



Avaliação das propriedades mecânicas em ligas ferríticas com 5% de Mo e diferentes teores de Cr

Francisco Halyson Ferreira GOMES¹, Fernando Henrique da Costa SABÓIA², Rodrigo Freitas GUIMARÃES³, Venceslau Xavier de Lima FILHO⁴, Hamilton Ferreira Gomes de ABREU⁵

1. *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: halysongomes@yahoo.com.br*
2. *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: fernandocosta.ifce@gmail.com*
3. *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: rodrigofg@ifce.edu.br*
4. *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: venceslau@ifce.edu.br*
5. *Universidade Federal do Ceará. Campus Universitário do Pici – Bloco 702 – Pici – Fortaleza/CE - CEP 60.455-760 – Fone: (85) 3366-9644 – Fax: (85) 3366-9969, e-mail: hamilton@ufc.br*

RESUMO

Os aços ferríticos possuem ampla aplicabilidade em equipamentos de usos diversos pela indústria, sendo exigido dos mesmos uma elevada resistência a corrosão sem a perda das suas propriedades mecânicas. Este trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas de ligas ferríticas com teor de Mo superior ao das ligas comerciais. Para isto foram fabricadas três ligas não comerciais com concentrações diferentes de cromo (Cr) 17%, 15% e 9%, denominadas A1, B1 e E1, respectivamente e um mesmo teor de Mo, igual a 5%. As ligas, na condição de solubilizada, inicialmente foram caracterizadas por meio de microscopia ótica (MO) e medição da dureza. Em seguida foram retiradas amostras para a confecção de corpos de prova a fim de realizar a caracterização das propriedades mecânicas, a temperatura ambiente, através da realização de ensaios de tração e impacto Charpy-V. Também foram realizados ensaios de impacto Charpy-V a temperatura superior à ambiente. Os resultados mostraram que as três ligas estudadas apresentam um comportamento frágil a temperatura ambiente. A temperatura exerce forte influência na energia absorvida e no comportamento dúctil-frágil. A liga com maior teor de Cr resultou em uma maior dureza. Os diferentes teores de Cr não alteraram de forma significativa as propriedades obtidas após os ensaios de tração.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas, Cromo, Temperatura.

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas enfrentados pela indústria petroquímica brasileira é a corrosão sofrida pelos equipamentos usados na extração, processamento e armazenamento do petróleo. Este problema acontece principalmente devido a alta concentração de acidez do petróleo e as altas temperaturas de trabalho. Dentre esses equipamentos que sofrem o desgaste da corrosão têm-se as torres de destilação, fabricadas com aço ASTM A516GR-60 com a aplicação de revestimento interno de aço inoxidável ferrítico (AISI 410S ou AISI 405) e os dutos de fornos de destilação, fabricados com aço ferrítico do tipo 9Cr-1Mo, segundo Lachermarcher *et al.* (2002). O material usado na fabricação destes equipamentos foi desenvolvido para o petróleo leve que possui características muito diferentes do petróleo pesado que atualmente está sendo processado. O reparo de um equipamento, danificado pela ação corrosiva do petróleo, pode exigir a parada do mesmo comprometendo o ciclo de produção da indústria, acarretando assim aumento nos custos.

Uma alternativa para resolver este problema seria o aumento do percentual de molibdênio (Mo) para melhorar a resistência à corrosão destas ligas. Segundo Solomon (1982), elementos de liga são introduzidos nos materiais com o objetivo de aumentar a resistência a corrosão levando a estabilização de uma ou outra fase. O Mo é principal elemento responsável pelo aumento de resistência à fluência em aços Cr-Mo, quando está presente em solução sólida ou em precipitados. Este elemento de liga aumenta a resistência à tração e a dureza do aço (PEREZ, 2004), contudo, segundo Lee *apud* Junhua *et al.* (2004), o aumento da taxa de deformação é menor que o aumento da taxa de resistência à tração.

Uma vez que as ligas estudadas são experimentais é necessário que elas passem por uma série de estudos para uma possível aplicação: propriedades mecânicas, soldabilidade, comportamento corrosivo, verificação da aplicabilidade em condições de operação e análise dos custos dos custos de fabricação. Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas destas ligas, denominadas A1, B1 e E1, com teor de Mo (5%) superior as das ligas comerciais e diferentes concentrações de Cr (17%, 15% e 9%).

2. METODOLOGIA

A composição química das ligas estudadas é apresentada na Tabela 1. As ligas passaram pelo processo de laminação a quente a uma temperatura de 1000 °C. Em seguida foram solubilizadas na temperatura de 1090 °C, mantidas nesta temperatura por um período de 15 minutos, seguido de um resfriamento rápido em água até atingir a temperatura ambiente.

Tabela 1. Composição química das ligas estudadas

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
A1	0,031	0,3	0,39	17	5
B1	0,031	0,3	0,38	15	5
E1	0,030	0,37	0,34	9	5

A partir das ligas solubilizadas foram retiradas amostras para análise de microestrutura por microscopia ótica (MO), medição de dureza, ensaios de tração e impacto Charpy-V. As medições de microdureza Vickers foram realizadas seguindo a norma ASTM E384-89. Para cada liga foi retirada uma amostra para medição de dureza, sendo realizado um total de sete medidas e descartados a maior e a menor medição.

Corpos de prova de seção quadrada com dimensões de 6 mm de espessura, 19 mm de largura e comprimento paralelo de 40 mm foram usinados na direção de laminação para a realização de ensaios de tração, à temperatura ambiente (22 °C), com base nas normas NBR 6152 e ASTM E 8-03. Para os ensaios de tração foram confeccionados três corpos de prova para cada liga estudada.

Foram confeccionados corpos de prova, usinados na direção de laminação para a realização de ensaios de impacto Charpy-V realizado a temperatura ambiente (22 °C), com dimensões de 5 mm x 10 mm x 55 mm, de acordo com a norma NBR 6157 e ASTM E 22-96. Para cada liga estudada foram confeccionados três corpos de prova para os ensaios de impacto. Os ensaios de impacto foram realizados em condições de temperatura acima de 22 °C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser verificado na Figura 1a, na Figura 1b e na Figura 1c têm-se uma microestrutura característica destas ligas, do tipo ferrítica e, ainda, a presença de alguns pequenos precipitados, provavelmente formados devido à presença de carbono nestas ligas.

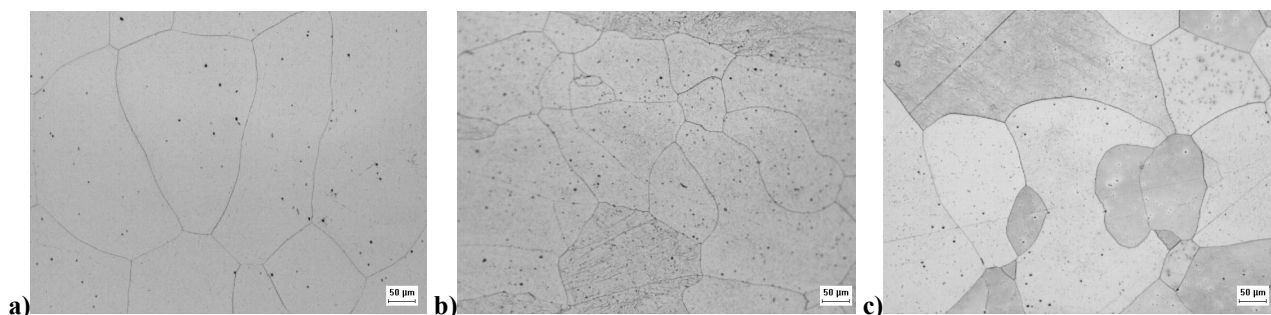


Figura 1. Micrografia das ligas após laminação a quente e solubilização. Ataque: Vilella. Aumento: 100X. a) Liga A1. b) Liga B1. c) Liga E1.

Segundo Souza (2006), a dureza de um aço pode ser aumentada pela adição de Mo em solução sólida. A Figura 2 mostra um gráfico comparativo das durezas médias entre as ligas A1, B1 e E1, na condição de solubilizadas. As barras horizontais representam os valores mínimos e máximos da dureza para cada liga estudada. A Liga A1 apresentou valor de dureza em torno de 252 HV, a Liga B1 229 HV e a a Liga E1 196 HV. Quando as ligas A1, B1 e E1 são comparadas com uma liga comercial, por exemplo, o aço AISI 444, cuja dureza é de 182 HV e tem composição semelhante a das ligas experimentais A1 e B1, verifica-se dureza superior para as ligas estudadas, mostrando o efeito endurecedor do aumento do percentual de Mo (GUIMARÃES, 2005). Percebe-se, pela Figura 2, que um aumento na concentração de Cr acarreta um aumento na dureza do material.

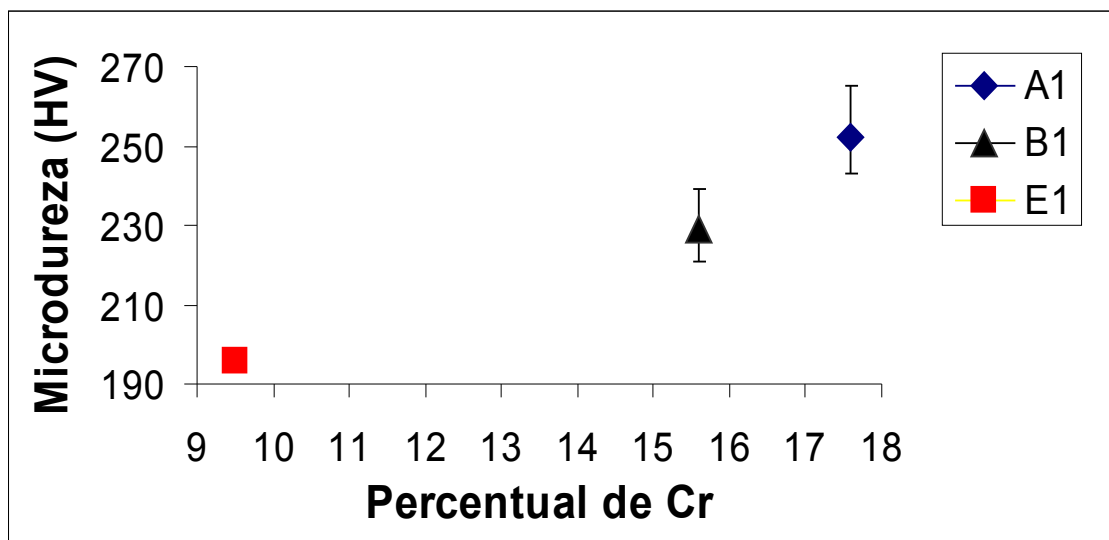


Figura 2. Valores máximo, médio e mínimo da dureza da Liga A1, da Liga B1 e da Liga E1.

A adição de Mo, segundo Junhua et al. (2004), favorece ao aumento da resistência mecânica das ligas de aço. Os resultados obtidos após ensaios de tração com amostras das ligas E1, B1 e A1 são apresentados na Tabela 2, na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. É possível verificar que a liga que possui o maior teor de Cr, Liga A1, apresentou uma alongamento médio maior que as demais ligas estudadas.

Quando são comparados os demais resultados dos ensaios de tração é possível verificar que não houve variação significativa nos valores de Limite de Escoamento, Módulo de Elasticidade, Limite de Resistência à Tração e de Ruptura, indicando que as propriedades de tração não sofrem alteração para os diferentes percentuais de Cr das ligas estudadas.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da Liga E1 após os ensaios de tração.

Ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	474,01	83.643,47	511,64	513,15	1,09
2	450,67	81.770,20	477,96	478,08	1,23
3	493,19	82.669,57	511,46	514,21	0,81

Tabela 3. Propriedades mecânicas da Liga B1 após os ensaios de tração.

Ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	421,42	88.328,85	474,25	474,25	1,82
2	465,79	81.294,84	480,86	481,34	0,88
3	457,42	93.709,65	533,96	554,62	7,90

Tabela 4. Propriedades mecânicas da Liga A1 após os ensaios de tração.

Ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	391,94	81.431,45	540,41	541,05	10,36
2	472,33	90.859,31	572,50	573,44	7,54
3	463,67	82.854,63	555,85	557,05	6,57

A Figura 3 mostra o resultado dos ensaios de impacto Charpy-V realizados na temperatura de 22 °C. Verifica-se que, da mesma forma que fora observado para os ensaios de tração, a diferença no teor de Cr entre as ligas não resultou em uma diferença significativa nos valores de energia absorvida. Os valores de energia absorvida apresentados para as ligas estudadas, à temperatura de 22 °C, foram baixos.

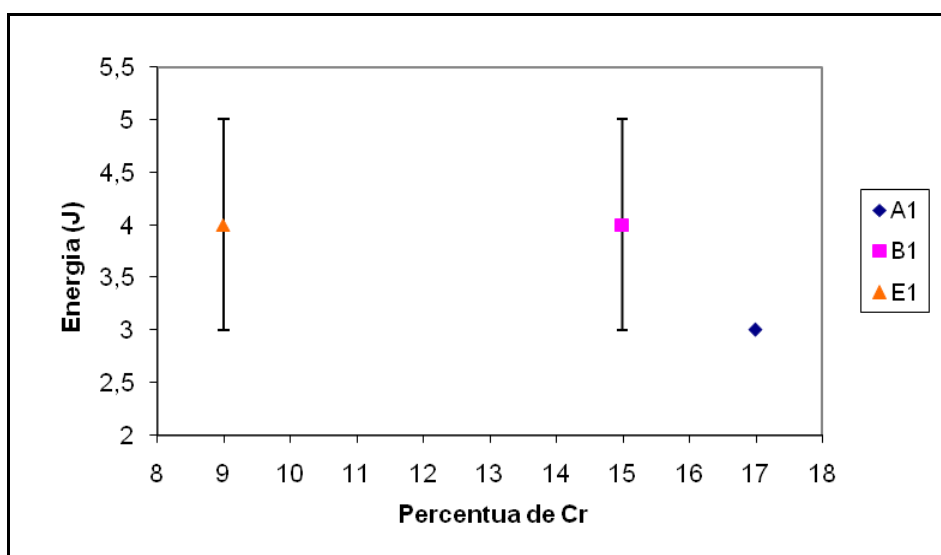
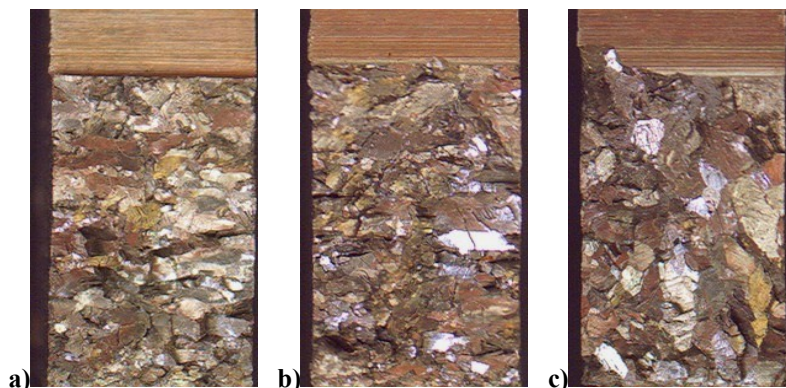


Figura 3. Valores obtidos do ensaio de impacto Charpy-V das ligas A1, B1 e E1 realizadas em temperatura 22°C.

O aspecto da fratura das ligas estudadas após ensaio de impacto Charpy-V a temperatura de 22 °C é apresentado na Figura 4, onde é possível observar um aspecto brilhoso para ambas as ligas estudadas.

Os baixos valores de energia absorvidas pelas ligas após o ensaio de impacto Charpy-V e o aspecto das fraturas observadas indicam que estas ligas apresentam um comportamento semelhante, do tipo frágil, para as condições empregadas nestes ensaios.



Figuras 4. Microscopia eletrônica de varredura com aumento de 200x. a) Aspecto da fratura da Liga A 1. b) Aspecto da fratura da Liga B1. c) Aspecto da fratura da liga E1.

Uma vez que as ligas estudadas apresentaram comportamento frágil à temperatura ambiente (22 °C), optou-se por realizar ensaios de impacto Charpy-V a uma temperatura superior a 22 °C. A escolha da temperatura foi feita com base em trabalhos que estudaram o comportamento de um aço ferrítico quando submetido a ensaios de impacto a diferentes temperaturas (GIMARÃES, 2005), onde o autor verificou que acima de 60 °C o aço estudado apresenta um comportamento dúctil.

Desta forma foi utilizada uma amostra da liga E1 para a realização do ensaio de impacto na temperatura de 60 °C. O resultado obtido mostrou que a liga E1 apresentou um aumento considerável na energia absorvida, com um valor de 51J. O aspecto da fratura, mostrado na Figura 5 indica um comportamento do tipo dúctil para o ensaio realizado, justificado pelo aspecto fosco e fibroso da fratura e pelo aumento considerável na energia absorvida.



Figura 5. Macrografia da fratura da liga E1 a temperatura de 60 °C.

Já a Liga B1 quando ensaiada na temperatura de 60 °C não rompeu por completo, indicando o comportamento dúctil da liga nesta temperatura. Quando foi realizado o ensaio a 60 °C para a Liga A1, verifica-se um aumento na energia absorvida, 23J, apresentando uma fratura com aspecto brilhoso e algumas poucas regiões com aspecto fosco, como é mostrada na Figura 6a. A partir disso, foi realizado o ensaio de impacto Charpy-V em outra amostra da Liga A1 na temperatura de 70 °C. A energia absorvida nesta temperatura foi de 32 J e verificando a Figura 6b observa-se uma fratura dúctil e uma pequena região com aspecto brilhoso, havendo uma inversão com o que foi observado na Figura 6a.

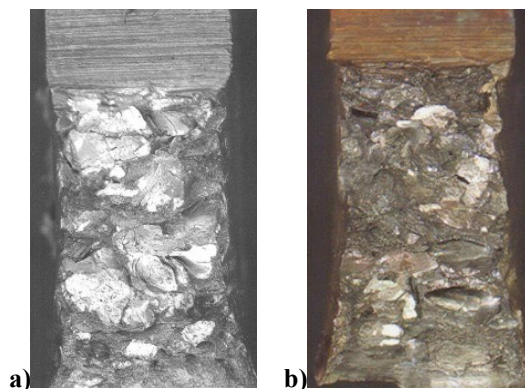


Figura 6. Macrografia da fratura da liga A1. a) A temperatura de 60 °C. b) A temperatura de 70 °C.

Os resultados dos ensaios de impactos nas temperaturas de 60 °C, Liga E1 (Figura 5) e A1 (Figura 6a), mostram o efeito do Cr na temperatura de transição dúctil-frágil, onde foi necessário uma maior temperatura para que a Liga A1 apresentasse um comportamento dúctil.

4. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos foi possível concluir que:

- Os resultados obtidos confirmam o Mo e o Cr como um elemento endurecedor e fragilizante.
- A liga com maior teor de Cr apresentou maior dureza que as de menor teor de Cr.
- As ligas apresentaram baixa capacidade de deformação.
- A temperatura ambiente (22 °C) as ligas apresentaram baixos valores de energia absorvida e um comportamento do tipo frágil.
- Existem indícios de que as ligas apresentam um comportamento do tipo dúctil, para temperaturas acima de 60 °C.
- Foi possível verificar o efeito endurecedor do Cr, quando comparados os ensaios de impactos da Liga A1 e E1.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da UFC pela realização dos experimentos, ao Grupo de Inspeção e Análise de Falhas (GIAF) do IFCE Campus Maracanaú, além da CAPES e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. E 23 – 96. USA, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for tension testing of metallic materials**. E8-03, USA, 2003.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for microhardness of materials**. E384-89, USA, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6152**: Materiais metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente. Dezembro de 2002.

NBR 6157: Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados. Dezembro de 1980.

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.

JUNHUA, K. et al. **Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel**. Materials & Design, 2004.

LACHERMACHER, M. et al. **Emprego de revestimento para proteção interna em dutos**, Conferência sobre tecnologia de equipamentos, 2002.

PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion Science**. Norwell; Kluwer Academic Publishers pp. 304 e 335, 2004.

SILVA, C.C. et al. **Estudo da sensitização causada pelo ciclo térmico soldagem no aço inoxidável superferrítico AISI 444**. Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás, 2005.

SOLOMON, H.D.D.J., T.M, **Duplex stainless steels – a tale of two phases**. In: Duplex stainless steels – conference proceedings. ASM Metal Park Ohio, 1982: p. 693 – 756.

SOUZA, S. A., **Composição químicas dos aços**, São Paulo; Edgard Blücher, 2006.

Petrobrás Estratégia Corporativa 2020. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia-corporativa/>>. Acesso em 30 dez 2009.