

## INFLUÊNCIA DA SOLUBILIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE LIGAS Fe-11Mo-5Ni-0,05C

**Francisco Ilson da Silva Júnior**

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica  
Fortaleza - Ce, Brasil

**Manoel Ribeiro da Silva**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física  
Rio de Janeiro – RJ, Brasil

**Hamilton Ferreira Gomes de Abreu**

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica  
Fortaleza - Ce, Brasil

**Resumo.** As ligas do sistema Fe-Mo-Ni apresentam elevada plasticidade e propriedades magnéticas que se aproximam às ligas Vicalloy II (ligas com 50% Co, 10 a 14% V e Fe) com a vantagem de não possuírem em sua composição o elemento Co, de alto custo e não abundante na natureza. O estudo destas ligas se iniciou com percentuais de molibdênio mais elevados, ligas Fe-20Mo-5Ni fabricadas a partir de matérias primas com alto grau de pureza. A adição de carbono às ligas com 20% de Mo tiveram como consequência um aumento de cerca de duas vezes no valor da força coercitiva sem significativa redução da remanência magnética e indução de saturação. Devido à boa ductilidade destas ligas, elas podem ser consideradas uma alternativa na construção de pequenos circuitos magnéticos, difíceis de ser conformados com ímãs de Alnico ou ferritas, os quais não são possíveis de sofrer deformações à frio. No presente trabalho foram determinadas as curvas de histerese para amostras de Fe-11Mo-5Ni-0,05C laminadas a frio com reduções variando de 60% a 97%, solubilizadas em temperaturas de 1100<sup>o</sup> C e 800<sup>o</sup> C e seguidas de envelhecimento. Os resultados foram comparados com amostras envelhecidas após a deformação a frio, sem solubilização intermediária.

**Palavras-chave:** Magnetismo, Envelhecimento, Ligas Fe-Mo-Ni.

## 1. INTRODUÇÃO

As ligas magnéticas à base de Fe, Mo e Ni são potenciais substitutos para outras do sistema Fe-Co (Vicalloy), com a vantagem de não possuírem o elemento cobalto em sua composição, de alto custo e estratégico. Processadas por laminação a frio, seguidas de solubilização, têmpera e envelhecimento magnético, apresentam boas propriedades magnéticas, Força Coerciva ( $H_C$ ), Indução Residual ( $B_R$ ) e Indução de Saturação ( $B_S$ ).

Jim *et al* estudaram ligas Fe-Mo-Ni sem carbono em sua composição e concluíram ser 20% o percentual em peso de Mo que produzia o melhor conjunto de propriedades. A liga nesta condição é isotrópica com  $H_c$  da ordem de 220 Oe.

Teodósio *et al* verificaram que a adição de carbono às ligas com 20% de Mo tinham como consequência um aumento de cerca de duas vezes no valor da força coercitiva sem significativa redução da remanência magnética e da indução de saturação. Em um trabalho posterior Abreu *et al*, mostrou que a adição de carbono à ligas com 11% de Mo tinha um efeito muito mais significativo na força coercitiva que nas ligas com 20% de Mo (Abreu *et al*, 1998).

Quando adequadamente trabalhadas, as ligas Fe-Mo-Ni-C se mostram extremamente dúcteis permitindo laminação a frio até reduções de 99%.

No presente trabalho analisou-se as propriedades magnéticas de uma liga Fe-11Mo-5Ni-0,05C laminada a frio, seguidas de solubilização e envelhecimento a 610° C por uma hora. Os resultados foram comparados com os de amostras pré-deformadas, isto é, sem solubilização antes do envelhecimento.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um lingote de sete quilogramas da liga Fe-11Mo-5Ni-0,05C foi preparado em forno de indução à vácuo. Uma fatia deste lingote foi solubilizada à 1250° C por 30 minutos seguida de laminação a quente com redução de 60% em um único passe retornando ao forno na temperatura de 1220° por 8 minutos e em seguida foi temperada em água. Por laminação a frio foram fabricadas lâminas com reduções de 60%, 80%, 90% e 97%.

As amostras foram divididas em grupos conforme o tratamento térmico aplicado (tabela 1).

Tabela 1. Condições das Amostras Magnéticas

| Gr. | Condição Inicial | Temp. de Solubilização | Temp. de Envelhecim. |
|-----|------------------|------------------------|----------------------|
| M   | Laminada a frio  | 1100° C                | 610° C               |
| N   | Laminada a frio  | 800° C                 | 610° C               |
| P   | Laminada a frio  | Não solubilizada       | 610° C               |

As propriedades magnéticas foram obtidas por medição dos "loops" de histerese em um magnetômetro de amostra vibrante (VSM). As amostras para este ensaio são discos com 3,5 mm de diâmetro.

A correção para minimizar os efeitos do campo de desmagnetização foi feita utilizando a formulação apresentada por Cullity (1972) para um esferóide oblato, modelo que mais se assemelha a um disco.

$$H_{ef} = H_{et} - N \cdot \frac{I}{\mu_0} \quad (1)$$

$$N = \frac{4\pi r^2}{r^2 - 1} \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{r^2 - 1}} \cdot \text{sen}^{-1} \cdot \frac{\sqrt{r^2 - 1}}{r} \right) \quad (2)$$

$$r = \frac{c}{a} = \frac{\text{diâmetro}}{\text{espessura}}$$

### 3. RESULTADOS

Segundo MAGAT *et al.* (1988), a adição de até 5% de Ni não altera significativamente o diagrama de equilíbrio Fe-Mo no que se refere às fases que se formam. A análise do diagrama Fe-Mo é suficiente para o conhecimento das principais fases que se formam nas ligas com 5% de Ni adicionadas à sua composição química. A figura 1 apresenta o diagrama de equilíbrio Fe-Mo. A 800° C a fase Fe<sub>2</sub>Mo está presente. Tanto a 1100° C quanto a 800° C, a liga não apresenta anisotropia magnética, o valor da quadratura é menor que 0,8 (figura 6). Quanto a textura cristalográfica, a figura 2 mostra as seções de  $\phi_1=45^\circ$ , terminologia de Bunge, para as FDOC's ( função de distribuição de orientação cristalográfica) para uma amostra laminada 60% a frio e solubilizada a 1100° C e outra laminada 60% a frio, solubilizada a 1100° C e envelhecida por uma hora a 610° C. A figura 3 apresenta as seções de  $\phi_1=45^\circ$  para as FDOC's ( função de distribuição de orientação cristalográfica) de amostras laminadas a frio e envelhecidas por uma hora a 610° C. O tratamento térmico intermediário tanto a 1100° C quanto a 800° C modifica a textura de laminação, eliminando a componente {001}<110>. A textura de laminação é muito próxima da textura das amostras envelhecidas mostrada na figura 3 ( Abreu *et al.*, 1998).

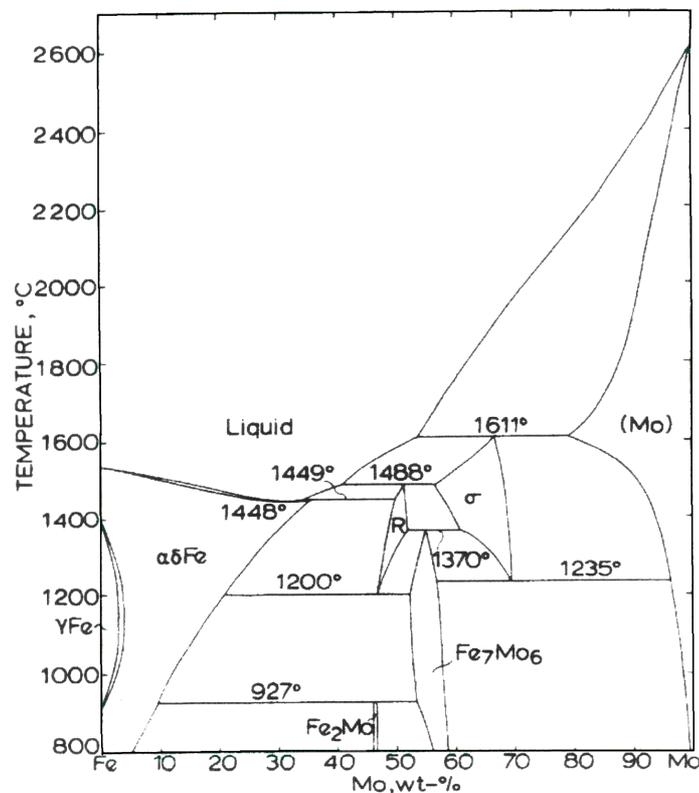


Figura 1 - Diagrama de fases Fe-Mo. (Miyazaki, 1979)

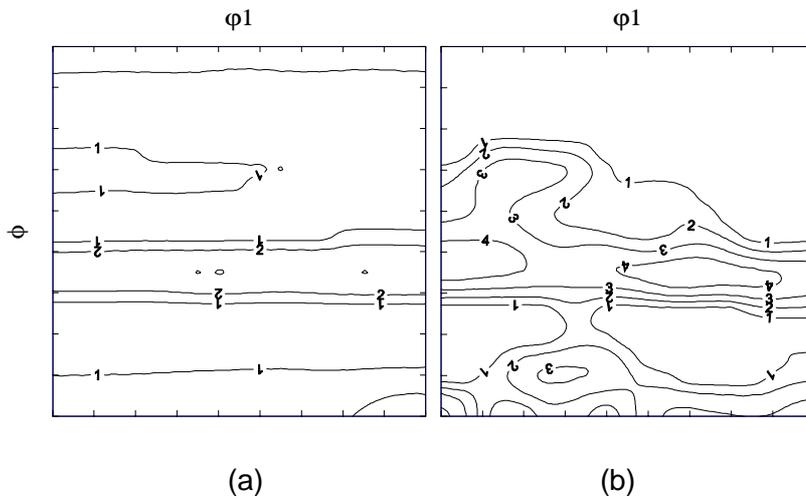


Figura 2- Seções de  $\phi_1=45^\circ$  para a função de distribuição de orientação cristalográfica para amostra laminada 60% a frio, solubilizada a  $1100^\circ\text{C}$  (a) e envelhecida a  $610^\circ\text{C}$  por uma hora após a solubilização (b).

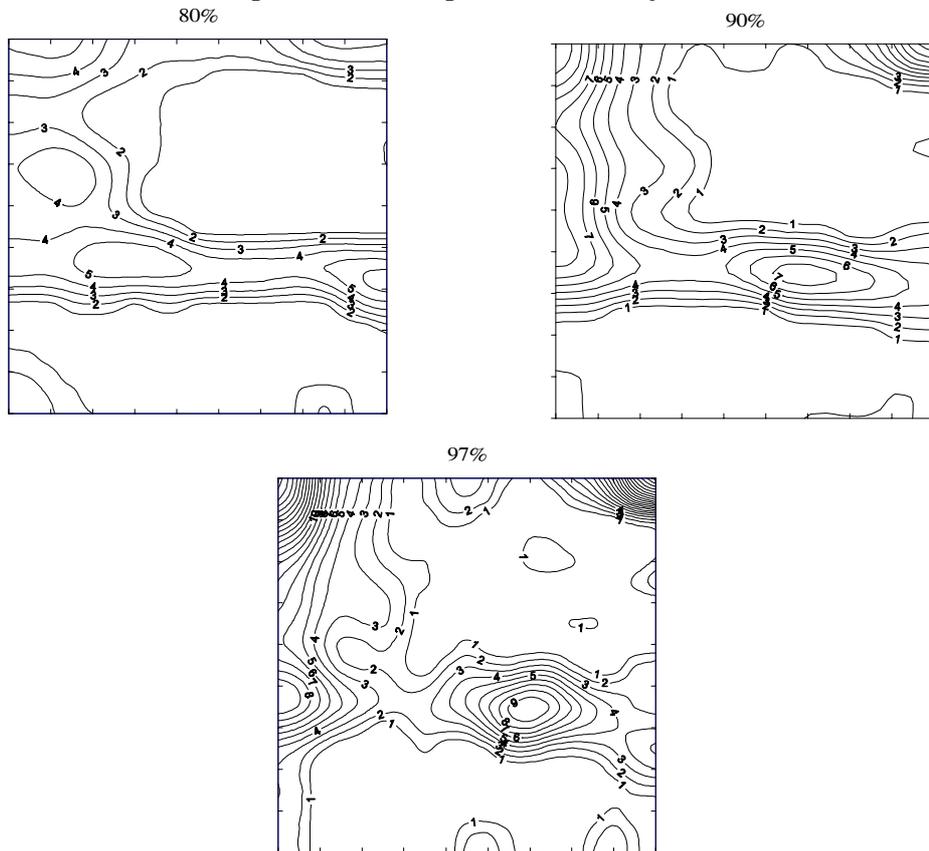


Figura 3- - Seções de  $\phi_1=45^\circ$  para a função de distribuição de orientação cristalográfica para amostra laminadas 80%, 90% e 97% a frio e envelhecidas a  $610^\circ\text{C}$  por uma hora.

A figura 4 apresenta a força coercitiva  $H_c$  em função da redução a frio para amostras sem solubilização antes do envelhecimento (P), solubilizadas a  $800^\circ\text{C}$  seguidas de envelhecimento (N) e solubilizadas a  $1100^\circ\text{C}$  seguidas de envelhecimento

(M). A solubilização intermediária para ligas com 11% de Mo não produziu uma melhoria da força coercitiva como foi verificado para amostras com 20% de Mo (JIM S., 1981).

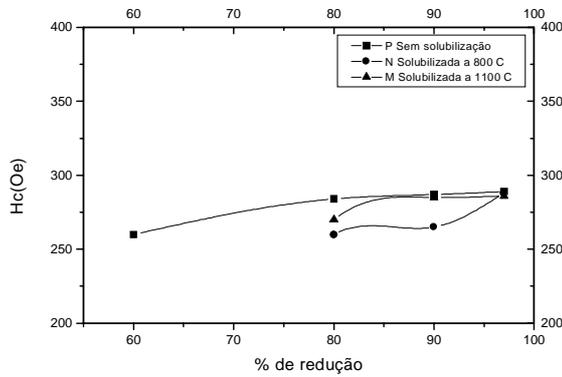


Figura 4- Variação da força coercitiva  $H_c$  com a redução a frio.

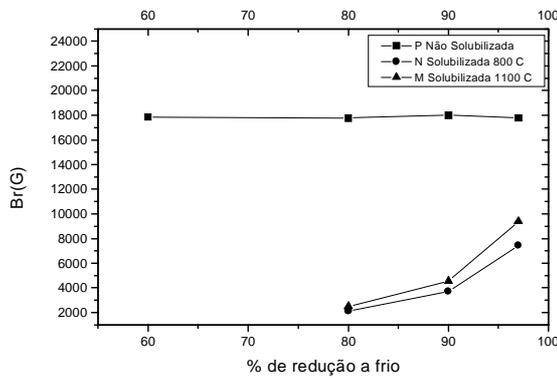


Figura 5- Variação da remanência magnética  $B_r$  com a redução a frio.

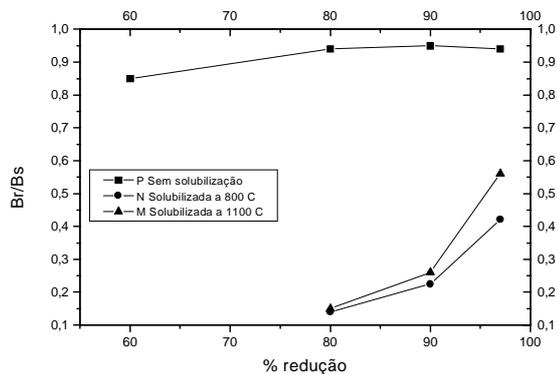


Figura 6- Variação da quadratura magnética ( $B_r/B_s$ ) com a redução a frio.

As figuras 5 e 6 apresentam a remanência magnética  $B_r$  e a quadratura, relação  $B_r/B_s$ , em função da redução a frio para amostras sem tratamento de solubilização antes do envelhecimento (P), solubilizadas a 800°C seguidas de envelhecimento (N), e,

solubilizadas a 1100° C seguidas de envelhecimento (M). A solubilização intermediária para ligas com 11% de Mo reduz o valor de  $H_c$ ,  $B_r$  e da quadratura magnética. As amostras tratadas termicamente a 800° C e 1100° C são isotrópicas. Este resultado está intimamente relacionado com a textura cristalográfica. O valor da remanência magnética e consequentemente da quadratura magnética já que a indução de saturação  $B_s$  é função da composição química, são mais acentuados quando existe uma direção preferencial. O comportamento da textura nestas ligas é semelhante ao dos aços carbono ou seja, a textura de laminação a frio se caracteriza pelas componentes  $\{001\}\langle 110\rangle$  e por uma fibra  $\langle 111\rangle$ . Com a recristalização há a intensificação da fibra  $\langle 111\rangle$  e o desaparecimento da componente  $\{001\}\langle 110\rangle$ . A componente  $\{001\}\langle 110\rangle$  está num plano da família  $\{001\}$ , plano este que contém a direção de fácil magnetização do ferro  $\{001\}\langle 100\rangle$ . A consequência do desaparecimento desta componente é a redução da anisotropia magnética representada pelo valor da quadratura magnética.

## CONCLUSÃO

O tratamento de solubilização tanto a 800° C quanto a 1100° C de ligas Fe-11Mo-5Ni-0,05 C elimina a textura de laminação e torna o material magneticamente isotrópico com valores de  $B_r/B_s$  bem abaixo de 0,8. A evolução da textura cristalográfica é similar ao que acontece nos aços deformados a frio e que sofrem um tratamento térmico que provoque a recristalização. Os valores de  $H_c$  e  $B_r$  nas ligas com 11% de Mo solubilizadas a 800° C e a 1100° C são inferiores aos valores obtidos para a liga envelhecida logo após a deformação a frio. Este comportamento é diferente das ligas com 20% de Mo onde a solubilização intermediária aumenta  $H_c$  apesar de reduzir a remanência magnética  $B_r$  (JIM *et al*, 1984).

## REFERÊNCIAS

ABREU H.F.G., TEODÓSIO J.R., COSTA VIANA C.S., Texture in Cold Rolled and Magnetically Aged Fe-Mo-Ni-C Alloys, *Texture and Microstructures*, vol. 31, pp 97-107, 1998.

ABREU H.F.G., TEODÓSIO J.R., NETO J.M., SILVA M.R., Texture Development and Magnetic Anisotropy in Semi-hard Magnetic Fe<sub>20</sub>Mo<sub>5</sub>Ni Alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 39, No 9, pp 1163-1167, 1998.

CULLITY B. S., Introduction to Magnetic Materials, Addison Wesley Publishing Company, Inc 1972.

JIM S., TIEFEL T.H., "New Ductile Fe-Mo-Ni Magnet Alloys". *Journal of Applied Physics* 52 (3), March 1981.

MAGAT E.M., MAKAROV G.M., LAPINA L.P. BELOTOREV E. *Fis. Metal Metaloved* (1988).

MIYAZAKI T., TAKAGISHI S., MORI H. AND KOZAKAI T., "The Phase Decomposition of Iron-Molybdenum Binary Alloys by Spinodal Mechanism", *Acta Metallurgica*, vol 28 , pp. 1143 to 1153.

## **INFLUENCE OF SOLUTION ANNEALING ON MAGNETIC PROPERTIES OF Fe-11Mo-5Ni-0,05C ALLOYS**

**Abstract.** *Alloys of the system Fe-Mo-Ni present high plasticity and magnetic properties that approach to the alloys Vicalloy II (alloys with 50% Co, 10 to 14% V and Iron) with the advantage of they do not possess in its composition the element Co, of high cost and not abundant in the nature. The study of these alloys began using raw material with high degree of purity. The addition of carbon to the alloy with 20% of Molybdenum increased about twice in the value of the coercive force without significant reduction of the magnetic remanence and saturation induction. Due to the good ductility of these alloys, they can be considered an alternative in the construction of small magnetic circuits, difficult of they be conformed with magnetos of Alnico or ferrite, which are not possible of being cold worked. In the present work it is presented the magnetic properties for laminated samples cold rolled with reductions varying from 60% to 97%, annealed at temperatures of 1100<sup>0</sup> C or of 800<sup>0</sup> C and followed by aging. The results were compared with samples aged after cold rolling without intermediary annealing.*