

INFLUÊNCIA DO TEOR DE MOLIBDÊNIO EM LIGAS FERRÍTICAS 9CR-XMO¹

Natasha Lopes Gomes²
Fernando Henrique Costa Saboia²
Luana de Sousa Santos²
Rodrigo Freitas Guimarães³
Hamilton Ferreira Gomes de Abreu⁴
Hélio Cordeiro de Miranda⁵

Resumo

Este trabalho objetiva avaliar a influência do alto teor de molibdênio na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na soldabilidade de ligas Fe-9Cr-xMo para aplicação na indústria petrolífera. As ligas solubilizadas foram submetidas a ensaios de microdureza, tração e impacto em duas temperaturas e soldadas com e sem adição de material, empregando três níveis de energia. Foram realizadas análises de variância do tamanho de grão e da microdureza nas regiões da solda para verificar os efeitos da variação no teor de Cr e Mo e da energia de soldagem. Os resultados revelaram que as diferentes condições de soldagem empregadas não foram prejudiciais à microestrutura e à dureza das ligas. Os altos teores de molibdênio, o baixo alongamento percentual e o comportamento frágil destas ligas a temperatura ambiente indicam que estas seriam de difícil soldabilidade. Contudo, os resultados mostraram que a realização das soldagens destas ligas foi realizada com sucesso.

Palavras-chave: Molibdênio; Soldagem; Caracterização microestrutural.

INFLUENCE OF THE INCREASE OF MOLYBDENUM ALLOY STEELS 9CR-XMO

Abstract

This study evaluates the influence of the high molybdenum content on the microstructure, mechanical properties and weldability of alloy Fe-9Cr-Xmo for application in the oil industry. The solubilized alloys were subjected to microhardness tests, tensile and impact and welded at two different temperatures with and without addition of material, using three energy levels. Analyses of variance of grain size and microhardness in the weld regions to check the effects of variation in the concentration of Cr and Mo and heat input. The results revealed that the different welding conditions employed did not affect the microstructure and hardness of the alloy. The high levels of molybdenum, the low percentage elongation and brittle behavior of these alloys at room temperature indicate that these would be difficult weldability. However, the results show that the performance of the welding of these alloys has been successful.

Key words: Molybdenum; Welding; Microstructural characterization.

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

² Graduando em Tecnologia em Manutenção Industrial no IFCE, Brasil.

³ Doutor em Engenharia dos Materiais, Professor Doutor no IFCE, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Professor Doutor no IFCE, Brasil.

⁵ Doutor em Soldagem, Coordenador do Núcleo de União e Revestimento de Materiais da Rede Multitarefa de Materiais Especiais do Norte e Nordeste – Remult.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo processado nas refinarias brasileiras é um produto de elevada acidez. Porém esse alto índice de acidez, na presença de compostos oxigenados, ocasiona a corrosão naftênica, que se manifesta nos diversos tipos de equipamentos da indústria petroquímica.⁽¹⁾ Esse fator é agravado pelo fato das unidades existentes terem sido projetadas para atuar em condições menos severas de acidez, exigindo dessa forma equipamentos fabricados de materiais que possam resistir a esse tipo de corrosão.

Os materiais empregados na fabricação desses equipamentos são geralmente aços liga contendo 2,5%-11% de Cr e 1%-2% de Mo, que apesar de apresentar boa resistência à corrosão por sulfetos têm se mostrado ineficientes na presença de acidez naftênica,⁽²⁾ ocasionando altos custos com perda de produção por parada de manutenção. Diante dessa problemática surge a proposta de estudar novos materiais para aplicação na indústria do petróleo, como os tubos dos fornos de destilação e os dutos de transporte.

Segundo Solomon,⁽³⁾ a introdução de alguns elementos de liga pode aumentar à resistência a corrosão levando a estabilização de uma ou outra fase. Sabendo que o molibdênio (Mo) é responsável pelo aumento da resistência a corrosão quando submetido a atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e em altas temperaturas,⁽⁴⁾ uma opção para melhorar a resistência à corrosão é elevar o teor de Mo nas ligas comerciais empregadas.

Dessa forma, foram confeccionados aços liga Fe-Cr-Mo com maiores teores de Mo a fim de solucionar problemas decorrentes da ação dos ácidos naftênicos.

O Mo também é responsável pelo aumento de resistência à fluência em aços Cr-Mo, quando está presente em solução sólida ou em precipitados.⁽⁵⁾ Este elemento de liga aumenta a resistência à tração e a dureza do aço,⁽⁶⁾ contudo, o aumento da taxa de deformação é menor que o aumento da taxa de resistência à tração.⁽⁷⁾ Apesar de aumentar a resistência à corrosão, o alto teor de Mo pode prejudicar as propriedades mecânicas dos materiais⁽⁸⁾ além de favorecer a formação de precipitados do tipo sigma (σ), chi (χ) e mu (μ), prejudicando a soldabilidade dos aços, devido à perda de ductilidade.⁽⁹⁾

Com base nessas informações torna-se necessária uma avaliação criteriosa das propriedades mecânicas dessas ligas, assim como uma análise microestrutural das mesmas antes e após serem submetidas às condições de operação. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar a influência do alto teor de Mo no comportamento microestrutural, nas propriedades mecânicas e na soldabilidade de novas ligas Fe-9Cr-xMo para aplicação na indústria petroquímica. Para isso foram realizados ensaios mecânicos e de soldagem, além de análises microestruturais para uma posterior avaliação das propriedades dessas ligas antes e após a soldagem, visto que o emprego das mesmas deve ocorrer na condição como soldada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foram utilizadas duas ligas experimentais de aço, cuja composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) das ligas avaliadas

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
1	0,031	0,38	0,37	9,5	7,3
2	0,041	0,41	0,45	9,6	9,3

Inicialmente, as ligas foram forjadas e laminadas a quente a 1.000°C.

A solubilização consistiu no aquecimento, em forno, das ligas à temperatura de 1.050°C, mantidas nesta temperatura por um período de 15 minutos seguido de resfriamento rápido em água até a temperatura ambiente.

Após a solubilização foram retiradas amostras das ligas para caracterização microestrutural e para medição do tamanho de grão (TG). A caracterização microestrutural foi feita através de microscopia óptica (MO) utilizando o reagente Vilela⁽¹⁰⁾ para revelar a microestrutura.

Foram realizados ensaios mecânicos de tração, a temperatura ambiente de acordo com a norma NBR 6152⁽¹¹⁾ e ASTM E8-03⁽¹²⁾ – impacto Charpy-V reduzido, a temperatura ambiente, de acordo com a norma NBR 6157⁽¹³⁾ e ASTM E 23 – 96⁽¹⁴⁾. Os ensaios de microdureza foram realizados com base na norma ASTM E384-89.⁽¹⁵⁾ Posteriormente, foi realizada a soldagem autógena, na posição plana, empregando o processo TIG automático, com eletrodo não consumível, toriado de 2,4 mm de diâmetro em corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), utilizando argônio (Ar) como gás de proteção (vazão de gás de 14 L/min), sobre chapas com dimensões de 10 mm x 40 mm x 80 mm.

Na deposição dos cordões de solda foram empregados três diferentes níveis de energia (Es), variando o nível de corrente (I) e de velocidade de soldagem (Vs), no qual resultaram dois tipos de técnica de energia (Tipo V e Tipo I) (Tabela 2). Buscou-se manter a tensão constante (17 V) regulando a distância da ponta do eletrodo para a peça em 4 mm.

Tabela 2. Relação entre os níveis de corrente, tensão e a velocidade de soldagem

Condição	Vs (cm/min)	I (A)	Es (kJ/cm)	Técnica de Energia (TE)
T1	34	200	6	V
T2	25		8	V
T3	20		10	V
T4	25	150	6	I
T2		200	8	I
T5		250	10	I

As amostras foram soldadas utilizando o arame AWS ERNiCrMo-3 (Tabela 3), de diâmetro 1,2 mm, empregando o processo MIG automático, na posição plana, utilizando corrente contínua, eletrodo positivo e Ar como gás de proteção sobre chapas planas de dimensão 12 mm x 70 mm x 250 mm e chanfro meio V.

Tabela 3. Composição química (% em massa) do eletrodo segundo fabricante

Eletrodo	C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Fe
AWS ERNiCrMo-3	<0,03	0,2	0,2	0,015	0,015	22,0	>60,0	9,0	3,5	<0.20	<1,0

A deposição dos cordões de solda iniciou-se na raiz da junta seguida dos cordões de preenchimento. Após o preenchimento da junta foi realizada a deposição do cordão no lado oposto a raiz utilizando uma corrente de 210 A, velocidade de 60 cm/min e energia de 6,3 kJ/cm.

As condições de soldagem estabelecidas para que pudesse haver uma melhor união entre as ligas e o material de adição utilizado são apresentadas na Tabela 4, também utilizando as técnicas tipo V e tipo I.

Após a soldagem com e sem adição de material, foram retiradas amostras dos corpos de prova soldados para a caracterização da seção transversal das regiões da solda e do metal de base, utilizando MO e de ensaios de microdureza. As microestruturas foram reveladas com o reagente Vilella.⁽¹⁰⁾

Tabela 4. Níveis de corrente e velocidade de soldagem para os cordões de enchimento das juntas

Condição	Vs (cm/min)	I (A)	Es (kJ/cm)	Técnica de Energia (TE)
M1	38	210	10	V
M2	25		15	V
M3	19		20	V
M4	25	140	10	I
M2		210	15	I
M5		280	20	I

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Estudo Termodinâmico do Sistema Fe-Cr-Mo

Nas Figuras 1a e 1b são apresentados os diagramas de equilíbrio de fase das Ligas 1 e 2, obtidos através do programa comercial, nos quais observa-se as possíveis formações de fase para cada uma dessas ligas em função da temperatura e composição.

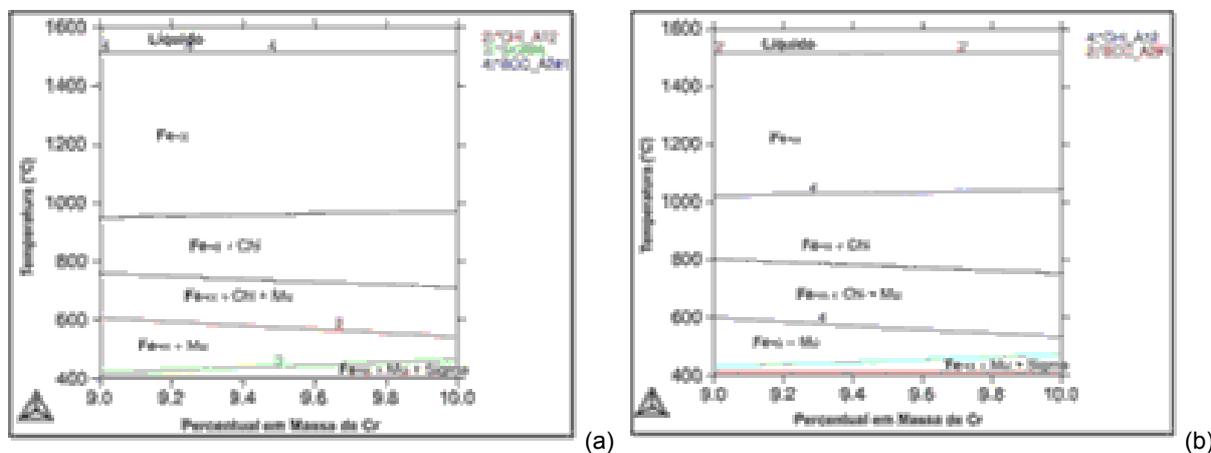


Figura 1. Diagrama de fase para as ligas. (a) Liga 1 (9Cr-7Mo); e (b) Liga 2 (9Cr-9Mo).

Guimarães,⁽¹⁶⁾ em seus estudos, mostrou que apesar do aumento do teor de Mo tornar a liga totalmente ferrítica para teores de Mo superiores a 2,4%, ele favorece a formação de novas fases do tipo chi (χ), mu (μ) e sigma (σ), aumentando a fração destas fases com o aumento do teor de Mo (Figura 1). Contudo, essas fases quando verificadas em grande quantidade podem comprometer as propriedades do material, uma vez que a precipitação das mesmas é acompanhada por um aumento de dureza e intensa perda de ductilidade, tenacidade e resistência a corrosão, especialmente quando estas são medidas à temperatura ambiente.⁽¹⁷⁾

3.2 Caracterização Microestrutural das Ligas Solubilizadas

As MO realizadas após a solubilização das Ligas 1 e 2 (Figura 2) revelaram microestruturas características de ligas ferríticas, com TG ASTM 1,0, indicando que ambas apresentam grãos grandes na condição solubilizada.

O TG grande é prejudicial às propriedades mecânicas do material. Portanto, é muito importante o controle do mesmo durante a fabricação e em aplicações práticas que envolvem altas temperaturas,⁽¹⁸⁾ visto que o aumento do TG pode favorecer a uma diminuição na dureza do material, além de facilitar a formação de trincas.

Analisando a morfologia dos grãos é possível notar certa heterogeneidade quanto ao TG, causada pela falta de elementos estabilizantes de grão na composição química das ligas. Também é possível observar a presença de alguns precipitados, possivelmente formados devido à presença de carbono nestas ligas, podendo ser identificados como carbonetos.⁽¹⁹⁾

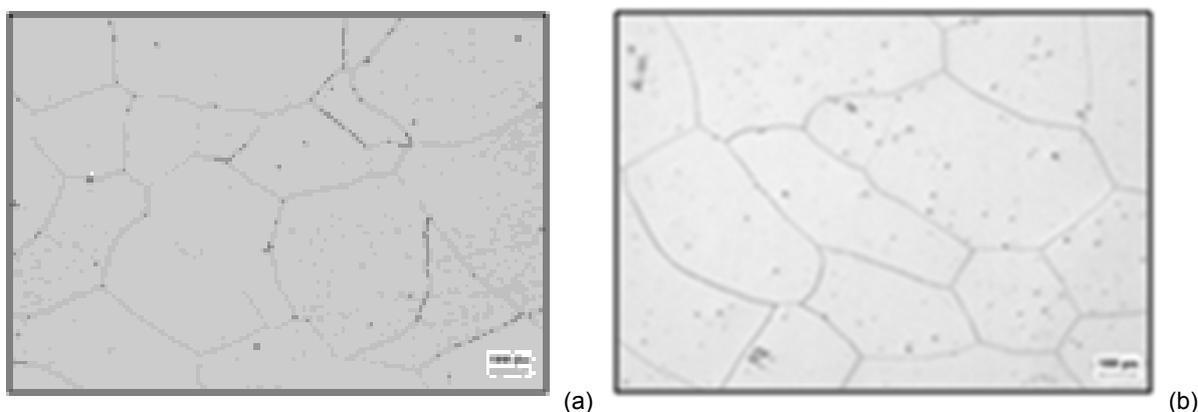


Figura 2. Micrografias das ligas após a solubilização. Aumento 100X. (a) Liga 1; e (b) Liga 2.

Os valores de microdureza Vickers obtidos das Ligas 1 e 2 solubilizadas foram de 232 HV e 297 HV, respectivamente. Estudos apontam que o valor de dureza aumenta com o aumento do teor de Mo,⁽²⁰⁾ o que justifica o maior valor de dureza da Liga 2 em relação à Liga 1, já que esta possui maior teor de Mo.

3.3 Ensaio Mecânicos

3.3.1 Ensaio de tração

A adição de Mo favorece ao aumento da resistência mecânica das ligas de aço,⁽⁸⁾ como pode ser confirmado na Tabela 5. As Ligas 1 e 2 quando comparadas com a liga comercial 9Cr-1Mo (P91), que possui limite de escoamento de 447 MPa,⁽²¹⁾ apresentaram limite de escoamento e limite de resistência à tração superior.

Na Tabela 5 também é possível verificar que a Liga 1 apresentou maior valor de alongamento percentual que a Liga 2. Os valores de alongamento percentual obtidos para estas ligas estão abaixo dos valores de ligas comerciais como o aço P91, que possui alongamento entre 23% e 33%.⁽²¹⁾ Estes resultados mostram o efeito fragilizante dos altos teores de Cr e Mo.

Tabela 5. Propriedades mecânicas das ligas após ensaio de tração à temperatura de 22°C

Composição	Ensaio	Lim. de escoamento 0,2% (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Limite de ruptura (MPa)	Alongamento (%)
Liga 1 (9Cr7Mo)	1	538,0	668,0	665,7	14,9
	2	564,0	697,5	524,1	23,8
	3	547,6	666,6	665,3	7,8
Liga 2 (9Cr9Mo)	1	562,8	695,7	714,5	8,9
	2	568,7	714,9	635,0	7,5
	3	566,1	673,3	671,8	6,1

3.3.2 Ensaio de impacto Charpy

Os valores médios de energia absorvida obtidos através da realização dos ensaios de impacto Charpy-V reduzido, realizados à temperatura ambiente (22°C) nos corpos de prova da Liga 1 e da Liga 2, foram de aproximadamente 3,3 J para ambas as ligas. Como pode ser observado, independente do teor de Mo não foi verificada alteração significativa nos valores de energia absorvida.

O aspecto da fratura dos corpos de prova Charpy-V reduzido é apresentado na Figura 3, onde é possível verificar fratura do tipo frágil.

Os baixos valores de energia absorvidos durante o ensaio e o aspecto da fratura observado na Figura 3 após o ensaio de impacto Charpy-V, indicam que estas ligas apresentam um comportamento do tipo frágil para as condições empregadas nestes ensaios. Este resultado era esperado, uma vez que tanto o Mo quanto o Cr elevam a dureza da liga, favorecendo a um comportamento frágil em determinadas condições.⁽¹⁾

Os valores de tenacidade das Ligas 1 e 2, quando comparados com o da Liga P91, que é de 10 J, apresentam-se inferiores, ou seja, as ligas em estudo possuem menor capacidade de absorver energia que a liga comercial P91.

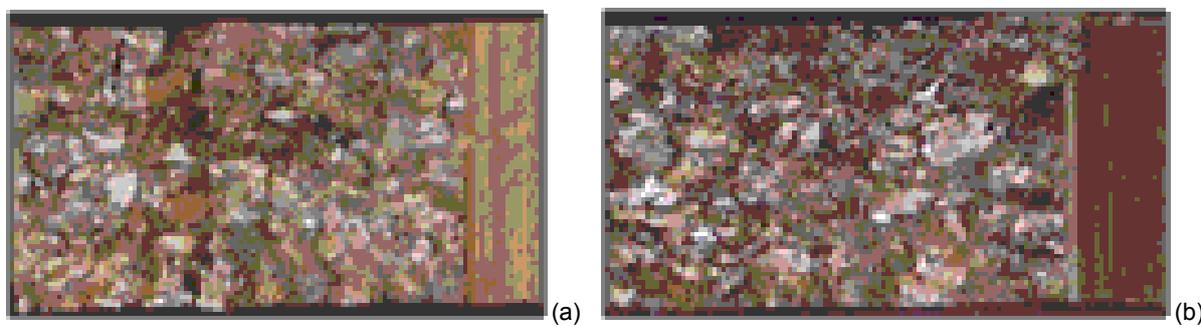


Figura 3. Aspecto da fratura dos corpos de prova Charpy-V (22°C). (a) Liga 1; e (b) Liga 2.

A temperatura a que as ligas foram submetidas inicialmente para a realização dos ensaios (22°C), propiciou um comportamento frágil, portanto optou-se por realizar ensaios de impacto Charpy-V a uma temperatura superior a 22°C. Guimarães⁽²²⁾ verificou que para uma temperatura acima de 60°C, o aço estudado apresentou um comportamento dúctil.

Com base nesses estudos, decidiu-se realizar ensaios na temperatura de 60°C, e assim verificar se as mesmas apresentam alguma alteração no modo da fratura e na capacidade de absorver energia. Os valores médios de energia absorvida, após o aumento da temperatura de realização de ensaio para 60°C, foram de 34 J (Liga 1) e 19,3 J (Liga 2).

De acordo com o aspecto de fratura da Liga 1 a 60°C (Figura 4a), esta apresentou um comportamento do tipo dúctil, justificado pelo aspecto fibroso e fosco, pelo

aumento da energia absorvida e pela redução de área. A Liga 1 possui a presença de pequenas áreas com aspecto brilhoso, característica de fratura frágil, indicando a presença dos dois tipos de fratura para esta liga. Contudo, a região dúctil é bem maior que a frágil.

O comportamento da Liga 2, conforme o aspecto da fratura obtida (Figura 4b), é do tipo frágil a temperatura de 60°C, apesar de a energia absorvida ter aumentado para 19,3 J. Desta forma, realizou-se o ensaio da liga a temperatura de 100°C (Figura 4c), obtendo-se, um valor de energia absorvido de 39 J. Para este ensaio verifica-se um comportamento dúctil (Figura 4c).

Os resultados obtidos das ligas quando submetidas aos ensaios de impacto Charpy-V nas diferentes temperaturas, revelam uma tendência no aumento da TTDF com o aumento do teor de Mo, contudo a quantidade de temperaturas em que o ensaio foi realizado não permitiu determinar o valor da TTDF. Foi possível verificar que a Liga 1 apresentou característica mista de fratura para temperaturas acima de 60°C e a Liga 2 apresenta característica frágil para temperaturas acima de 60°C, sendo dúctil para temperaturas acima de 100°C.

Os resultados obtidos mostraram que o Mo afetou a tenacidade das ligas estudadas, aumentando a faixa de temperatura na qual o aço permanece frágil, como confirmado por Faria e Brandi.⁽²³⁾

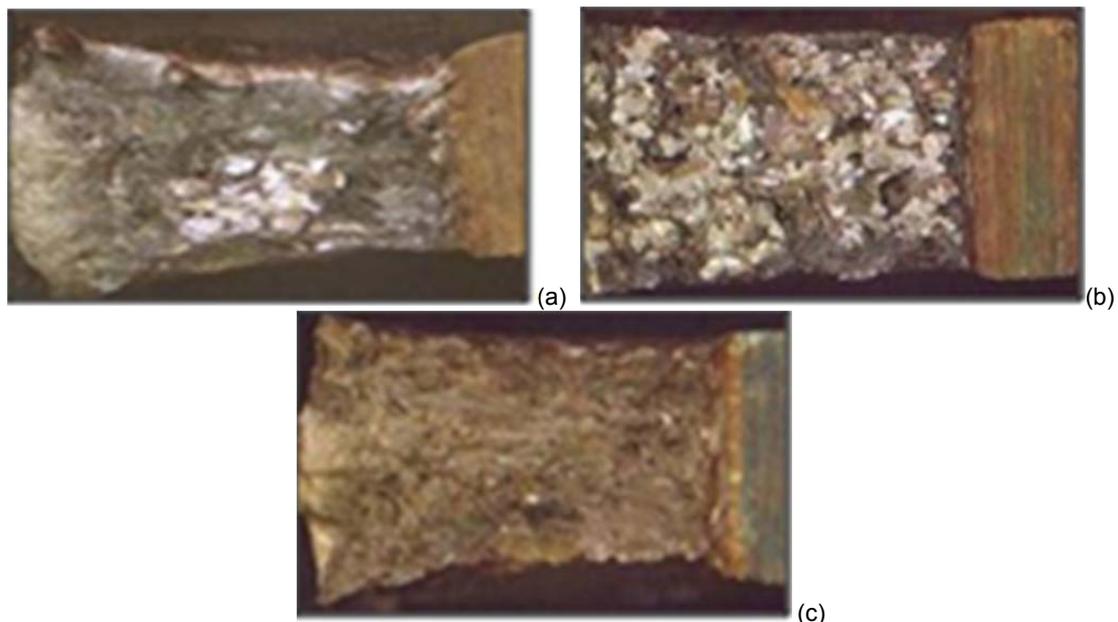


Figura 4. Aspecto da fratura dos corpos de prova Charpy-V. (a) Liga 1 (60°C); (b) Liga 2 (60°C); e (c) Liga 2 (100°C).

3.4 Soldagem Autógena

3.4.1 Análise do TG ASTM

A medição do TG (com base na norma ASTM E 112-96)⁽²⁴⁾ foi realizada na ZAC das Ligas 1 e 2 após a soldagem TIG. Os valores médios de TG ASTM das ligas foram de aproximadamente 0,7 (Liga 1) e 0,6 (Liga 2), que assim como na condição solubilizada, após a soldagem TIG, também apresentaram ZAC com grãos grandes. Segundo Sedricks⁽¹⁷⁾ e Faria e Brandi,⁽²³⁾ o aumento do teor de Mo favorece ao aumento do grão na ZAC das ligas ferríticas, o que pode ocasionar a perda de ductilidade das regiões devido ao crescimento de grão.

A Figura 5 apresenta os gráficos da análise de variância do efeito da variação do teor de Mo e da energia de soldagem no TG ASTM das ligas estudadas, onde é possível identificar que tanto a variação de Mo (Figura 5a) quanto a variação da energia de soldagem (Figura 5b) não afetou de forma significativa o TG na ZAC. Contudo há uma tendência no aumento do TG da ZAC com o aumento do teor de Mo presente nas ligas.

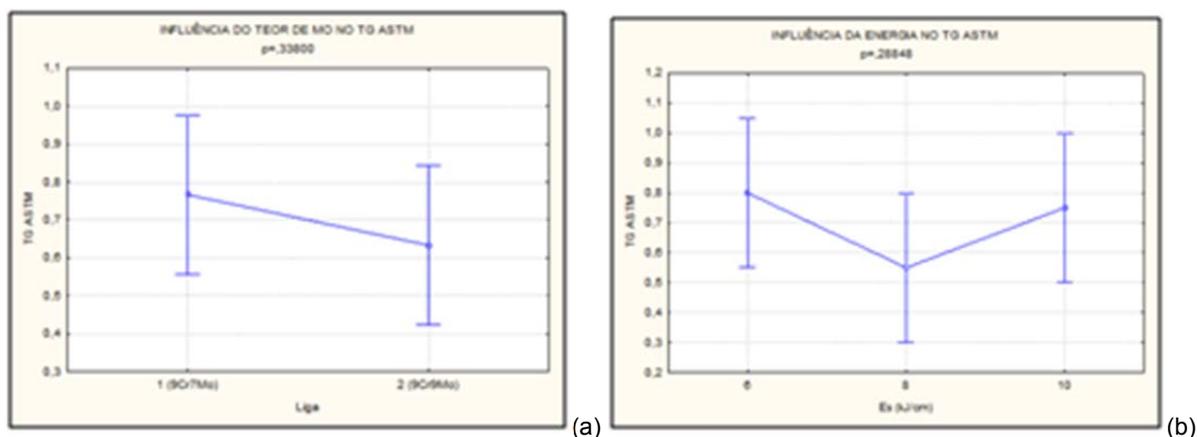


Figura 5. Análise de variância do TG ASTM das ligas. (a) Influência da variação do teor de Mo; (b) Influência da variação da energia de soldagem.

3.4.2 Análise microestrutural

Na Figura 6 são apresentadas as micrografias da zona fundida (ZF) da Liga 1 após as soldagens apenas para as condições T1, T2 e T3, haja visto que as condições T4 e T5 apresentaram comportamento similar, no qual observou-se uma microestrutura ferrítica com a presença de grãos colunares e equiaxiais.

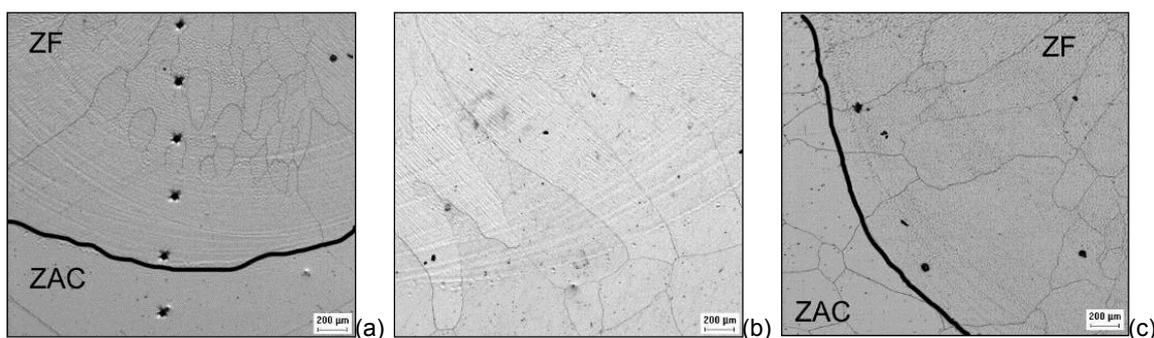


Figura 6. Micrografias da ZF da Liga 1. Aumento 50X. (a) Condição T1; (b) condição T2; e (c) condição T3.

A ZAC da Liga 1 (Figura 7) apresentou uma microestrutura ferrítica para as condições empregadas, como confirmado anteriormente no diagrama da Figura 1a que indica que esta liga deve apresentar uma microestrutura ferrítica e com a formação de outras fases difusionais.

A Liga 2 possui regiões da solda semelhantes a da Liga 1, com uma microestrutura ferrítica (Figura 7).

O maior teor de Mo das Ligas 1 e 2 torna mais favorável à formação das fases intermetálicas difusionais.

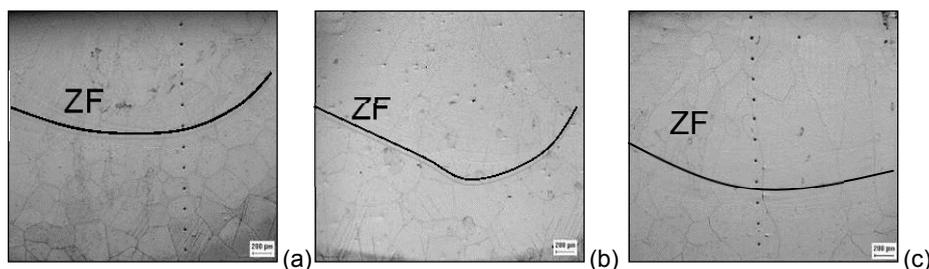


Figura 7. Micrografias da ZF da Liga 2. Aumento 50X. (a) Condição T1; (b) condição T2; e (c) condição T3.

Com o intuito de mostrar os precipitados formados nas diferentes ligas para todos os parâmetros empregados, a Figura 8 apresenta as micrografias das ligas em um aumento de 1.000X. Os precipitados foram observados para as regiões a partir da ZAC em direção ao material de base. Foi verificado que ambas as ligas apresentaram precipitados com morfologia semelhante.

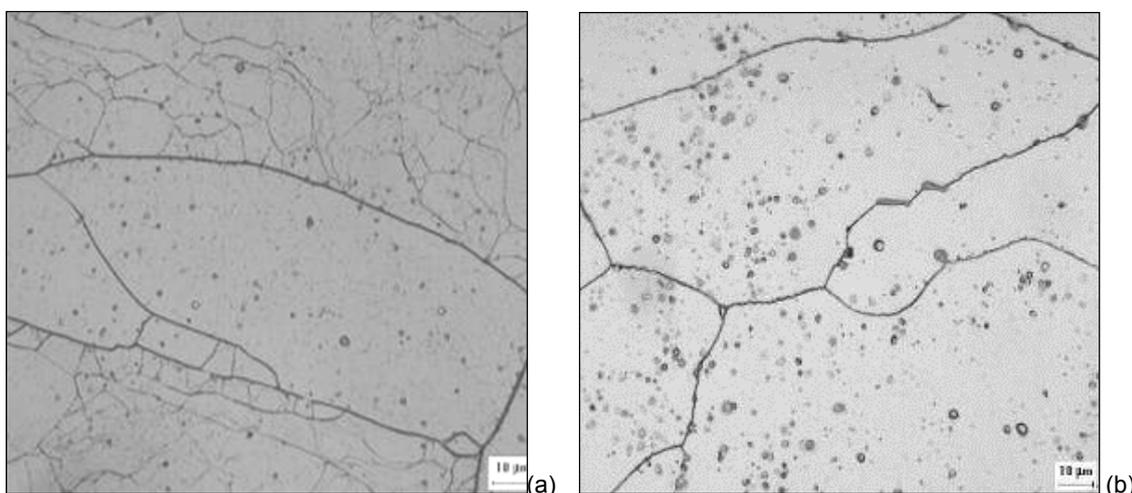


Figura 8. Micrografias das ligas após soldagem autógena. Aumento 1.000X. (a) Liga 1 condição T4; e (b) Liga 2 condição T2.

Destaca-se que não foi observada a presença de defeitos (como trincas, por exemplo) ao longo das diferentes regiões da solda das ligas estudadas, independente da energia empregada.

3.4.3 Caracterização da microdureza

Na Figura 9a é apresentada a relação entre a variação do teor de Mo com a microdureza da ZAC para as diferentes condições empregadas.

Verifica-se que o aumento no teor de Mo é acompanhado do aumento nos valores de microdureza da ZAC das ligas.

Na Figura 9b é possível verificar que a variação da energia de soldagem não apresentou uma mudança significativa na microdureza das ligas em estudo. Observa-se que há uma tendência a queda de dureza somente se compararmos as energias de 8 kJ/cm e 10 kJ/cm.

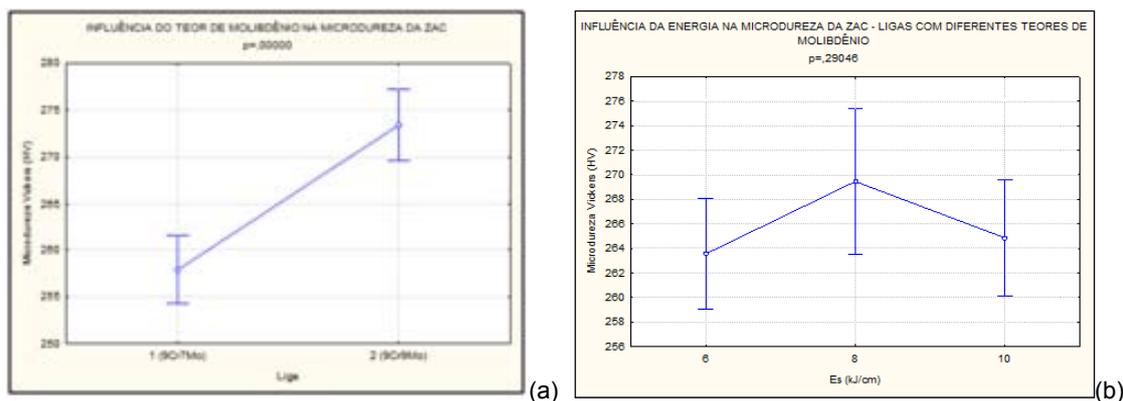


Figura 9. Análise de variância. (a) Influência do teor de Mo na microdureza da ZAC das ligas; e (b) influência da energia na microdureza da ZAC das ligas.

3.5 Soldagem com Adição de Material

3.5.1 Caracterização microestrutural

Os valores médios de TG obtidos a partir de medições na ZAC das Ligas 1 e 2 após a soldagem MIG foram de aproximadamente 1,2 ASTM e 1,6 ASTM. Assim como observado na ZAC das ligas após a soldagem TIG, a ZAC das ligas soldadas pelo processo MIG também apresentaram grão grandes.

A Figura 10 apresenta os gráficos mostrando a influência do teor de Mo e da energia de soldagem no TG da ZAC das Ligas 1 e 2.

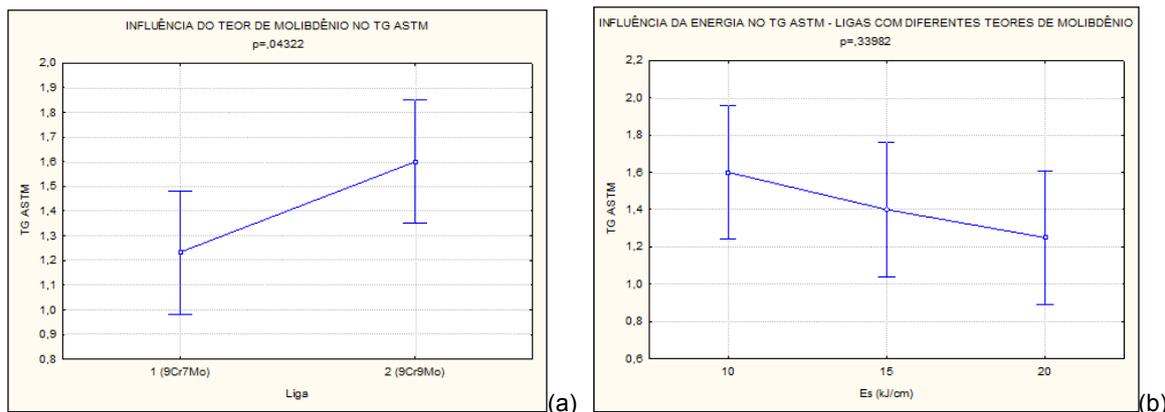


Figura 10. Análise de variância do TG ASTM das ligas. (a) Influência da variação do teor de Mo; e (b) Influência da energia de soldagem.

A análise estatística indicou que a variação de Mo (Figura 10a) não afetou o TG da ZAC de forma significativa para as diferentes condições de soldagem MIG, porém houve uma diminuição do TG da ZAC quando comparados ao TG das ligas solubilizadas, contudo os grãos continuam grandes. No gráfico da Figura 10b podemos observar que a energia de soldagem não afetou estatisticamente o TG da ZAC.

As microestruturas da Liga 1 (Figura 11) e da Liga 2 (Figura 12), soldadas pelo processo MIG, apresentaram microestrutura ferrítica, de grãos grandes com tamanhos diferentes e a presença de alguns precipitados dispersos nos grãos. Esse resultado foi observado para todas as condições (M1, M2, M3, M4 e M5).

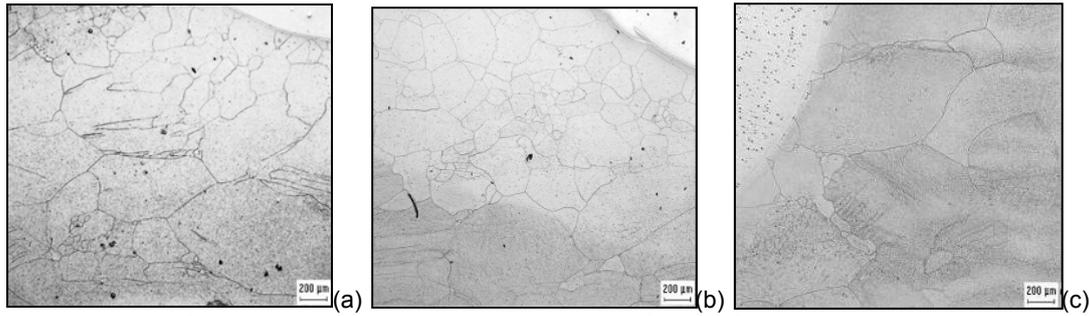


Figura 11. Micrografias da Liga 1 após a soldagem MIG. (a) Condição M1; (b) condição M2; e (c) condição M3. Aumento 50x.

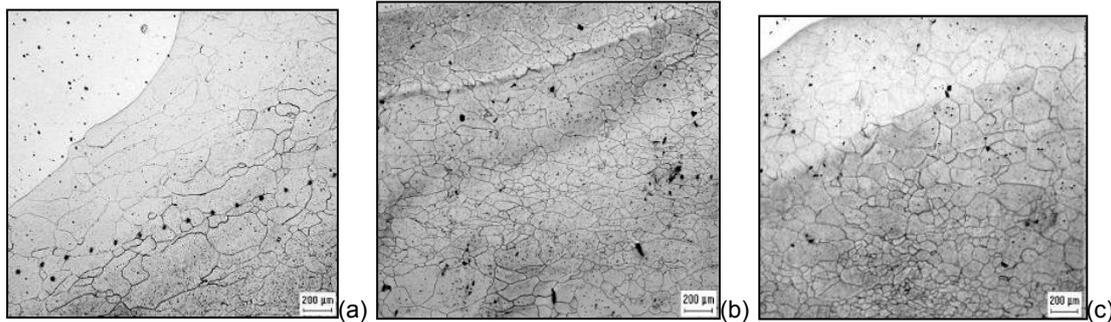


Figura 12. Micrografias da Liga 2 após a soldagem MIG. (a) Condição M1; (b) condição M2; e (c) condição M3. Aumento 50x.

As MO das ligas estudadas com um aumento de 1.000X são mostradas na Figura 13, onde foi possível verificar a presença de precipitados semelhantes em ambas as ligas, independente da condição empregada.

Com exceção aos precipitados observados, nenhum outro defeito, como a presença de trincas, foi observado nos corpos de prova soldado para as diferentes ligas e condições empregadas. Ressalta-se que o maior teor de Mo presentes nestas ligas, comparados ao de ligas ferríticas comerciais, pode favorecer a formação de fases intermetálicas e elevar a dureza destas ligas prejudicando a soldabilidade, contudo os precipitados formados, a princípio não aparecem em grande quantidade, onde estes resultados indicam que estas não apresentam dificuldade na sua soldagem para as condições adotadas.

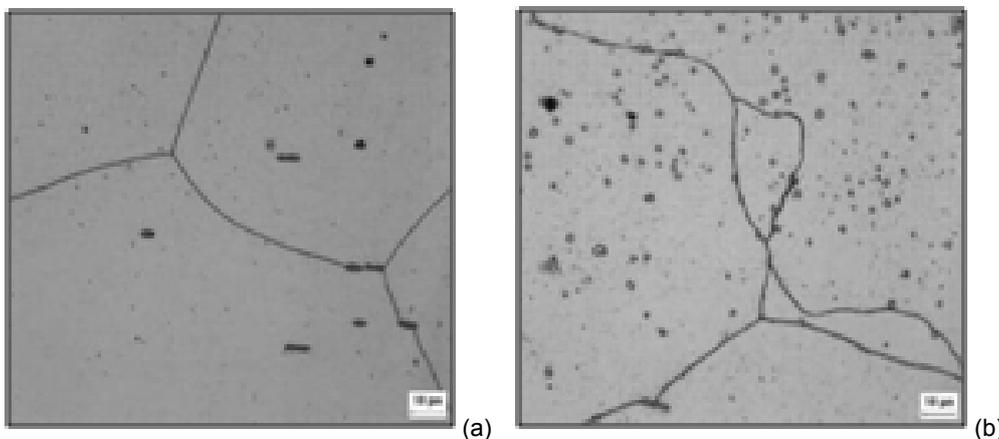


Figura 13. Micrografia dos precipitados das ligas após soldagem MIG. Aumento 1.000X. Ataque: Vilella. (a) Liga 1 - condição M4; e (b) Liga 2 - condição M3.

3.5.2 Caracterização da microdureza

A Figura 14 apresenta os gráficos mostrando a influência do teor de Mo e da energia de soldagem na microdureza das Ligas 1 e 2. Para a soldagem com adição de material, observa-se que o teor de Mo (Figura 14a) não exerceu influência significativa na microdureza das ligas, apesar de haver uma tendência ao aumento da dureza para a Liga 2, a qual possui maior teor de Mo.

A análise de variância da energia de soldagem sobre a microdureza da Liga 1 e da Liga 2 (Figura 14b) mostra que as condições de energia adotadas na soldagem com adição de material influenciaram significativamente no perfil de microdureza das ligas.

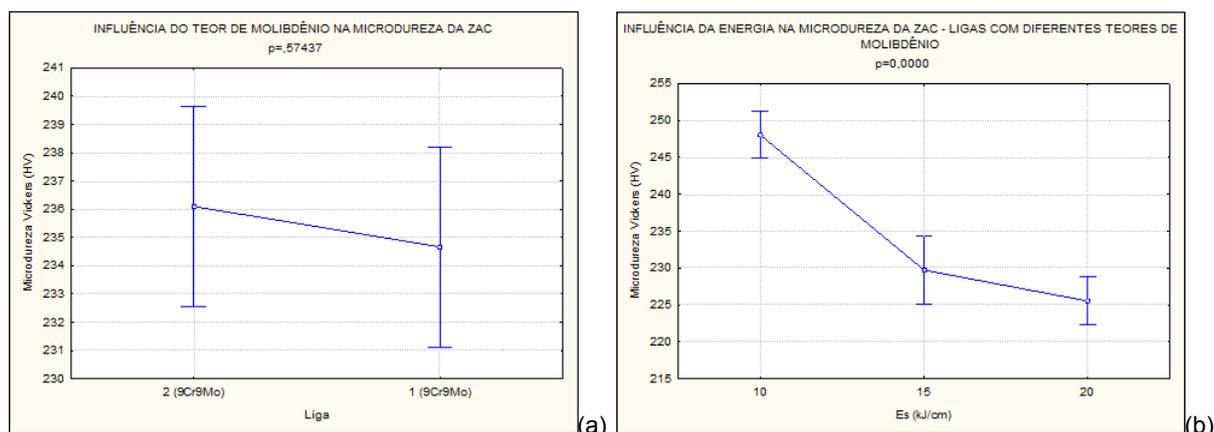


Figura 14. Análise de variância da Microdureza das ligas. (a) Influência da variação do teor de Mo; e (b) influência da energia de soldagem.

4 CONCLUSÕES

- Os valores de propriedades mecânicas apresentados pelas ligas estudadas podem favorecer ao seu emprego em condições com temperaturas elevadas;
- a princípio, as ligas apresentaram uma boa soldabilidade, não havendo a formação de defeitos, considerando a variação de corrente e de velocidade de soldagem, tanto para o processo TIG como para o processo MIG;
- as soldagens realizadas com os diferentes parâmetros empregados não resultaram em mudanças prejudiciais, tanto na microestrutura quanto na dureza das ligas estudadas, apesar do alto percentual de Mo presentes nas ligas; e
- considerando-se a importância estratégica do refino de óleos cada vez mais pesados, este trabalho buscou desenvolver novos aços ferríticos, com variações nos teores de Cr e Mo que resultem em maior resistência a corrosão naftênica e que possam atender as diferentes condições de operação dos equipamentos empregados no setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Caracterização de Materiais (Lacam) e ao Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará (Engesolda) pela realização dos experimentos, ao Laboratório de Materiais (LMAT) e ao Grupo de Inspeção e Análise de Falhas (GIAF) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, além do CNPQ, Funcap e Petrobras pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 PÉREZ, G. J. A. Caracterização das Fases Presentes em Depósito de Níquel ER-NiCrMo-3 em Tubos de Aço de 9Cr 1Mo Usados em Fornos de Refinária de Petróleo. 2005. 129p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- 2 GOMES, N.L.; FIGUEIREDO, N. C.; SABOIA, F. H. C.; GUIMARÃES, R. F.; ABREU, H.F.G. “Efeito da variação da corrente na soldagem de ligas Fe-Cr-Mo com diferentes teores de molibdênio”. In: V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Profissional e Tecnológica – CONNEPI, Maceió - AL - 2010.
- 3 SOLOMON, H.D. Duplex stainless steels – a tale of two phases. In: Duplex stainless steels – conference proceedings. ASM Metal Park Ohio, p. 693 – 756, 1982.
- 4 CUNHA, B. R. M. da. “Soldabilidade Da Nova Geração De Aços Ferríticos Cr-W Resistentes A Altas Temperaturas”. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.
- 5 WIEGAND, H.; DORUK, M. "Einflub von Kohlenstoff und molybdän auf die Ausscheidungsvorgänge, besonders auf die Bildung intermetallischer Phasen in austenitischen Chrom-Nickel-Stählen," pp. 559-566, 1992.
- 6 PEREZ, N. "Electrochemistry and Corrosion Science," vol. 1, pp. 304 e 335, 2004.
- 7 LEE, W. H., SHIUE, R. K., CHEN, C. "Mechanical properties of modified 9Cr-1Mo steels welds with notches". Materials Science and Engineering, A356, pp. 153-161, 2003.
- 8 JUNHUA, K.; LIN, Z. Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel. Materials & Design, 2004.
- 9 WU, X. Q.; JING, H. M.; ZHENG, Z. M.; YAO, W.K. “Resistance of Mo-bearing stainless-steel coating to naphthenic acid corrosion and erosion-corrosion”. Corrosion Science 46, p1013-1032, 2004.
- 10 VOORT, G.F.V.; JAMES, H.; MILLS, M. K.; DAVIS, J.R.; DESTEFANI, J. D.; DIETERICH, D. A.; CRANKOVIC, G. M.; FRISSELL, M.J. (Eds.). ASM Handbook: “Metallography and Microstructures”. Vol, 9, USA: ASM International, p. 284, 1992.
- 11 NBR 6152. Materiais metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente. Dezembro de 2002.
- 12 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for tension testing of metallic materials. E8-03, USA, 2003.
- 13 NBR 6157. Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados. Dezembro de 1980.
- 14 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. E 23 – 96. USA, 2004.
- 15 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for microhardness of materials. E384-89, USA, 1990.
- 16 GUIMARÃES, R. F.,” Efeito do teor de molibdênio na microestrutura de juntas soldadas em ligas Fe-Cr-Mo”. Tese de Doutorado, UFC, 2011.
- 17 SEDRICKS A.J.: Corrosion of Stainless Steels. Wiley-Interscience Publications, second edition, New York, USA, 1996.
- 18 BARBOSA, R. P.; CAMPOS, S. G. S.; FONSECA, M. A. “Recristalização de um aço inoxidável austenítico/ Uma abordagem estatística”. Revista Online Unileste. Vol 2, MG – Jul./Dez.2004.
- 19 SABOIA, F. H. C.; GOMES, F. H. F.; GUIMARÃES, R. F.; ABREU, H.F.G. “Efeito dos diferentes teores de molibdênio nas propriedades mecânicas de ligas ferríticas com 9% de Cr”. In: V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Profissional e Tecnológica – CONNEPI, Maceió - AL-2010.
- 20 EDSTRÖM, H. Q.; LJUNDBERG, L. “Rost- und säurebeständige Chrom-Nickel-Stäle mit max. 0,030% Johlenstoff als Kontruktionsmaterial für die chemische Industrie”. Werkst. u. Korrosion 15, 743-753, 1964.

- 21 ALAMO, A., BERTIN, J.L., SHAMARDIN, V. K., WIDENT, P. "Mechanical properties of 9Cr martensitic steels and ODS-FeCr alloys after neutron irradiation at 325 °C up to 42 dpa". Journal of Nuclear Materials, pp. 54 - 59, 2007.
- 22 GUIMARÃES, R. F., "Avaliação do Desempenho da Soldagem do Aço AISI 444 em Aplicações de Revestimento de Torres de Destilação". Dissertação de Mestrado, UFC, 2005.
- 23 FARIA, R. A., BRANDI, S. D., "Efeito dos Teores de Cr e Mo na Tenacidade de ligas Inoxidáveis Ferríticas Estabilizadas Soldadas pelo Processo MIG", XXVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Campinas- SP, 2001.
- 24 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for determining average grain size. E112-96, USA, 2004.