

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM LIGAS FERRÍTICAS COM 5% DE Mo E DIFERENTES TEORES DE Cr

Francisco Halysom Ferreira Gomes(*) Fernando Henrique da Costa Sabóia(**)
Rodrigo Freitas Guimarães (***) Venceslau Xavier de Lima Filho(****) Hamilton Ferreira
Gomes de Abreu(*****)

RESUMO

Os aços ferríticos possuem ampla aplicabilidade em equipamentos da indústria petrolífera, sendo exigido dos mesmos uma elevada resistência a corrosão sem a perda das suas propriedades mecânicas; portanto o objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de ligas ferríticas, com teor de Mo superior ao de ligas comerciais. Para isto, foram fabricadas três ligas experimentais com diferentes concentrações de Cr; 17%, 15% e 9%, denominadas A1, B1 e E1, respectivamente, e uma mesma quantidade de Mo, igual a 5%. As ligas, na condição de solubilizadas, 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 permitir a caracterização das propriedades mecânicas, a temperatura ambiente, por meio da realização de ensaios de tração e Charpy-V. Foram realizados também ensaios Charpy-V em temperatura superior à temperatura ambiente. Os resultados mostraram que as três ligas estudadas apresentam um comportamento frágil a temperatura ambiente e que a temperatura exerce forte influência na energia absorvida e no comportamento dúctil-frágil. Verificou-se também que a liga com maior concentração de Cr, Liga A1, apresentou maior dureza. Os diferentes teores de Cr empregados não alteraram de forma significativa as propriedades obtidas após os ensaios de tração; contudo, ao comparar as propriedades mecânicas das ligas experimentais com ligas comerciais, foi verificado o aumento destas propriedades para as ligas experimentais associado, aos teores de Cr e Mo empregados.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades mecânicas. Aços Ferríticos. Cromo. Tamanho de grão.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN ALLOYS WITH FERRITIC 5% Mo AND FROM DIFFERENT LEVELS OF Cr

ABSTRACT

The ferritic steels have broad applicability for various uses equipment industry, with the requirement of such a high resistance to corrosion without the loss of their mechanical properties. However, the aim of this study is to evaluate the mechanical properties of ferritic alloys with Mo content higher than that of commercial alloys. To this were not made three commercial alloys with different concentrations of chromium (Cr) 17%, 15% and 9%, called A1, B1 and E1, respectively, and the same amount of Mo equal to 5%. Alloys, provided solubilized initially were characterized by optical microscopy (OM) and hardness measurement. Then samples were taken for the preparation of samples to allow the characterization of mechanical properties at room temperature, by performing tensile and Charpy-V. Also, tests such as Charpy-V temperature above the environment. The results showed that the three alloys studied showed a brittle behavior at room temperature and that temperature exerts a strong influence on the energy absorbed and the ductile-brittle behavior. It was also found that the alloy with higher concentrations of Cr, A1 League, showed higher hardness. Different quantities of Cr did not change significantly the properties obtained after the tensile test.

KEYWORDS: *Mechanical properties, Ferritic Steels, Chromium, Grain size*

(*) Professor efetivo da rede pública de ensino do estado do Ceará, aluno do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: halysongomes@yahoo.com.br

(**) Aluno do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, e-mail: fernandocosta.ifce@gmail.com

(***) Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais pela UFC, prof. efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* de Maracanaú, e-mail: rodrigofg@ifce.edu.br

(****) Mestre em Ciências e Engenharia dos Materiais pela Universidade de Aveiro – Portugal, prof. efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* de Maracanaú, e-mail: venceslau@ifce.edu.br

(*****) Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ, e-mail: hamilton@ufc.br

1 INTRODUÇÃO

O petróleo que atualmente é extraído e processado pela indústria petroquímica, brasileira, possui particularidades que o classificam como petróleo pesado, pode-se citar como uma dessas características o alto nível de acidez devido às altas concentrações de sulfetos (PEREZ, 2004). Ao associar esta característica às altas temperaturas de trabalho dos equipamentos que fazem o processamento deste petróleo cria-se um fator problemático para a indústria, a aceleração do processo de corrosão dos equipamentos, pois segundo Babaian-Kibala *et al.* (1993) quando o petróleo é submetido a temperaturas entre 230 °C e 400 °C, é maior a probabilidade de ocorrer corrosão naftênica. Dentre os equipamentos que sofrem ataque corrosivo é possível citar as torres de destilação, fabricadas em aço ASTM A516GR-60 e que possuem revestimento interno de um aço inoxidável ferrítico, AISI 410S ou AISI 405 (LACHERMARCHER *et al.*, 2002). O reparo de um equipamento danificado pela ação corrosiva do petróleo exige a parada do mesmo, comprometendo, assim, o ciclo de produção da indústria, o que acarreta um aumento nos custos.

O processamento de petróleo de alta acidez é economicamente atrativo, o que torna fundamental a procura por novos materiais para fabricar componentes que suportem elevados índices de acidez na extração e processamento do petróleo. Assim, considerando a importância do refino de óleos pesados para a economia brasileira, torna-se fundamental o desenvolvimento de novos aços ferríticos, a partir do aço AISI 444 e do aço Cr-Mo, com variações nos teores de Cr e Mo, que resultem em maiores tenacidade e resistência à corrosão naftênica (GUIMARÃES, 2005).

Uma alternativa para resolver este problema seria o aumento do percentual de Mo para melhorar a resistência à corrosão destas ligas. Ressalta-se que aços inoxidáveis ferríticos e Cr-Mo com alto teor de Mo (superior a 4%) não estão disponíveis no mercado. Segundo Solomon (1982) elementos de liga são introduzidos nos materiais com o objetivo de aumentar a resistência à corrosão levando a estabilização de uma ou outra fase. O Mo é o 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.

Considerando-se a importância estratégica do refino de óleos cada vez mais pesados, torna-se fundamental o estudo do desenvolvimento de novos aços ferríticos, a partir do aço AISI 444 e do aço Cr-Mo, com variações nos teores de Cr e Mo que resultem em maiores tenacidade e resistência à corrosão naftênica (GUIMARÃES, 2005).

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 de fabricação.

Deduz-se que, o objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas das ligas experimentais, denominadas A1, B1 e E1, com teor 5% Mo, percentual superior ao encontrado em ligas comerciais, e diferentes concentrações de Cr (17%, 15% e 9%).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades Mecânicas dos Aços Ferríticos

Os aços inoxidáveis, ferríticos, são, segundo Modenesi (2008) ligas Fe-Cr, com teor de Cr, em geral, entre 11 e 30%, e um teor de carbono relativamente baixo, em geral inferior a 0,12%. Estes aços não são temperáveis e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação adequada de trabalho mecânico e recozimento. Se expostos por tempo prolongado a temperaturas em torno de 500°C, estes aços podem ser fragilizados pela precipitação de intermetálicos. No estado recozido, sua ductilidade e tenacidade à temperatura ambiente são geralmente satisfatórias. Apresentam boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive a alta temperatura, além de uma estrutura predominantemente ferrítica em qualquer temperatura até a sua fusão.

Conforme Oakey *et al. apud* Cunha (2006) os aços ferríticos Cr-Mo, bem como os aços austeníticos e as ligas de níquel encontram uma ampla aplicabilidade em plantas de produção energética, refino e processamento do petróleo além da utilização em vasos de pressão de alta temperatura. Nas aplicações em altas temperaturas até 620°C, os aços ferríticos apresentam a melhor relação custo/benefício. Entre 620°C e 670°C, em ambientes onde a resistência à corrosão torna-se preponderante sobre a resistência à fluência, torna-se viável a aplicação dos aços austeníticos (apesar do alto coeficiente de expansão térmica) e acima de 670°C somente as ligas de níquel de alta resistência atendem às especificações de resistência mecânica e de resistência à fluência.

De acordo com a resistência a ruptura por fluência para um padrão de 10⁵ h a 600°C os aços ferríticos são classificados em 4 gerações, a primeira geração (60MPa/8.7ksi, 1940-1970), a segunda geração (100MPa/15ksi, 1980's), a terceira geração (140MPa/20ksi, 1990's) e a quarta geração (180MPa/26ksi) (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

A primeira geração tem, como representantes, os aços T-22, T-9 (9-12CrMo). A liga 2,25Cr-1Mo (T-22) continua sendo a mais utilizada em aplicações, envolvendo altas temperaturas. A partir do início da década de 50, alguns componentes, fabricados com este

aço, têm apresentado resultados insatisfatórios de comportamento em fluência e corrosão. Com a evolução dos estudos dos aços Cr-Mo, novas ligas foram desenvolvidas como forma de se superar as limitações do aço 2,25Cr-1Mo, o que deu origem a variadas famílias de aços modificados, como a dos 9% Cr e 12% Cr (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

O desenvolvimento progressivo dos aços ferríticos, em função da resistência à fluência a 600°C, ocorre de maneira marcante a partir da segunda geração, devido à adição de elementos de liga com o objetivo de aumentar a resistência à fluência, buscando manter, por meio da formação de precipitados, as exigências de limite de escoamento e tenacidade. A mais importante contribuição da segunda geração de aços ferríticos foi a otimização da composição química (com relação aos teores de C, V e Nb) resultando no desenvolvimento de aços como o HCMS ou T-23, ASME T-91 e HCM12 (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

A terceira geração foi representada pelo HCM12A e ASME T-92 e, caracterizada pelo baixo teor de carbono, a adição de W e as estruturas martensíticas, com precipitados MX, que conferem soldabilidade e *performance* (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

Para a quarta geração, em desenvolvimento, a tensão de ruptura em fluência esperada para 10⁵ h a 600°C é de 180MPa, que tem sido alcançada em laboratório por meio dos aços NF12 e SAVE12 pela adição de W e Co (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

Estes aços apresentam coeficiente de expansão térmica similar ao dos aços doces, tendo, portanto, menor tendência à distorção; apresentam, contudo, sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão da região da solda, devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira, à precipitação de carbonetos e nitretos e à formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita. Estes problemas limitam, para a maioria dos aços ferríticos, a utilização da soldagem para aplicações de pequena responsabilidade. Nestes casos, para algumas aplicações, pode-se utilizar metal de adição austenítico para restringir estes problemas à ZTA da solda. Novos tipos de aços inoxidáveis, ferríticos, com extrabaixo teor de elementos intersticiais (C+N < 0,03%) e adições de Nb ou Ti (elementos que se ligam fortemente aos elementos intersticiais reduzindo a sua influência negativa durante a soldagem) têm desenvolvidos. Estes aços apresentam um comportamento melhor para a soldagem e têm sido utilizados em aplicações que envolvem soldagem como tubulações, trocadores de calor e sistemas de escapamento de automóveis. (MASUYAMA *et al. apud* CUNHA, 2006).

2.1.1 Aços Cr-Mo

Estes aços foram desenvolvidos para aplicações a temperatura elevada, sendo muito usados em tubulações que operam a alta pressão e temperaturas entre cerca de 370 e

600°C. Nesta faixa de temperatura, os aços Cr-Mo mantêm uma resistência mecânica, adequada, além de não sofrerem problema de fluência nem de fragilização, após longos períodos de uso. São comumente usados na condição normalizada ou temperada e revenida com a resistência mecânica à temperatura ambiente variando de 590 a 940 MPa. As composições comuns destes aços incluem: 1%Cr-1/2%Mo, 1-1/4%Cr-1/2%Mo, 2%Cr-1/2%Mo, 2-1/4%Cr-1%Mo e 5%Cr-1/2%Mo (MODENESI, 2008).

Segundo Cunha (2006) a utilização de aços ferríticos Cr-Mo na construção de equipamentos que operam em condições extremas de temperatura e pressão é satisfatória desde 1940. Como exemplo de equipamentos construídos com estas ligas, pode-se citar vasos de pressão e geradores de vapor.

O cenário energético, mundial, para os próximos dez anos, segundo Cunha (2006) aponta um aumento na produção de energia, com elevados índices de eficiência energética e produção mínima de poluentes. Para isto, espera-se que, nos próximos anos, seja colocada em operação uma grande quantidade de vasos críticos de pressão, que operam a temperatura de 600 °C e pressão de 24 MPa. Com isto surge a necessidade de projetar novos aços capazes de suportar essas condições e que abranjam algumas características específicas: resistência a fluência, resistência mecânica, resistência a ambientes corrosivos e tenacidade.

Nas plantas petroquímicas e de geração de energia, as opções de ligas metálicas que apresentam desempenho a um custo adequado nas condições de elevada temperatura e pressão são limitadas. As ligas disponíveis comercialmente para os componentes de equipamentos de geração de vapor, tais como vasos de pressão, são especificados de acordo com os valores das temperaturas e pressões máximas de projeto (CUNHA, 2006).

Os aços Cr-Mo já vêm sendo utilizados com êxito pela indústria de geração de energia, pela indústria petroquímica e pela indústria química por apresentarem boa resistência à ciclagem térmica e por serem de baixo custo se comparados a aços inoxidáveis. Entretanto estes aços apresentam algumas dificuldades no que se refere à resistência à fluência, quando submetidos a condições de trabalho em temperatura superior a 550 °C e pressão de 22 MPa. Japão e países da Europa trabalham com aços Cr-Mo modificados, pela adição de elementos químicos como o vanádio e o nióbio, e conseguiram, segundo Cunha, resultados satisfatórios em usinas de geração de energia que operam a 593 °C e 30 MPa.

Os aços ferríticos Cr-Mo juntamente com os aços inoxidáveis austeníticos e as ligas de níquel, vêm sendo empregados a altas temperaturas; contudo, dentre as famílias de aços ditos resistentes a altas temperaturas a escolha pelos aços ferríticos Cr-Mo se destaca devido ao seu baixo coeficiente de dilatação térmica (CUNHA, 2006).

As ligas de níquel ainda são, segundo Cunha (2006) materiais preferenciais para aplicações em temperaturas superiores a 700 °C por apresentarem coeficiente de expansão térmica adequado, porém para temperaturas em torno de 600 °C não são competitivos em termos de custo se comparado com os aços inoxidáveis. Por outro lado, para esta faixa de temperaturas os aços ferríticos Cr-Mo têm se mostrado os mais economicamente atrativos. Nas aplicações em altas temperaturas até 620°C os aços ferríticos apresentam a melhor relação custo/benefício.

A microestrutura, a composição química, a história térmica e a natureza dos mecanismos de endurecimento são os fatores que controlam as propriedades mecânicas dos aços Cr-Mo. A resistência à fluência destes aços, sobre longos períodos a elevadas temperaturas, é obtida a partir do endurecimento por solução sólida da matriz ferrítica pelo C, Cr e Mo, e pelo endurecimento por precipitação de carbonetos que contrabalançam a perda de resistência por solução sólida com a sua exposição à alta temperatura (LUNDIN *et al. apud* CUNHA, 2006).

2.2 Propriedades de Elementos de Liga

Os elementos de ligas nos aços podem alterar as propriedades físicas e mecânicas das fases presentes e dependendo da combinação feita com os elementos químicos, estes podem apresentar propriedades ligeiramente diferentes. Assim, a introdução de elementos com o intuito de aumentar a resistência à corrosão pode levar à estabilização de uma ou outra fase, resultando em diferentes comportamentos mecânicos (SOLOMON *et al.*, 1982). Alguns elementos normalmente adicionados e suas respectivas características são apresentados a seguir.

Ferro (Fe) – atua diretamente no mecanismo de resistência por solução sólida. Aumenta a solubilidade do carbono no níquel, melhorando assim a resistência a altas temperaturas (ASM HANDBOOK, 1993b).

Carbono (C) – encontrado em quantidades muito pequenas e sua principal atuação se dá na formação de precipitados, devido à reação com outros elementos de liga, presentes. Estes carbonetos podem ter efeito benéfico ou não, de acordo com o tipo e a morfologia do mesmo (ASM HANDBOOK, 1993a).

Manganês (Mn) – tem a função de anular o efeito de impurezas perniciosas nos aços, como exemplo, o oxigênio e o enxofre. A associação deste elemento ao níquel, mesmo que em pequenas quantidades, melhoram significativamente a resistência mecânica (HIGGINS, 1982).

Silício (Si) – melhora a resistência à oxidação a altas temperaturas, aumenta a dureza dos aços e a resistência de aços de baixo teor em liga (HIGGINS, 1982).

Cromo (Cr) – favorece uma microestrutura do tipo ferrítica. Dependendo do teor presente, promove a formação da camada passivadora, constituída por uma película de óxido de cromo (Cr_2O_3) fortemente aderida à superfície. Aumenta a resistência à corrosão em ambientes que contenham ácido nítrico (HNO_3) e ácido crômico (H_2CrO_4) além de aumentar a dureza do material. Aumenta a resistência à corrosão por vapores sulfurosos a altas temperaturas. Em termos microestruturais, participa da formação de carbonetos de cromo. (ASM HANDBOOK, 1993b).

Molibdênio (Mo) – possui a característica de aumentar a resistência a atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e a resistência à altas temperaturas. Participa da formação de carbonetos e atua, assim como o Cr, na formação de uma microestrutura ferrítica. Proporciona um aumento da resistência mecânica e promove a formação de fases secundárias nos aços ferríticos, austeníticos e duplex, além de torná-los mais duros (ASM HANDBOOK, 1993b).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela 1, é apresentada a composição química das três ligas metálicas avaliadas neste trabalho. Elas passaram pelo processo de laminação a uma temperatura de 1000 °C com redução de 50% e, logo em seguida, foram solubilizadas na temperatura de 1090 °C e mantidas nesta temperatura por um período de 15 minutos, seguido de um resfriamento rápido em água até atingir a temperatura ambiente. A função deste resfriamento abrupto é minimizar a formação de fases intermetálicas que porventura poderiam alterar as propriedades das ligas.

Tabela 1 - Composição química das ligas estudadas.

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
A1	0,031	0,3	0,39	17,6	5,3
B1	0,031	0,3	0,38	15,6	5,3
E1	0,030	0,37	0,34	9,3	5,3

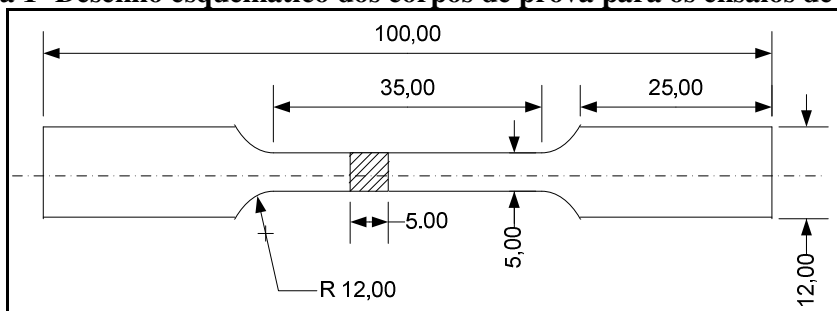
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a etapa de solubilização foram retiradas amostras das ligas para uma análise da microestrutura do material, utilizando-se os métodos de microscopia óptica (MO) difração de elétrons retroespalhados (EBSD) medição de dureza, além da realização de ensaios de tração e Charpy-V. As medições de microdureza Vickers foram realizadas seguindo a norma ASTM E384-89; de cada liga estudada foi retirada uma amostra para medição de dureza, sendo realizado um total de sete medidas e descartadas a maior e a menor medição.

As aquisições dos dados foram feitas por meio de um microscópio Olympus GX51, EBSD acoplado em um Microscópio Eletrônico de Varredura Philips XL-30, microdureza *vickers* em um microdurômetro Shimadzu HMV-2, ensaios de tração em uma máquina universal de ensaios *Instron* com capacidade de 25 toneladas e charpy-V em um pêndulo de impacto.

Para a realização dos ensaios de tração foram usinados, na direção de laminação, três corpos de prova para cada liga estudada, de seção quadrada conforme a Figura 1. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 22 °C e seguiram as determinações das normas NBR 6152 e ASTM E 8-03.

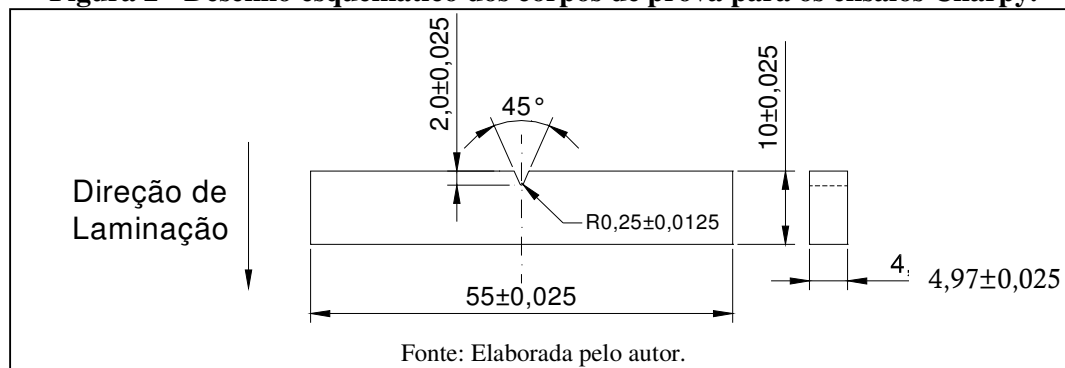
Figura 1- Desenho esquemático dos corpos de prova para os ensaios de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a realização dos ensaios Charpy-V foram confeccionados corpos de prova, conforme a Figura 2, usinados na direção de laminação 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 quais foram realizados em duas condições de temperatura. Primeiramente, à temperatura ambiente de 22 °C; posteriormente, à temperatura de 60 °C, considerando a necessidade de avaliar as condições das ligas a essa temperatura após a análise dos dados obtidos dos ensaios Charpy-V à temperatura de 22 °C.

Figura 2 - Desenho esquemático dos corpos de prova para os ensaios Charpy.



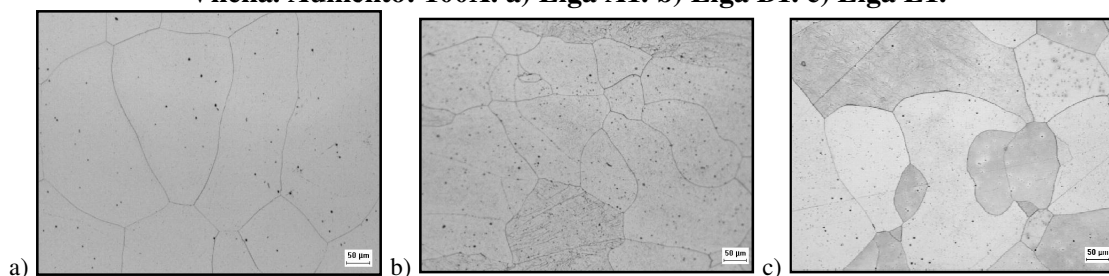
Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados na Figura 3 os resultados da microscopia óptica das ligas estudadas. É possível caracterizar a microestrutura das ligas como sendo do tipo ferrítica e ainda verificar a presença de alguns pequenos precipitados, provavelmente formados devido à presença de carbono nestas ligas (Tabela 1). A confirmação do caráter ferrítico das ligas estudadas está demonstrado na Tabela 2, que mostra os resultados obtidos por meio de um programa empregado na técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD).

A medição do tamanho de grão das ligas A1, B1 e E1, feita segundo o método ASTM e por meio de EBSD, indicou que ambas as ligas apresentam tamanho de grão grande na condição solubilizada, sendo os valores 1,2 (Liga A1), 1,6 (Liga B1) e 1,0 (Liga E1). Deve-se destacar que o aumento no tamanho de grão é um dos fatores responsáveis pelo aumento da temperatura de transição dúctil-frágil das ligas ferríticas (REDMOND, 1980; FOLKHARD, 1988; SEDRICKS, 1996).

Figura 3.- Micrografia das ligas após laminação a quente e solubilização. Ataque: Vilella. Aumento: 100X. a) Liga A1. b) Liga B1. c) Liga E1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 - Percentual das fases identificadas por meio de EBSD das ligas solubilizadas.

Liga	Percentual das Fases	
	Ferro- α	Não identificada
A1	99,9	0,1
B1	99,6	0,4
E1	99,9	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Souza (2006) a dureza de um aço pode ser aumentada pela adição de Mo em solução sólida. A Figura 3 mostra um gráfico comparativo das durezas médias entre as ligas A1, B1 e E1, na condição solubilizada. 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 Liga E1, 196 HV.

Quando as ligas A1 e B1 são comparadas com uma liga comercial, por exemplo, o aço AISI 444, cuja dureza é de 182 HV e cuja concentração de Cr é semelhante ao das ligas experimentais A1 e B1, conforme a Tabela 3, verifica-se dureza superior para as ligas estudadas. Mesmo a Liga E1, que possui concentração de Cr menor que o da liga AISI 444,

apresentou dureza superior, mostrando o efeito endurecedor do aumento do percentual de Mo (GUIMARÃES, 2005).

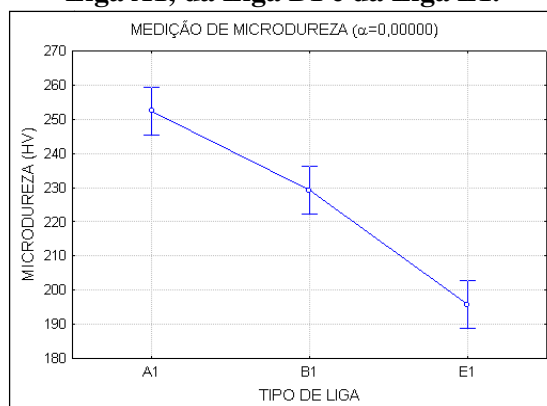
Tabela 3 - Composição química do aço AISI 444 (% massa) (GUIMARÃES, 2005).

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
AISI 444	0,015	0,12	0,54	17,56	1,86

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela Figura 4, que representa dureza média das ligas estudadas, é possível verificar que um aumento no percentual de Cr acarretou um aumento da dureza do material. O nível de significância (α)¹ obtido mostra que os percentuais de Cr e Mo adicionados às ligas resultaram em uma diferença significativa de dureza. A adição de elementos de liga ao aço pode aumentar a dureza da ferrita (Ferro- α) por solução sólida (COSTA E SILVA E MEI, 2006). Tanto o Cr quanto o Mo são elementos endurecedores (ASM HANDBOOK, 1993b, SEDRICKS, 1996; LAFFLER, 1999) justificando o aumento da dureza com o aumento dos teores destes elementos nas ligas.

Figura 4 - Valores máximo, médio e mínimo da dureza da Liga A1, da Liga B1 e da Liga E1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A adição de Mo, segundo Junhua *et al.* (2004) favorece o aumento da resistência mecânica das ligas de aço. Destaca-se nos resultados obtidos após ensaios de tração as características do limite de escoamento, do limite de ruptura e do limite de resistência à tração das ligas estudadas e apresentados respectivamente na Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

A análise de variância do efeito da variação dos teores de Cr e Mo sobre as propriedades obtidas após os ensaios de tração das ligas solubilizadas é apresentada na Tabela 4.

¹ O nível de significância fornece a confiabilidade/precisão das conclusões obtidas.

Tabela 4 - Nível de significância, considerando a variação do teor de Cr (α_{Cr}) e a variação do teor de Mo (α_{Mo}) sobre as propriedades de resistência à tração.

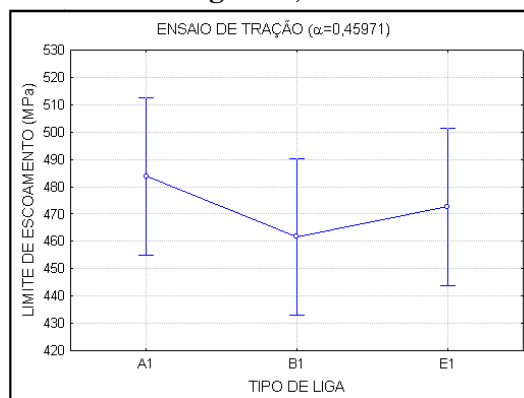
Variável resposta	α_{Cr}	α_{Mo}
Limite de escoamento	0,460	0,000
Limite de Resistência Tração	0,105	0,000
Limite de Ruptura	0,086	0,019
Alongamento Percentual	0,032	0,026

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela de variância indicou que a variação nos teores de Cr e Mo afetou estatisticamente ($\alpha < 5\%$) de forma significativa o alongamento percentual das ligas estudadas. Ao analisar os valores de significância obtidos para as demais propriedades de resistência à tração, verifica-se que os teores de Cr e Mo empregados neste trabalho apresentaram efeitos distintos.

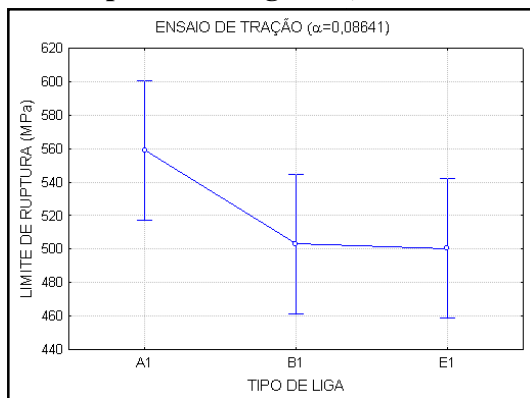
A variação no teor de Cr não resultou em uma variação significativa ($\alpha > 5\%$) nos limites de escoamento, resistência à tração e ruptura entre as ligas A1, B1 e E1. Já os percentuais de Mo empregados apresentaram uma variação significativa ($\alpha < 5\%$) para os resultados de limite de escoamento, limite de resistência à tração e de ruptura, indicando que o Mo apresenta um efeito mais relevante nas propriedades mecânicas do que o Cr. O aumento nos teores de Cr nas ligas E1, B1 e A1 (9%, 15% e 17%, respectivamente) não acarretaram mudanças significativas nos limites de escoamento, de resistência à tração e de ruptura. As ligas E1 (9% Cr) e B1 (15% Cr) apresentam resultados próximos, sendo verificado um ligeiro aumento da liga A1 (17% Cr) em relação a liga E1 e B1.

Figura 5 - Valores obtidos para o limite de escoamento das Ligas A1, B1 e E1.



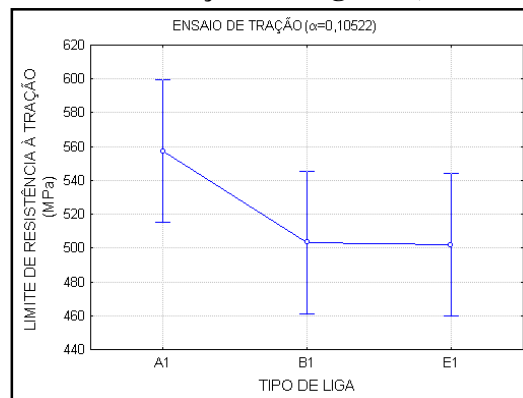
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 - Valores obtidos para o limite de ruptura das Ligas A1, B1 e E1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 - Valores obtidos para o limite de resistência a tração das Ligas A1, B1 e E1



Fonte: Elaborada pelo autor.

O aumento no teor de Cr favorece o aumento na resistência mecânica das ligas de aço (CHIAVERINI, 1988) contudo este comportamento não ficou claro para os percentuais de Cr empregados entre as ligas estudadas.

Quando se comparam os valores obtidos do limite de escoamento e o limite de resistência a tração das ligas A1, B1 e E1 com a liga AISI 444, Tabela 5, verifica-se que as ligas experimentais apresentam valores superiores.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço AISI 444 (Catálogo acesita – site).

Liga	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)
AISI 444	337	497

Fonte: Elaborada pelo autor.

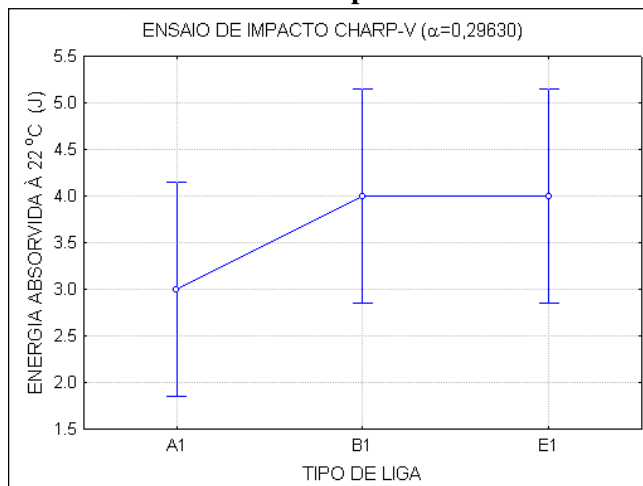
A Tabela 6 e a Figura 8 mostram os resultados obtidos para a energia absorvida pelas ligas estudadas após os ensaios Charpy-V, realizados à temperatura de 22 °C. Verifica-se que, da mesma forma como fora observado para os ensaios de tração, a diferença no teor de Cr entre as ligas não resultou em uma diferença significativa nos valores de energia absorvida. Estes valores apresentados para as ligas estudadas, à temperatura de 22 °C, foram baixos.

Tabela 6 - Valores de energia absorvida no ensaio Charpy-V à 22 °C.

Liga	Média de energia absorvida (J)
A1	3,0
B1	4,0
E1	4,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

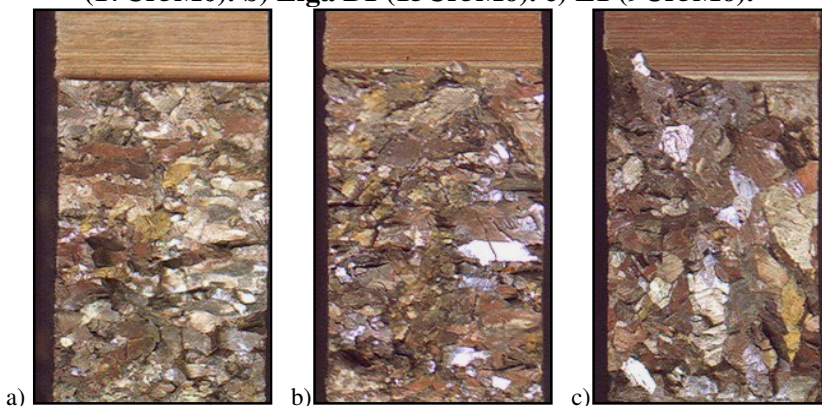
Figura 8 - Valores obtidos do ensaio Charpy-V das ligas A1, B1 e E1 realizadas em temperatura 22°C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O aspecto da fratura das ligas estudadas após ensaio Charpy-V, à temperatura de 22 °C, é apresentado na Figura 9, onde é possível observar um aspecto brilhoso para todas as ligas estudadas. Os baixos valores de energia absorvidos pelas ligas, após o ensaio 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.

Figura 9 - Aspecto da fratura dos corpos de prova Charpy-V (22 °C). a) Liga A1 (17Cr5Mo). b) Liga B1 (15Cr5Mo). c) E1 (9Cr5Mo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que as ligas estudadas apresentaram comportamento frágil à temperatura ambiente (22 °C), optou-se por realizar ensaios 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 (GUIMARÃES, 2005) onde o autor verificou que acima de 60 °C o aço estudado apresenta um comportamento dúctil, sendo escolhida esta temperatura para a realização dos novos ensaios.

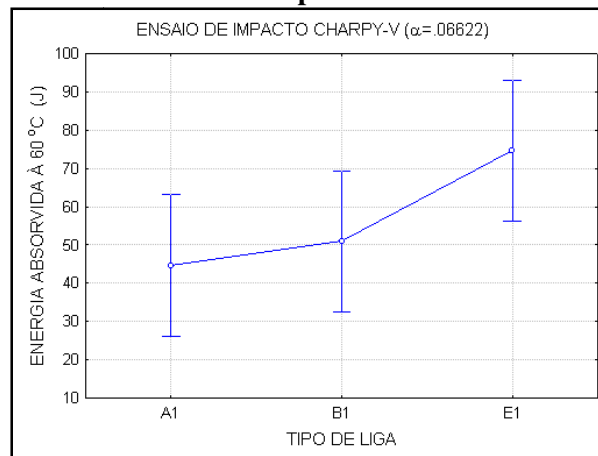
Os dados da energia absorvida no ensaio de Charpy-V, à temperatura de 60 °C, são apresentados na Tabela 7 e na Figura 10. Verifica-se que houve um aumento considerável da energia absorvida com o aumento da temperatura. Quando são analisados os valores obtidos para a energia absorvida e o aspecto da fratura dos corpos de prova, apresentado na Figura 11, é possível verificar que as ligas A1 e B1 podem ser classificadas como de características mista, a liga possui características frágeis e dúcteis, e a liga E1 passa a ser considerada dúctil.

Tabela 7. Valores de energia absorvida no ensaio Charpy-V à 60 °C.

Liga	Média de energia absorvida (J)
A1	44,7
B1	51,0
E1	74,7

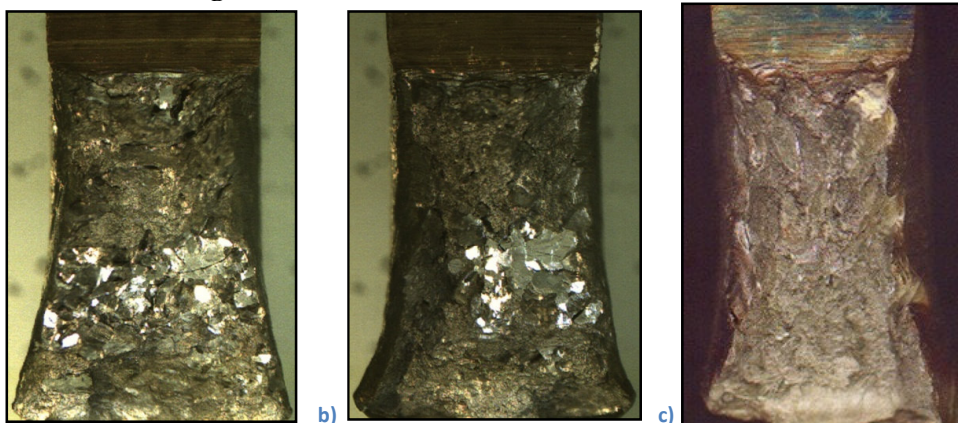
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 - Valores obtidos do ensaio Charpy-V das ligas A1, B1 e E1 realizadas a temperatura de 60 °C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11. Aspecto da fratura dos corpos de prova Charpy-V (60 °C). a) Liga A1 (17Cr5Mo). b) Liga B1 (15Cr5Mo). c) E1 (9Cr5Mo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os baixos valores de energia das amostras ensaiadas em temperatura ambiente podem ser justificados pelo tamanho de grão apresentado pelas amostras. As ligas com alto, médio e baixo teor de cromo tiveram sua classificação de tamanhos de grão de 1,2 (alto cromo) 1,6 (médio cromo) e 1,0 (baixo cromo). Estes baixos valores de tamanho de grão podem refletir em uma baixa dureza que não condiz com os dados apresentados devida altos teores de molibdênio, justificando a baixa energia absorvida no ensaio Charpy-V. Ao elevar a temperatura para 60 °C houve mais energia absorvida a qual foi refletida no aspecto da fratura que passou de frágil para dúctil (Figuras 9 e 11) mudança esta que caracteriza a baixa temperatura de transição dúctil-frágil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando os resultados, obtidos foi possível concluir que:

- Os resultados obtidos confirmam o Mo e o Cr como elementos endurecedores e fragilizantes.
- A liga com maior teor de Cr apresentou maior dureza que as de menor teor de Cr.
- As ligas apresentaram baixa capacidade de deformação.
- À 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 das ligas A1 e E1.

REFERÊNCIAS

- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. E 23 – 96. USA, 2004.
- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for tension testing of metallic materials**. E8-03, USA, 2003.
- AMERICAM SOCIETY FOR 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6157**: Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados. Dezembro de 1980.
- BABAIAN-KIBALA, E., Craig Jr., H. L., Rusk, G. L., Blanchard, K. V., Rose, T. J., B. L. Uehlein, 1993, Naphthenic Acid Corrosion in a Refinery Setting. **Corrosion** **93**, *paper* n. 631.
- Catálogo Acesita. Disponível em:
<http://www.arcelormittalinoxbrasil.com.br/port/produtos_servicos/inox_biblioteca.asp#>. Acesso em 30 jul. 2010.
- COSTA E SILVA, A. L., MEI, P. R. **Aços e ligas Especiais**. 6ª ed., Edgar Blucher, São Paulo, 2006.
- 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.
- FOLKHARD, E., **In: Welding Metallurgy of Stainless Steels**, Springer, Vienna, 1988.
- 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.
- HIGGINS, R. A. **Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia**. ED. DIFEL, 1982.
- JUNHUA, K. *et al.* **Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel**. *Materials & Design*, 2004.
- LACHERMARCHER, M. *et al.* **Emprego de revestimento para proteção interna em dutos**, Conferência sobre tecnologia de equipamentos, 2002.
- LAFFLER, B., **Stainless – Stainless Steel and their Properties**. p.1-44, 1999.
- MODENESI, P.J., **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2008.

- PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion Science**. Norwell; Kluwer Academic Publishers pp. 304 e 335, 2004.
- REDMOND, J.D. Toughness of 18Cr-2Mo stainless steel. **In: Symposium on ferritic stainless steel**, San Francisco, 1979.
- SEDRICKS, A.J. **Corrosion of Stainless Steels**. Wiley-Interscience Publications, Second edition, New York, USA, 1996.
- 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.

Recebido em 27/06/2012.

Aceito em 05/10/2012.