



# EFEITO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE MOLIBDÊNIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS Fe-9Cr-xMo<sup>1</sup>

Jardel de Souza Belo<sup>2</sup>  
Víctor Moita Pinheiro<sup>3</sup>  
Rodrigo Freitas Guimarães<sup>4</sup>  
Marcelo José Gomes da Silva<sup>5</sup>  
Hamilton Ferreira Gomes Abreu<sup>6</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar as principais propriedades mecânicas e associação destas propriedades com as características microestruturais de novas ligas com 9% de Cr e Mo de 5% e 9%, após a realização de tratamento de solubilização. A realização dos ensaios mecânicos visou determinar as propriedades mecânicas das ligas através da realização de ensaios de dureza, tração e impacto. As medições de dureza, baseadas na norma NBR NM 188, foram feitas nas amostras submetidas à análise microestrutural por meio de microscopia eletrônica de varredura. Corpos de prova foram usinados para a realização de ensaios de tração, à temperatura ambiente, de acordo com as normas NBR 6152. Também foram confeccionados corpos de prova para a realização dos ensaios de impacto Charpy-V reduzido, a temperatura ambiente, de acordo com a norma NBR 6157 e ASTM E 23 – 96. A liga com maior teor de molibdênio apresentou maior resistência mecânica que a de menor teor de molibdênio.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas; Molibdênio.

## EFFECT OF VARIATION OF MOLYBDENUM CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES IN Fe- 9CR-XMO ALLOYS

### Abstract

The objective of this study is to determine the main mechanical properties and combination of these properties with the microstructural characteristics of new alloys with 9% Cr and Mo, 5% and 9% after the solubilizing. The performance of mechanical tests aimed at determining the mechanical properties of alloys by testing the hardness, tensile and impact. Measurements of hardness, based on the NBR NM 188, were made in samples subjected to microstructural analysis by scanning electron microscopy. Specimens were machined to perform tensile tests at room temperature, according to NBR 6152. Also were prepared specimens for testing of impact Charpy-V low, the temperature, according to NBR 6157 and ASTM E 23 - 96. The alloy with higher content of molybdenum had a higher mechanical strength than that of lower content of molybdenum.

**Key-words:** Mechanical properties; Molybdenum.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando do curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará (UFC)-Fortaleza-CE.

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia e Ciência de Materiais – Universidade Federal do Ceará

<sup>4</sup> Professor do Departamento da Indústria do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE). Maracanaú-CE.

<sup>5</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC)–Fortaleza-CE.

<sup>6</sup> Professor Pós-Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC)–Fortaleza-CE.



## 1 INTRODUÇÃO

Estima-se que até 2020 o Brasil terá uma das cinco maiores empresas de energia do mundo. Para que isso aconteça, o país deve aumentar a produção de energia, destacando-se entre elas a proveniente do petróleo e gás natural.<sup>(1)</sup>

Dentre as etapas existentes nas indústrias do setor de petróleo e gás natural, tem-se o transporte do petróleo explorado pelas mesmas, onde podemos destacar o transporte por meio de dutos, que hoje tem uma vida média de 20 anos.<sup>(2)</sup>

Geralmente estes dutos são feitos de ligas P9 (9%p Cr – 1%p Mo), são aços Cr – Mo. No entanto, as ligas P9 não vêm resistindo as severas condições de operação dos dutos de transporte. Estes materiais apresentam boa resistência à alta temperatura e a corrosão por sulfetos, entretanto, tem-se verificado em algumas refinarias de petróleo o ataque pela corrosão naftênica na presença de fluídos com altas velocidades e turbulências.

Uma proposta para resolver este problema seria o aumento do percentual de molibdênio (Mo) para melhorar a resistência à corrosão destas ligas. Elementos de liga são introduzidos nos materiais com o objetivo de aumentar a resistência a corrosão levando a estabilização de uma ou outra fase.<sup>(3)</sup>

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.<sup>(4)</sup> Este elemento de liga aumenta a resistência à tração e a dureza do aço,<sup>(5)</sup> contudo, o aumento da taxa de deformação é menor que o aumento da taxa de resistência à tração.<sup>(6)</sup> Apesar de aumentar a resistência a corrosão o aumento no teor de Mo pode prejudicar as propriedades mecânicas deste material.<sup>(7)</sup>

Neste estudo, buscou-se avaliar as propriedades mecânicas de ligas experimentais, denominadas de Liga 1 e Liga 2, com teores de molibdênio 5% e 9% em peso, respectivamente, e com teor de cromo de 9%.

## 2 METODOLOGIA

A composição química dos aços estudados neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1. As ligas passaram pelo processo de laminação a uma temperatura de 1.000°C e em seguida foram solubilizadas a temperaturas em torno de 1.090°C.

**Tabela 1.** Composição química das ligas estudadas

	Cr	Mo	Si	Mn	C
Liga 1	9,5	5,3	0,34	0,37	0,03
Liga 2	9,6	9,3	0,45	0,41	0,04

As ligas solubilizadas passaram por caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde a microestrutura foi revelada com o uso do reagente Vilella.<sup>(8)</sup> Amostras das ligas solubilizadas foram submetidas a ensaios de microdureza à temperatura de 22°C de acordo com a norma ASTM E384-89.<sup>(9)</sup> Para este ensaio foi utilizada uma carga de 980,7 mN (HV 0.1) com um tempo de penetração de 15 segundos.

Corpos de prova de seção quadrada com dimensões de 5 mm x 5 mm e comprimento paralelo de 35 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<sup>(10)</sup> e ASTM E 8-03.<sup>(11)</sup>

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 direção de 5 mm x 10 mm x 55 mm, de acordo com a norma NBR 6157<sup>(12)</sup> e ASTM E 22-96.<sup>(13)</sup>

Para realizar as análises de fractografia foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Philips XL 30.

### 3 RESULTADOS

Como pode ser verificado na Figura 1a e na Figura 1b, 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.

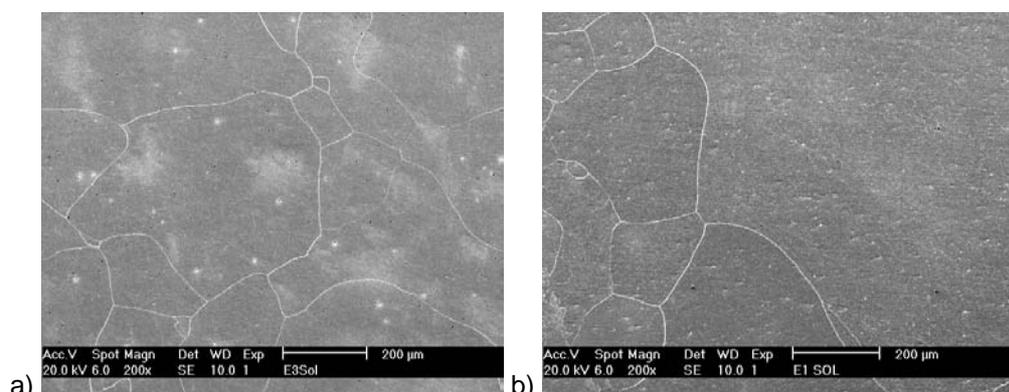


Figura 1. Microscopia eletrônica de varredura, aumento de 200x. (a) da Liga 1. (b) Liga 2.

A Figura 2 mostra um gráfico comparativo das durezas médias entre a Liga 1 e a Liga 2, na condição de solubilizadas, onde percebe-se que a Liga 2 apresentou maior dureza que a Liga 1.

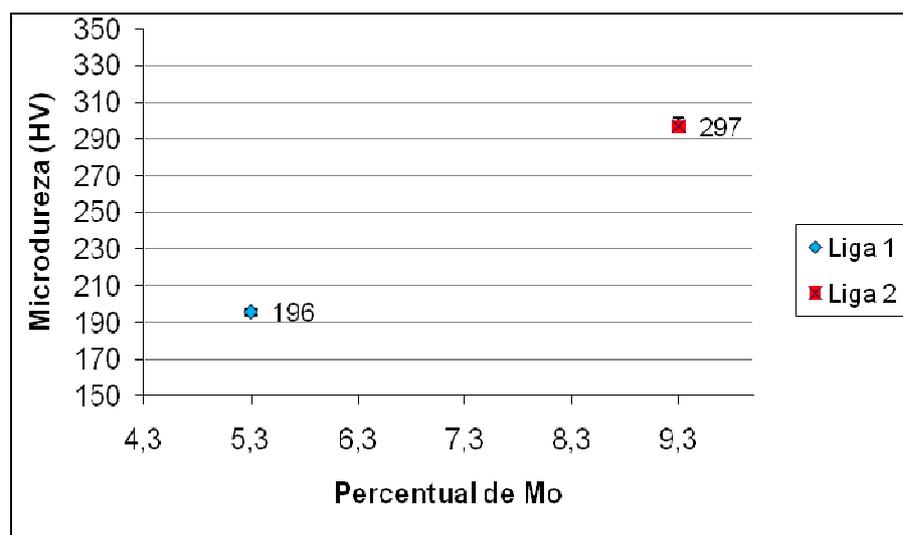


Figura 2. Valores máximo, médio e mínimo da dureza da Liga 1 e da Liga 2.

Na Tabela 2 e na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de tração realizados. Verificou-se que a Liga 1 e a Liga 2 apresentaram baixos valores de alongamento percentual.

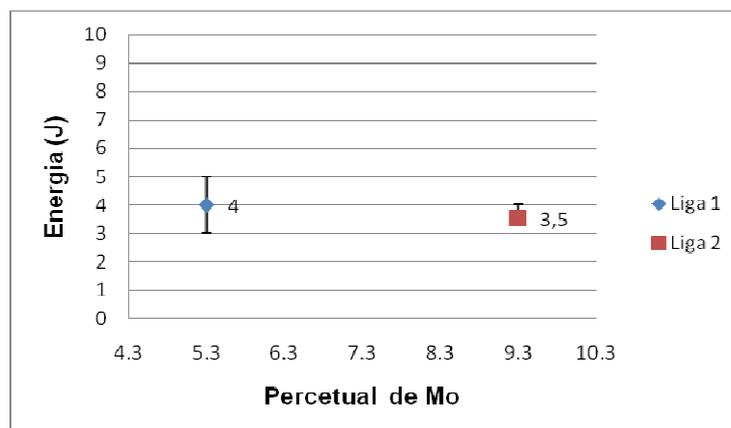
**Tabela 2.** Propriedades mecânicas da Liga 1 após os ensaios de tração

Ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	474.01	83643.57	511.64	513.15	1.09
2	450.67	81770.20	477.96	478.08	1.23
3	493.19	82669.57	511.46	514.21	0.81

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas da Liga 2 após os ensaios de tração

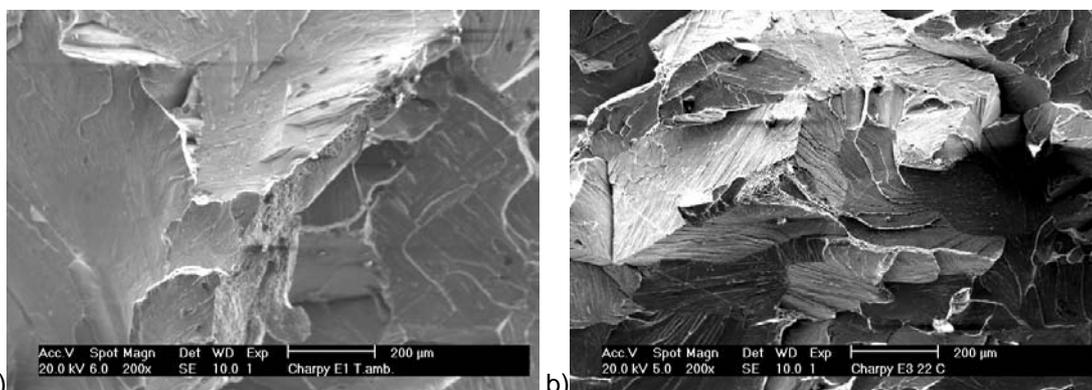
Ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	562.76	85392.85	695.73	695.73	6.78
2	568.74	87393.64	714.50	714.92	7.53
3	566.14	94208.85	671.77	673.33	6.07

A Figura 3 mostra o resultado dos ensaios de impacto Charpy-V realizado na temperatura de 22°C, onde se percebe que não houve uma diferença no valores de energia absorvida obtidos.



**Figura 3.** Valores obtidos do ensaio de impacto Charpy-V das ligas 1 e 2 realizadas em temperatura 22°C.

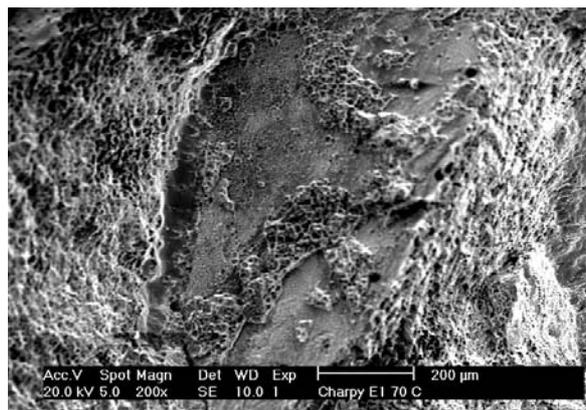
O aspecto da fratura das Ligas 1 e 2 são apresentados na Figura 4. Nela é possível verificar um comportamento frágil nas duas ligas estudadas à temperatura ambiente.



**Figuras 4.** Microscopia eletrônica de varredura com aumento de 200x. (a) Aspecto da fratura da Liga 1. (b) Aspecto da fratura da Liga 2 .

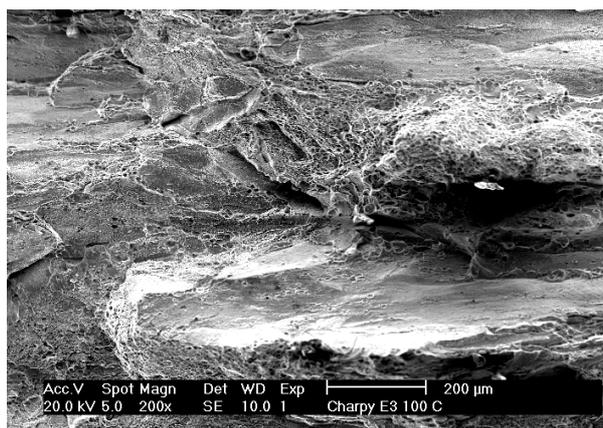
Uma vez que as ligas estudadas apresentaram comportamento frágil a temperatura ambiente (22°C), optou-se por realizar ensaios de impacto Charpy-V a uma temperatura superior a 22°C. A escolha da temperatura foi feita com base em trabalhos que estudaram o comportamento de um aço ferrítico quando submetido a ensaios de impacto a diferentes temperaturas,<sup>(15)</sup> onde nesta o autor verificou que acima de 60 °C o aço estudado apresenta um comportamento dúctil.

Desta forma foi utilizada uma amostra da Liga 1 para a realização do ensaio de impacto na temperatura de 70°C. O resultado obtido mostrou que a Liga 1 apresentou um aumento considerável na energia absorvida, com um valor de 51 J, apresentando um comportamento dúctil como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5.** Microscopia eletrônica de varredura com aumento de 200x da fratura da Liga 1 a temperatura de 70°C.

A Liga 2 quando submetida ao mesmo ensaio na temperatura de 70°C apresenta um valor de energia absorvido de 16 J, superior ao obtido no ensaio a 22°C, contudo apresentou ainda um comportamento de tipo frágil. Quando o ensaio foi realizado a temperatura de 100 °C obteve-se um valor de energia de 25 J e, desta vez, a liga apresentou comportamento do tipo dúctil, como mostrado na Figura 6.



**Figura 6.** Microscopia eletrônica de varredura com aumento de 200x da fratura da Liga 2 a temperatura de 100°C.

#### 4 DISCUSSÕES

Segundo Souza,<sup>(14)</sup> a dureza de um aço pode ser aumentada pela adição de molibdênio em solução sólida, estando de acordo com o resultado apresentado na

Figura 2, onde a Liga 2 (maior teor de Mo) apresentou maior dureza que a Liga 1 (menor teor de Mo).

A adição de molibdênio favorece ao aumento da resistência mecânica das ligas de aço.<sup>(7)</sup> Esta afirmação pode ser confirmada pelos resultados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, onde foi possível verificar que a liga que possui o maior teor de molibdênio (Liga 2) apresentou os maiores valores de módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência à tração e limite de ruptura.

Já quando são analisados os resultados para os ensaios de impacto realizados à temperatura de 22°C (Figura 3) verificou-se que os diferentes valores no teor de molibdênio entre a Liga 1 e a Liga 2 não resultou em uma diferença significativa nos valores de energia absorvida.

Observou-se através da microscopia eletrônica de varredura (Figura 4) a presença de facetas de clivagem na fratura das ligas ensaiadas. Os baixos valores de energia absorvidas apresentados tanto pela Liga 1 quanto pela Liga 2, 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.

Apesar das Ligas 1 e 2 apresentarem um comportamento do tipo frágil quando ensaiados a uma temperatura de 22°C, ao serem realizados ensaios nas temperaturas de 70°C (Figura 5, Liga 1) e de 100°C (Figura 6, Liga 2) o aspecto da fratura das ligas indica um comportamento do tipo dúctil, justificado pelo aspecto fibroso e pela presença de microcavidades na fratura. Ressalta-se ainda que o aumento da temperatura resultou em um aumento significativo nos valores de energia absorvida, para ambas as ligas estudadas.

Vale à pena salientar que os resultados de impacto nas temperaturas de 70°C e 100°C foram realizados com apenas uma amostra, logo estes resultados indicam apenas uma tendência no comportamento destas ligas.

## 5 CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos foi possível concluir que:

- os resultados obtidos confirmam o molibdênio como um elemento endurecedor;
- a liga com maior teor de molibdênio apresentou maior resistência mecânica que a de menor teor de molibdênio, como esperado;
- as Ligas 1 e 2 apresentaram uma baixa capacidade de deformação.;
- a temperatura ambiente (22°C) as ligas apresentaram baixos valores de energia absorvida e um comportamento do tipo frágil; e
- existem indícios de que as ligas apresentam um comportamento do tipo dúctil, para temperaturas acima de 70°C no caso da Liga 1 e acima de 100°C para a Liga 2.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará e do Laboratório de Ensaio Mecânicos do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará pela realização dos experimentos, além da FUNCAP, CAPES e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Petrobrás Estratégia Corporativa 2020. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia-corporativa/>. Acessado em 30 dez 2009.
- 2 LACHERMACHER, Filho, M., B. G. S., Emprego de revestimento para proteção interna em , Conferência sobre tecnologia de equipamentos, 2002.
- 3 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.
- 4 WIEGAND, H., DORUK, M, "Einflub von Kohlenstoff und molybdän auf die Ausscheidungsvorgänge, besonders auf die Bidung intermetallischer Phasen in austenitischen Chrom-Nickel-Stählen," pp. 559-566, 1992.
- 5 N. Perez, "Electrochemistry and Corrosion Science," vol. 1, pp. 304 e 335, 2004
- 6 LEE W.B., HONG S.G., et al. Influence of Mo on precipitation hardening in hot rolled HSLA steels containing Nb. *Scr Mater* 2000;43(4):319–24
- 7 JUNHUA, K., LIN Z., Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel. *Materials & Design*, 2004
- 8 SILVA, C. C., FARIAS, J. P., Estudo da sensitização causada pelo ciclo térmico Soldagem no aço inoxidável superferrítico AISI 444. Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás,
- 9 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – **Standard test methods for microhardness of materials**. E384-89, USA, 1990.
- 10 NBR 6152. Materiais metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente. Dezembro de 2002.
- 11 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for tension testing of metallic materials. E8-03, USA, 2003
- 12 NBR 6157. Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados. Dezembro de 1980.
- 13 AMERICAM SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS – Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. E 23 – 96. USA, 2004.
- 14 SOUZA, S. A., Composição químicas dos aços, São Paulo, Edgard Blücher, 2006
- 15 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.