



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

AVALIAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS AUSTENÍTICAS DO SISTEMA FeMnAlC

Allan Ribeiro de Souza, Oscar Acselrad.

Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Processamento Termomecânico e Engenharia Microestrutural, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro; Centro de Tecnologia, bloco F – sala 210, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, 21845-870, Brasil
Email: allariba@metalmat.ufrj.br

Resumo - Ligas do sistema FeMnAlC vêm sendo estudadas como possíveis alternativas ao uso de aços inoxidáveis. Estas ligas, quando solubilizadas, são não magnéticas e apresentam estrutura austenítica que pode ser alterada por tratamentos térmicos, podendo-se desta forma obter extensa gama de variação de propriedades mecânicas e físicas. Apresentam elevada resistência à oxidação, e após tratamento de envelhecimento durante 15 horas a 550°C, podem atingir valores de resistência mecânica comparáveis às de aços de alta resistência. As informações sobre o desempenho destas ligas em condições de desgaste ainda são limitadas. A possibilidade de aplicação em componentes sujeitos à cavitação e esforços abrasivos, tais como dutos, bombas e componentes de sistema de perfuração, ainda é matéria para estudos de caráter fundamental. Neste trabalho, amostras de uma liga FeMnAlC foram submetidas a diferentes condições de processamento térmico, dando origem a microestruturas caracterizadas por microscopia (ótica, eletrônica de transmissão e força atômica) e por difração de raios X. Estas amostras foram submetidas a um ensaio de micro-abrasão, determinando-se a taxa de resistência ao desgaste abrasivo. Os resultados são usados para diferenciar o desempenho das diferentes microestruturas e também para uma análise comparativa com o desempenho de um aço ferramenta (AISI M2).

Palavras-Chave: ligas FeMnAlC; desgaste abrasivo; microestruturas.

Abstract - Alloys of the FeMnAlC system have been studied as an alternative to stainless steels applications. Such alloys, when solubilized, are non-magnetic and present an austenitic structure that can be modified by thermal treatments. In this way, a large spectrum of mechanical and physical properties can be obtained. They are oxidation-resistant alloys, and by 15 hours aging at 550°C mechanical strength can be as high as conventional structural alloy steels. Informations concerning the performance of these alloys under wear conditions are still limited. The possibility of application in components exposed to cavitation or abrasive loads, such as pipes, pumps and drilling systems is still a subject for fundamental research, such as the one that is now reported. Samples of a FeMnAlC alloy have been submitted to different thermal processing, leading to microstructures that have been characterized by optical, transmission and atomic force microscopy and by X-ray diffraction. They were subsequently subjected to a micro-abrasion test in which the abrasive wear resistance could be determined. The results have been used to differentiate the performance of different microstructures and allowed also a comparative analysis with the performance of an AISI M2 tool steel.

Keywords: FeMnAlC alloys; abrasive wear; microstructures

1. Introdução:

Ligas à base de FeMnAlC, cujos teores usuais hoje em consideração são 25-30% Mn, 8-10% Al e C podendo chegar a 1%, vêm sendo estudadas há quase 40 anos, e um dos aspectos mais importantes para a sua utilização, em particular pela indústria petroquímica e aeroespacial, além do peso específico de $6,6 \text{ g/cm}^3$ (ou seja, cerca de 13% menor que os aços convencionais), está na possibilidade de se obter combinações satisfatórias de resistência mecânica, tenacidade à fratura e estabilidade estrutural em uma ampla faixa de temperatura, de sub-zero até $\sim 450^\circ\text{C}$ [1]. Este conjunto de características está intimamente associado às transformações da fase austenítica supersaturada durante o seu processamento térmico e termomecânico, e a caracterização destas transformações e das fases resultantes são etapa fundamental para a definição dos parâmetros de processamento mais adequados para a obtenção de propriedades específicas.

A escolha de um processamento apropriado depende da aplicação específica. Componentes não magnéticos para uso criogênico, por exemplo, são submetidos a um resfriamento rápido a partir da temperatura de solubilização, resultando uma fase austenítica estável, mesmo a temperaturas sub-zero. Nestas condições, obtém-se um material de alta ductilidade (60-70% de alongamento) e razoável resistência mecânica (LR 800-900 MPa). Resistência mecânica bem mais elevada pode ser obtida por meio de tratamento de envelhecimento convencional, a 550°C por 15 horas, chegando-se a limites de resistência na faixa de 1200-1400 Mpa, porém com fraco desempenho em termos de tenacidade à fratura.

Avaliações de desempenho são em geral realizadas através de testes simulativos ou pelo estudo de propriedades básicas (mecânicas e físicas principalmente). Com estes procedimentos, mostra-se que estas ligas são apropriadas para peças sujeitas a esforços de tração e fadiga e que componentes podem ser usados em estruturas sujeitas a esforços cíclicos mesmo em regime elasto-plástico e com variações periódicas na temperatura, sendo uma alternativa melhor para estas aplicações do que aços martensíticos ao Cromo [2]. Aplicações também se estendem para outros campos que não o estrutural, como o de materiais magnéticos moles para aplicações em circuitos de radar, núcleos de memória e transformadores especiais [3], mostrando assim a diversidade de utilizações que estas ligas apresentam.

A possibilidade de aplicação em componentes sujeitos à cavitação e esforços abrasivos ainda é matéria para estudos de caráter fundamental, daí a necessidade de investigações como a que agora reportamos.

2. Materiais e Métodos:

2.1. Ligas Utilizadas:

Neste trabalho foram empregadas duas ligas Fe-28Mn-8Al-1C (%peso) com adição de Si (liga L1 com 1,39% e liga L2 com 1,25%), produzidas em laboratório, e uma liga produzida comercialmente, cuja composição é apresentada na tabela a seguir:

Tabela 1: Composição química da liga COM1

| Mn | Al | C | Si | Refratários | Outros | Fe |
|----------|------------|--------------|---------------|-------------|-----------|------|
| 28 a 30% | 8,3 a 9,3% | 0,85 a 0,95% | Menos de 0,3% | 1,2 a 2% | 0,15 a 2% | Rem. |

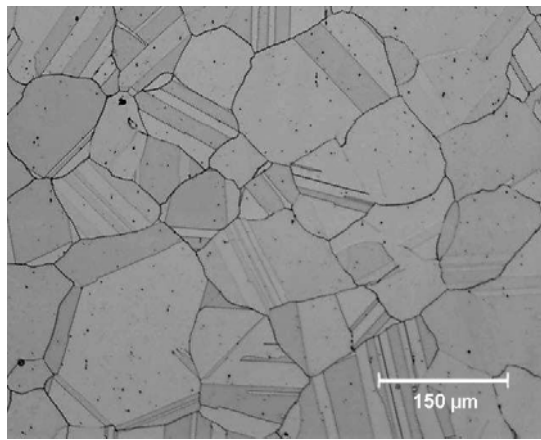
Amostras da liga L2 foram submetidas a três tratamentos diferentes: solubilização a 1050°C por 2 horas (amostra SOL), envelhecimento por 15 horas a 550°C após solubilização (amostra ENV), e resfriamento controlado (amostras L2T3). O resfriamento controlado consistiu de solubilização, seguido de resfriamento rápido a 700°C , permanência nesta temperatura por 7 minutos, resfriamento rápido até 550°C , permanência de outros 7 minutos, com posterior resfriamento lento até a temperatura ambiente. A liga L1 foi submetida apenas ao tratamento de resfriamento controlado (amostra L1T3). O tratamento de resfriamento controlado vem sendo estudado como uma possibilidade de obtenção de uma microestrutura capaz de conferir elevada dureza e resistência mecânica sem provocar danos significativos na tenacidade à fratura [4]. A liga comercial (COM1) foi ensaiada como recebida.

Para efeitos de comparação, foi utilizado um aço ferramenta da série M2, de elevada resistência à abrasão, cuja composição nominal é apresentada a seguir:

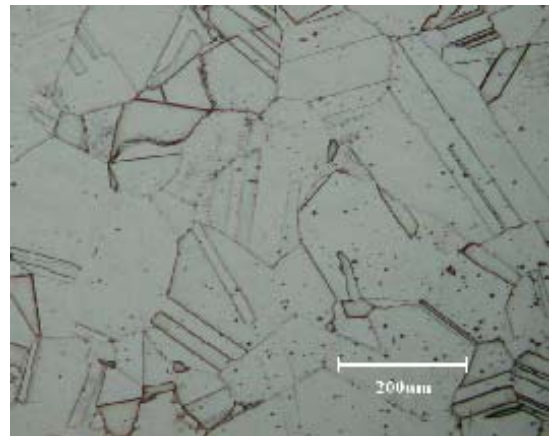
Tabela 2: Composição química de aços ferramentas M2

| C | Cr | Mo | V | W | Fe |
|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| 0,8 a 1,0% | 3,8 a 4,5% | 4,5 a 5,5% | 1,8 a 2,2% | 5,5 a 6,7% | Rem. |

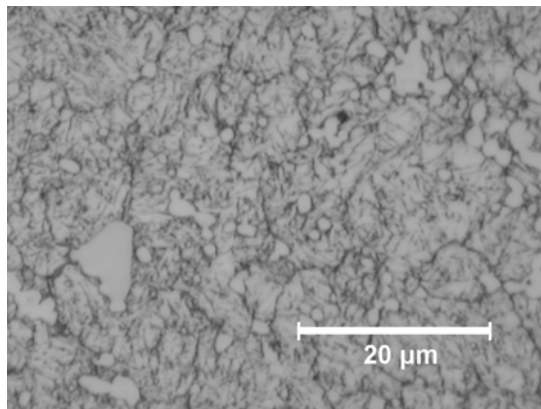
As microestruturas das ligas estão mostradas na figura 1. As amostras foram polidas de forma convencional até a lixa 600 e posteriormente finalizadas com pasta de diamante de 1 μ m, e atacadas por tempos variados com solução de Nital 5%. Microscopia ótica foi realizada com microscópio Olympus e microscopia de força atômica foi conduzida em microscópio de varredura Topometrix, modelo Discoverer TMX2010 em modo de não contato. A caracterização microestrutural das ligas FeMnAlC pode ser encontrada em outro trabalho [5].



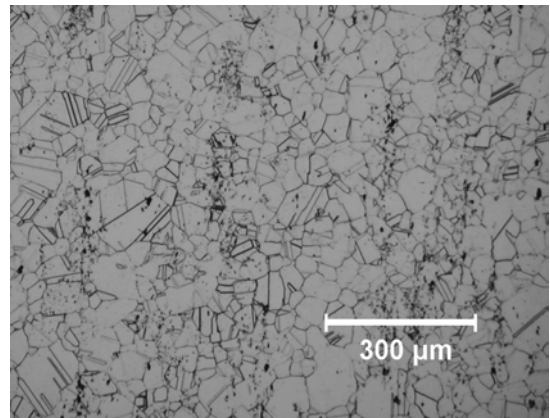
(a)



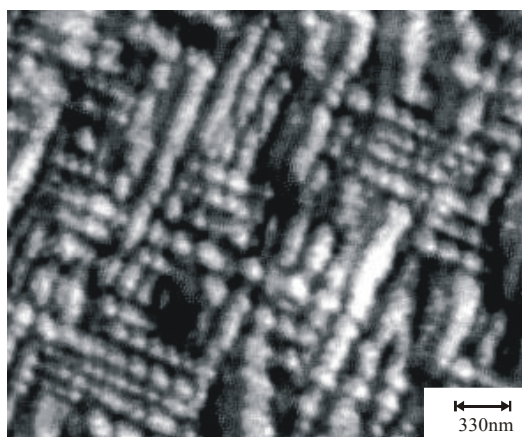
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 1: Microestruturas: microscopia ótica a) L2T3; b) L2SOL; c) AISI M2; d) COM 1; microscopia eletrônica de transmissão e) ENV

2.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo:

Cada amostra foi previamente lixada e polida com pasta de diamante (6, 3 e 1 μ m), obtendo-se uma superfície lisa e plana. Ensaios de desgaste abrasivo foram realizados em equipamento Gentest, mostrado na figura 2. Este ensaio consiste na rotação de uma esfera de aço cromo de raio 15 mm sobre a superfície da amostra sob a aplicação de uma carga aplicada Q de 0,314N, por um número de ciclos determinado, usando-se como abrasivo uma suspensão de pasta de diamante com partículas de granulometria 0,25 μ m.



Figura 2: O equipamento de ensaio de abrasão.

Neste trabalho foi medido o desgaste progressivo pela aplicação de um número crescente de ciclos, variando de 10 até 100, em posições diferentes em cada amostra. A distância de deslizamento equivalente s pode ser obtida como o produto do comprimento do equador da esfera pelo número de ciclos impostos. O desgaste causado pelo movimento relativo da esfera sobre a superfície acarreta na formação de uma cratera, em formato de calota esférica. Em seguida, calcula-se a perda de material, em termos de volume a partir do diâmetro d de cada calota. O volume pode ser calculado através da equação 1.

$$\text{Vol} = \frac{\pi}{6} \cdot h \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{d^2}{2} \right)^2 + h^2 \right] \quad (1)$$

onde h representa a profundidade da cratera, proveniente da seguinte equação:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (2)$$

A taxa de desgaste W é obtida a partir da equação 3:

$$W = \frac{1}{Q} \cdot \frac{d\text{Vol}}{ds} \quad (3)$$

3. Resultados e Discussão:

O desempenho de cada material em termos de volume removido por distância de deslizamento, provocado pelo número de ciclos imposto no ensaio, está mostrado na figura 3.

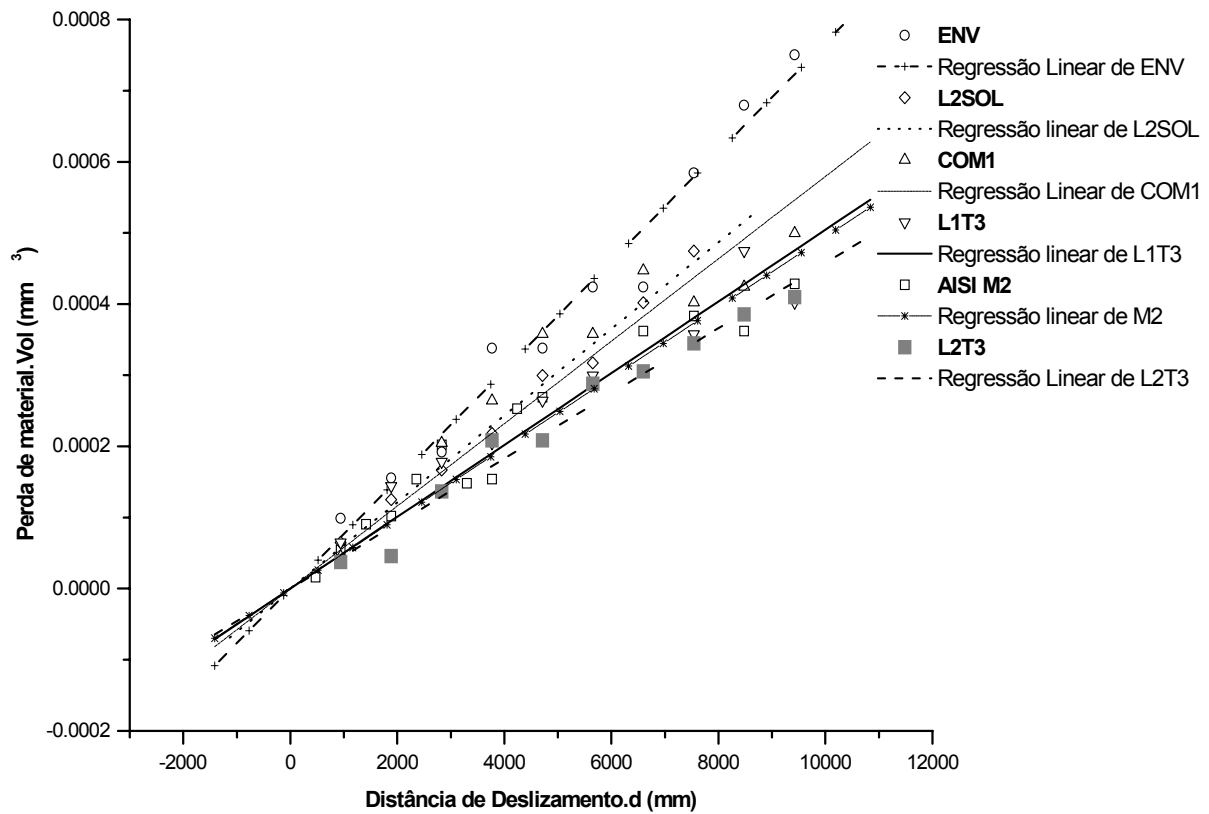


Figura 3: Desempenho das amostras, em termos de resistência ao desgaste abrasivo, nas condições impostas do ensaio.

A partir dos dados acima, podemos calcular a taxa de desgaste para cada material, mostradas na tabela 3. Nesta tabela constam também os valores de dureza medidos.

Tabela 3: Taxa de desgaste e dureza das ligas presentes no ensaio

| Amostras | W ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) | Dureza (HRc) |
|----------|----------------------------------------------------------------|----------------|
| L2T3 | $1,46 \cdot 10^{-7}$ | 38,54 |
| L1T3 | $1,61 \cdot 10^{-7}$ | 33,76 |
| AISI M2 | $1,58 \cdot 10^{-7}$ | 64,00 |
| L2SOL | $1,94 \cdot 10^{-7}$ | 20,34 |
| COM1 | $1,85 \cdot 10^{-7}$ | 12,03 |
| ENV | $2,44 \cdot 10^{-7}$ | 42,90 |

A figura 4 sintetiza os valores de dureza e de taxa de desgaste resultantes de cada tratamento aplicado às ligas FeMnAlC e ao aço M2.

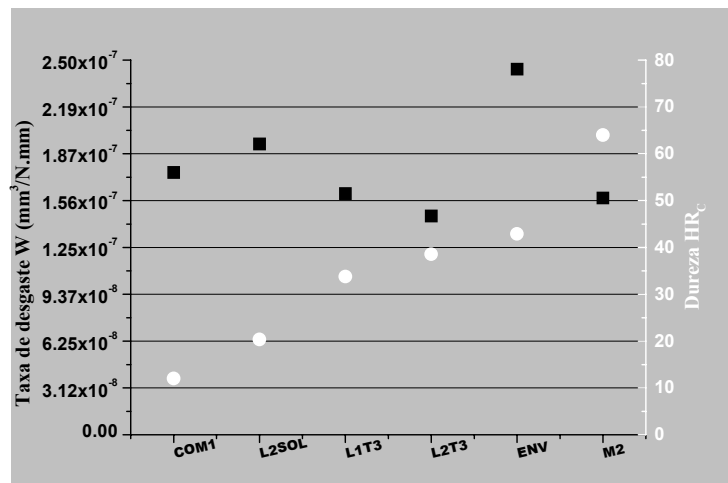


Figura 4: Resultados de taxas de desgaste e dureza.

As retas da figura 3 permitem distinguir três grupos com desempenhos diferenciados. O primeiro é constituído apenas pela liga FeMnAlC envelhecida, de mais alta dureza, porém com maiores índices de desgaste por abrasão. A liga solubilizada e a comercial constituem o segundo grupo, com desempenho melhor que a envelhecida. O terceiro grupo é formado pelas ligas submetidas ao tratamento de resfriamento controlado, que, independente das diferenças no teor de Si, apresentam comportamento semelhante ao do aço rápido AISI M2, de largo emprego em aplicações que envolvem desgaste abrasivo.

Estes resultados revelam de início que o comportamento da liga FeMnAlC é claramente dependente de seu estado microestrutural. A microestrutura da liga envelhecida é constituída por um arranjo espacial de partículas extremamente finas de fase κ ao longo das direções $\langle 100 \rangle$ da matriz austenítica, conforme mostrado na figura 1e. Este arranjo promove intensa distorção elástica na matriz, daí sua elevada dureza [6]. O alto nível de tensões internas associadas a esta distorção elástica pode facilitar o arrancamento de material por esforços abrasivos, resultando assim no fraco desempenho evidenciado na figura 3.

As ligas SOL e COM são essencialmente austeníticas, de baixa dureza e, portanto não seria de se esperar um bom comportamento quando submetidas a esforços abrasivos. O tratamento de resfriamento controlado T3, por sua vez, promove uma estrutura de transição que antecede a formação da rede espacial de partículas da fase κ [5,6], estrutura esta formada por uma alternância de regiões enriquecidas e empobrecidas em C e Al, semelhante às zonas de Guinier-Preston. Esta configuração confere ao material dureza relativamente elevada sem, no entanto criar tensões internas na microestrutura, resultando portanto em uma liga que apresenta resistência ao desgaste semelhante à dos aços rápido como o M2.

5 - Conclusões:

O ensaio de resistência à abrasão de ligas do sistema FeMnAlC, que vêm sendo desenvolvidas como possíveis alternativas para o emprego de aços inoxidáveis em aplicações estruturais em meios não muito agressivos, revela que o seu desempenho é fortemente influenciado por seu estado microestrutural. Na condição solubilizada, com alta ductilidade e resistência mecânica razoável, o desempenho diante de esforços abrasivos é modesto. Tratamentos que produzem elevados valores de dureza, promovidos pela precipitação de partículas finas de uma segunda fase, tornam o material extremamente sensível ao desgaste por esforços abrasivos. Por outro lado, tratamentos que elevam a resistência mecânica da matriz austenítica sem a introdução de elevadas tensões residuais internas, como o resfriamento controlado após solubilização aqui adotado, mostram-se capazes de conferir a ligas do sistema FeMnAlC resistência à abrasão comparável à de aços rápidos da série M2.

6 - Agradecimentos:

Ao professor Sérgio Álvaro de Souza Camargo Jr. pela orientação na realização do ensaio de micro-abrasão; ao corpo técnico do laboratório de Processamento Termomecânico e Engenharia Microestrutural, pela ajuda técnica; à Agência Nacional do Petróleo ANP pelo apoio financeiro.

7 – Referências Bibliográficas:

- [1]. I. S. Kalashnikov, O. Acelrad, A. Shalkevich, L. C. Pereira, “Heat treatment and thermal stability of FeMnAlC alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, p.72-79 (2003).
- [2]. I. S. Kalashnikov, O. Acelrad, T. Kalishak, M. S. Khadyev and L. C. Pereira, “Behaviour of Fe-Mn-Al-C Steels During Cyclic Tests”, *J. Mat. Eng. and Perform*, vol. 9, 3, p.334-337 (2000).
- [3] Y. C. Lin, “Structures and superparamagnetic properties of overaged FeMnAlC alloys”, *Acta Mater.*, Vol. 47, n 18, (1999) 4665-4681.
- [4]. O. Acelrad, L. C. Pereira, M. R. do Amaral, “Processing Conditions, Microstructure and Strength of an Austenitic Fe-Mn-Al-C Alloy”, *Processing, Properties and Applications of Metallic and Ceramic Materials*, M. N. Loretto and C. J. Beevers, Eds, v. II, MCE Publ., p. 829-834, (1992).
- [5]. O. Acelrad, E. M. Silva, I. S. Kalashnikov, L. C. Pereira, R. A. Simão, C. A. Achete “Phase transformation in FeMnAlC austenitic steels with Si addition”, *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 33A, p. 3569-3573, (2002).
- [6]. K. Sato, K. Tagawa and Y. Inoue, “Age hardening of a Fe-30Mn-9Al-0,9C alloy by spinoidal decomposition”, *Scripta Metall.*, vol 22, nº 6, p. 899-902 (1988).