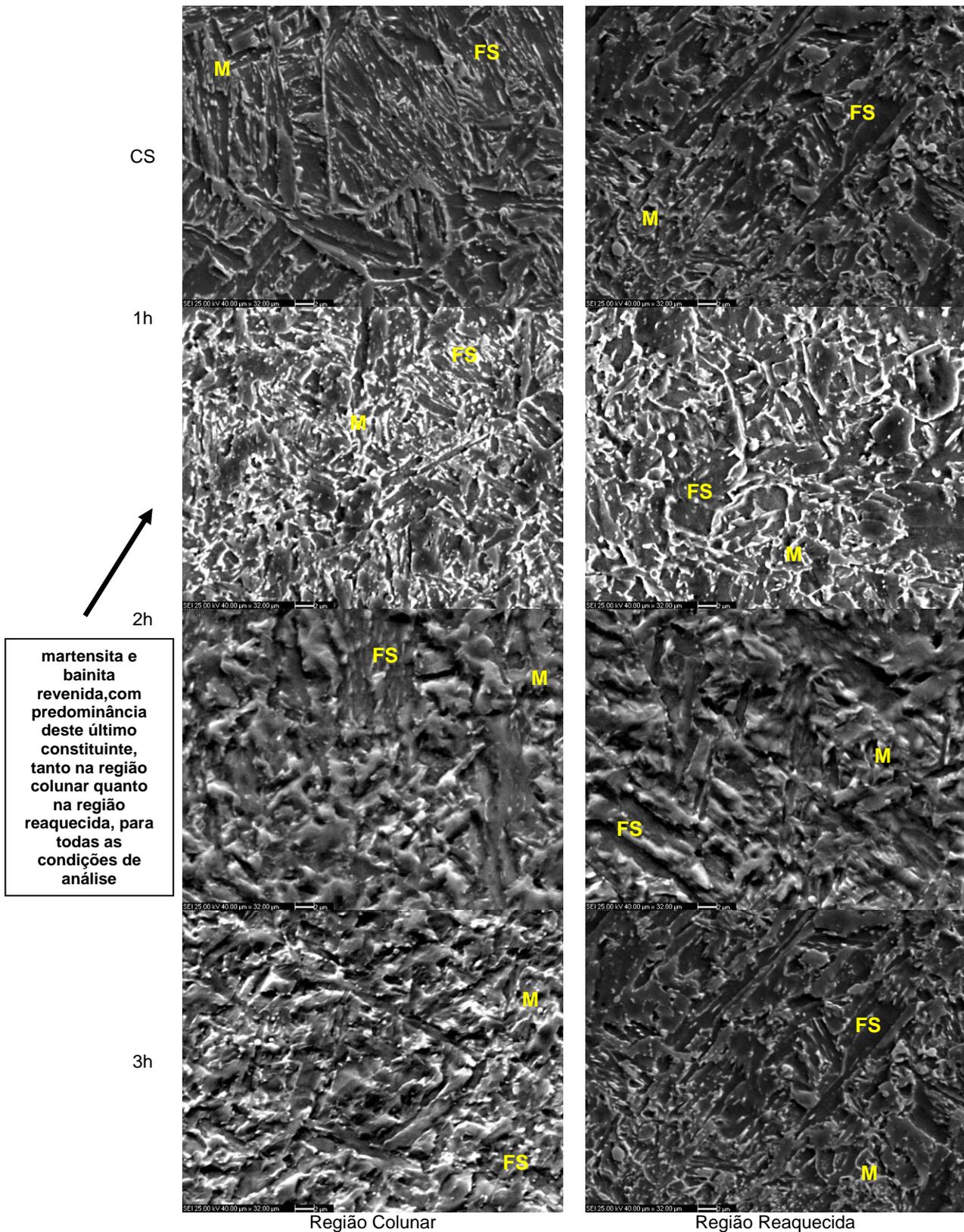


Figura 5. Aspecto microestrutural dos metais de solda do consumível B observados por MEV. Aumento: 5.000X. Ataque: nital 2%.

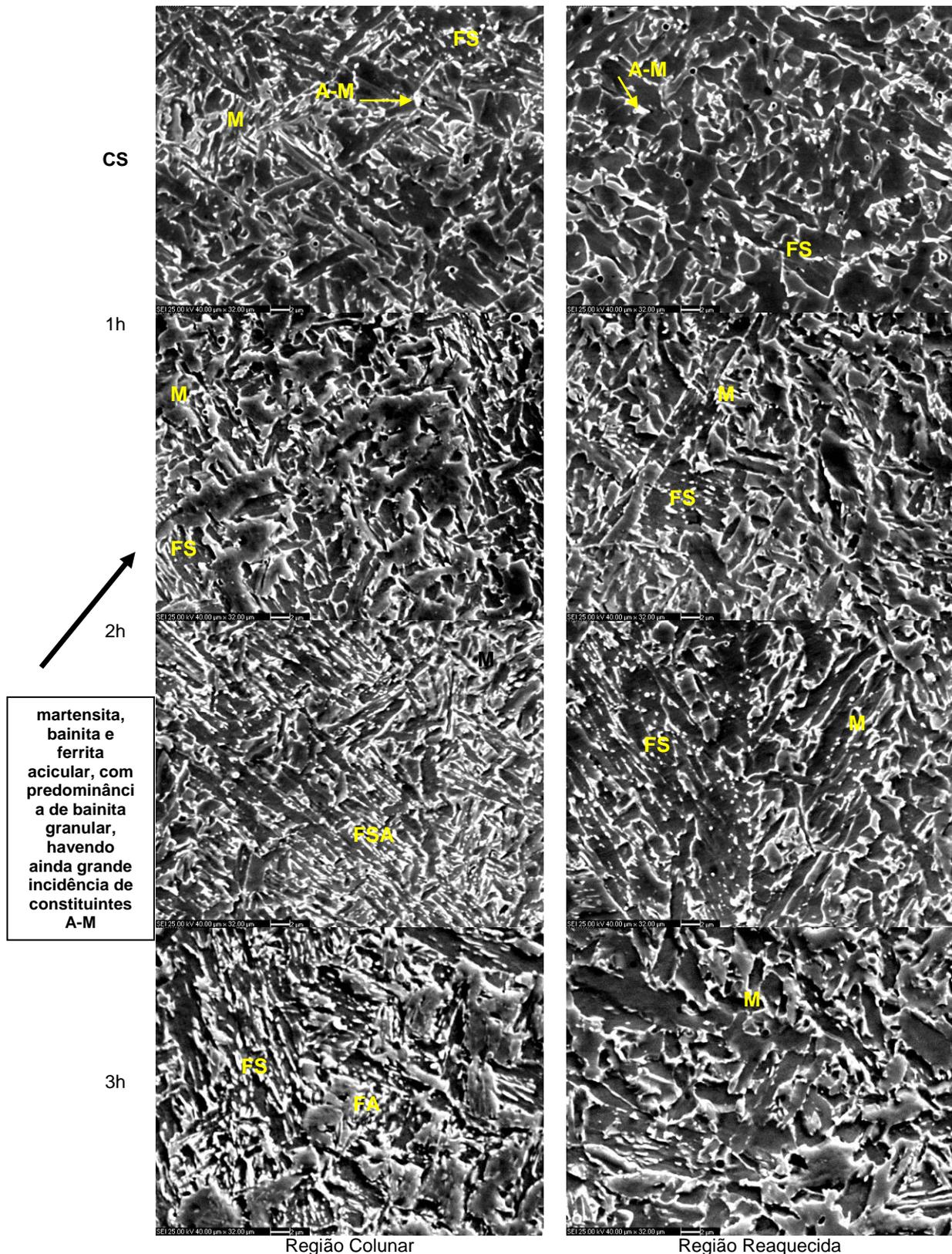
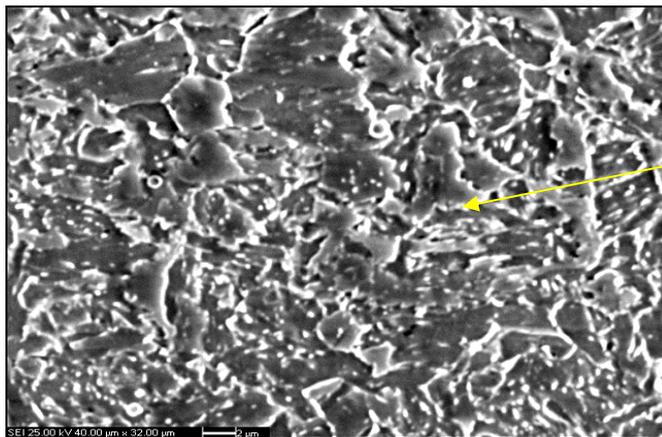
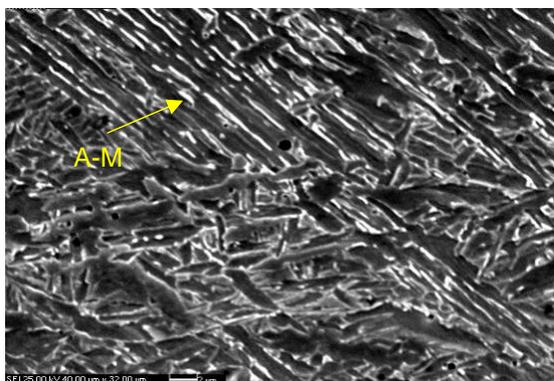


Figura 6. Aspecto microestrutural dos metais de solda do consumível W observados por MEV. Aumento: 5.000X. Ataque: nital 2%.



Precipitação de carbetos no contorno de grão

Figura 7. Detalhe da ocorrência precipitação de carbetos no contorno com tratamento térmico no metal de solda B. Aumento: 3.000X. Ataque: nital 2%.



CS



TTPS – 3 h

Figura 8. Detalhe da ocorrência de constituinte A-M e de sua decomposição com o Tratamento térmico no metal de solda W. Aumento: 3.000X. Ataque: nital 2%.

A realização do tratamento térmico pós-soldagem propiciou decomposição do A-M em ferrita e carbeto contribuindo beneficemente para aumento da tenacidade ao impacto.⁽⁸⁾ Além disso, pode-se atribuir a melhoria da tenacidade ao impacto ao revenimento da martensita e também ao processo de esferoidização dos carbonetos depositados nos contornos de grão. Considerando de forma específica o microconstituente A-M é evidenciado⁽⁸⁾ que seu efeito é tão prejudicial para a tenacidade que mesmo em metais de solda com microestruturas refinadas e com alta quantidade de ferrita acicular na região de grãos colunares, a presença do A-M provoca queda pronunciada da tenacidade. Entretanto, esse efeito negativo para a tenacidade é fortemente atenuado pelos passes subsequentes e pelo tratamento térmico pós-soldagem. Ainda cabe ressaltar que este efeito nocivo do A-M se acentua quando estes apresentam morfologia angular e se concentram ao longo dos contornos de grão da austenita prévia, propiciando posições preferenciais para iniciação e propagação de fratura por clivagem.⁽¹⁷⁾

Outro importante ponto a destacar é a composição química dos metais de solda em estudo conforme a Tabela 1. A literatura^(4,5,9,13) apresenta pesquisas em metais de solda contendo Mn e Ni, concluindo que um balanço equilibrado de ambos elementos propicia propriedades mecânicas satisfatórias na relação direta com as microestruturas formadas no processo de soldagem. Também, teores de Ni de até 3,5% promovem refino da microestrutura.⁽⁵⁾ O Níquel promove a redução de ferrita primária de contorno de grão, aumentando consideravelmente a quantidade de ferrita com segunda fase e em especial a ferrita acicular (reduzido tamanho de grão,

morfologia de grãos emaranhados, contornos de grão de alto ângulo – dificultando a propagação de trincas) o que está consistente com os resultados do presente estudo quando se comparam os percentuais de Ni do metal solda B (2,20%Ni) e metal de solda W (3,018%Ni). Adicionalmente, os melhores níveis de tenacidade⁽⁵⁾ são obtidos para uma combinação de 0,6%–1,4% de Mn e 1%–3,7 % de Ni. De fato, a Figura 9 mostra uma relação entre os teores de Mn e Ni e tenacidade de metal de solda a -50°C, situação que acontece com o metal de solda W; o aumento simultâneo dos teores dos dois elementos, acima de determinados níveis, implica na redução da tenacidade. O exposto pode ser comprovado através da verificação da Tabela 1 e dos resultados dos ensaios de impacto. Também é relevante a relação direta do aumento teor de Ni a partir de determinado patamar e a formação de martensita. A Figura 10 ilustra esta variação microestrutural que resulta em quedas significativas de tenacidade, para o estado de como soldado.

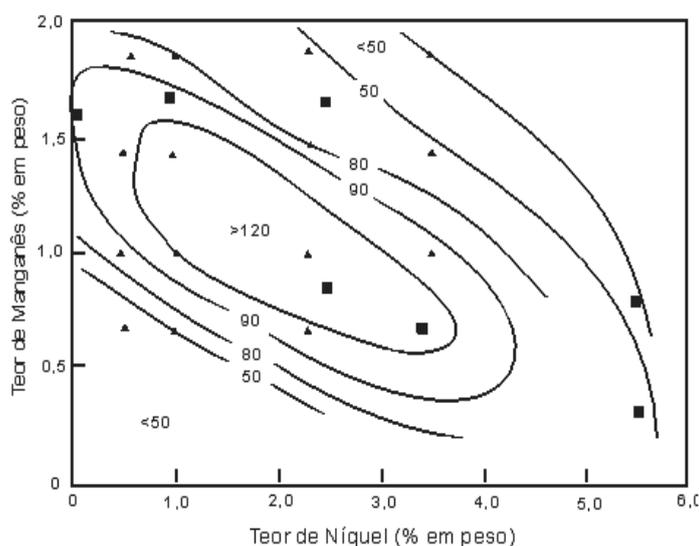


Figura 9. Efeito do níquel e manganês na tenacidade ao impacto à - 50°C.⁽⁵⁾

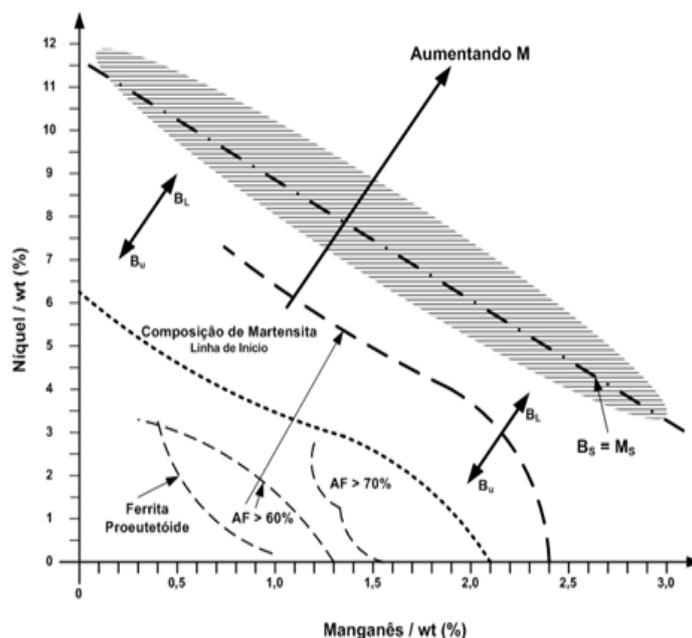


Figura 10. Efeito da relação Mn-Ni na microestrutura de metais de solda de alta resistência.⁽⁵⁾

5 CONCLUSÕES

Do exposto no transcurso do presente trabalho, pode-se concluir que:

- todos os resultados de tenacidade ao impacto foram superiores aos mínimos requeridos para o aço grau R4 da norma IACS W22, para ambos os consumíveis;
- no caso do metal de solda do consumível B, verificou-se que o tratamento térmico não propiciou mudanças significativas na tenacidade ao impacto;
- no caso do metal de solda do consumível W, verificou-se que o tratamento térmico propiciou um aumento contínuo da tenacidade ao impacto, o que pode ser atribuído ao revenimento da martensita e decomposição dos constituintes A-M; e
- para obtenção de tenacidade adequada em metais de solda de aços de alta resistência, deve ser mantido um balanço adequado da relação Ni-Mn.

Agradecimentos

Os autores agradecem às Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: A Fluke Engenharia Ltda., Cefet/RJ, PUC-Rio e ESAB. Os autores agradecem também a: Marcio Moura, Tatiana Farias e Jorge Vieira da Fluke Engenharia Ltda., pelo apoio na realização das soldagens e ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- 1 JORGE, J.C.F, SOUZA, L.F.G, SANTOS FILHO, O.R. e BOTT, I.S. Estudo de metais de solda de aço de extra alta resistência para utilização em componentes de ancoragem de plataformas de petróleo. Parte I: Propriedades Mecânicas, IN XXXVII Consolda, 2011.
- 2 IACS W22 – Offshore Mooring Chain, 2011.
- 3 FARAGASSO, S.M., SOUZA, L.F.G., BOTT, I.S., JORGE, J.C.F.. Avaliação de propriedades Mecânicas e Microestruturais de Metais de Solda de Aço de Extra alta Resistência para utilização em Equipamentos de Ancoragem, IN: XXXVII Consolda, 2011.
- 4 KANG, B. Y.; KIM, H. J.; HWANG, S. K.; Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals. *ISIJ International*, Vol. 40(12), pp.1237–1245, 2000.
- 5 ZHANG, Z.; FARRAR, R. A.; “Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals”. *Welding Journal*, No.5, pp. 183-196, 1997.
- 6 LORD, M; Design and Modeling of Ultrahigh Strength Steel Weld Deposits. Materials Science and Metallurgy. University of Cambridge; Cambridge, UK.
- 7 KEEHAN, E.; ANDRÉN, H. -O.; KARLSSON; L.; MURUGANANTH, M. ; BHADSHIA, H. K. D. H.; Microstructural and Mechanical Effects of Nickel and Manganese on High Strength Steel Weld Metals. Disponível em <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-Trans/2003/Keehan>. Trends. 2002.pdf.
- 8 TRINDADE, V. B.; PARANHOS, R. P. R.; PAYÃO, J. C.; SOUZA, L. F. G.; Influência da Adição de Níquel na Tenacidade de Metais de Solda de Aços C-Mn Antes e Após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões. *Soldagem Insp.*, Vol. 10, No. 4, Out-Nov 2005, p. 164-171.
- 9 KANG, B. Y.; KIM, H. J.; HWANG, S. K.; Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals. *ISIJ International*, Vol. 40 (2000), No. 12, p. 1237–1245.
- 10 SVENSSON, L.E., Consumables for Welding High Strength Steels; Svetsaren, A Welding Review published by ESAB Group, Vol.54 No. 1-2, pp. 29-33, 1999.

- 11 BHADSHIA H.K.D.H. Bainite in Steel. 2nd Ed. 458p. The Institute of Materials. London. 2001.
- 12 BABU, S.S., The Mechanism of Acicular Ferrite in Weld Deposits. Material Science and Engineering. 2004. p. 267-278.
- 13 HARRISON, P.; FARRAR, R.; "Microstructural Development and Toughness of C-Mn and C-Mn-Ni Weld Metals. Part 1 – microstructural Development". *Metal Construction*, Vol 19 (7), pp. 392R–399R, Jul. 1987.
- 14 KEEHAN, E.; Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy. Department of Experimental Physics. Chalmers University of Technology and Göteborg University. Göteborg, Sweden, 2004.
- 15 IKAWA, H. et al ;Effect of Martensite – Austenite Constituent on HAZ Toughness of High Strength Steel, IIW DOC.IX – 1156-80.13 FERRANTE, M; FARRAR, R.A.; The Role of Oxygen – Rich Inclusions in Determining the Microstructure of Weld deposits, *Journal of Materials Science*, v.17, n11, pp 3293 – 3298, Nov 1982.
- 16 EVANS G.M.; Factors Affecting the Microstructure and Properties of C- Mn all Weld Metals Deposits, *Welding Research abroad*, v.28, n.1, pp.1 – 69, 1983.
- 17 JORGE, J.C.F, SOUZA, REBELLO, J.M.A. Microscopia Eletrônica de Varredura de Cordões de Solda de Aços de Alta Resistência, *Soldagens e Materiais*, 1 jul/set, 1989.