

## **OBTENÇÃO DE UM AÇO INOXIDÁVEL DE ESTRUTURA DÚPLEX DO SISTEMA FeMnAl PROCESSADO POR MOAGEM DE ALTA ENERGIA**

I.E.Pavлак; J.D.T.Capocchi; O.M.Cintho

Guabirobeira, nº 398, Santa Paula, Ponta Grossa PR/ eng.igorpavлак@yahoo.com.br

Universidade Estadual de Ponta Grossa; Universidade de São Paulo; Universidade Estadual de Ponta Grossa

### **RESUMO**

*A obtenção de aços inoxidáveis de sistema FeMnAl vem sendo alvo de pesquisas desde a década de sessenta, mediante boas propriedades mecânicas e resistência a oxidação apresentadas, as quais podem ser comparadas à dos aços inoxidáveis convencionais de sistema FeNiCr. Também atrai a atenção de pesquisadores mediante maior disponibilidade e custos dos elementos. Assim, pós metálicos de ferro, manganês e alumínio puros, foram submetidos à metalurgia do pó, processados em um moinho de alta energia do tipo Spex, em atmosfera de nitrogênio. Em seguida, os produtos de moagem foram compactados na forma de pastilha e sinterizadas em atmosfera inerte. O produto final foi submetido a análise metalográfica por microscopia ótica e eletrônica de varredura, assim como ensaio de microdureza. A análise metalográfica mostrou a presença de uma estrutura tipicamente dúplex de grão de ferrita e de austenita. A presença destas fases foi comprovada pela análise por difração de raios x.*

Palavras-chave: moagem de alta energia, aço inoxidável FeMnAl, estrutura dúplex.

## **INTRODUÇÃO**

### Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis comerciais são ligas constituídas basicamente por ferro-cromo, ferro-níquel ou ferro-cromo-níquel, onde cada caso resulta em uma microestrutura característica. Representam um papel importante no mundo moderno, mesmo que sua produção represente somente 2,2% do total de produção global de aços<sup>(1)</sup>.

### Aços Inoxidáveis de Estrutura Dúplex

Os aços inoxidáveis dúplex constituem em um grupo de aços que possuem ambas as fases ferrita e austenita como fases primárias. Onde são, convencionalmente, constituídos por ferro, níquel e cromo.

A união dessas duas fases em uma mesma estrutura resulta em uma combinação das propriedades características de cada uma delas, onde esse balanço microestrutural oferece boa combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão<sup>(2)</sup>. Esta combinação favorável de propriedades faz com que esta classe de aços inoxidáveis seja utilizada em uma vasta gama de aplicações na indústria química, petroquímica, nuclear e de papel.

### Sistema FeMnAl

Aços inoxidáveis de sistema FeMnAl tem sido objetivo de muitos estudos, com início na década de 60. Uma vez que este sistema permite a substituição de níquel por manganês, e de cromo por alumínio em um sistema de aço inoxidável austenítico convencional – FeCrNi<sup>(3)</sup>. Recentemente, uma considerável soma de interesses tem sido expressada na possibilidade de desenvolvimento de ligas Fe-Mn-Al-C devido principalmente ao seu baixo custo e elevada deformação com boa ductilidade e dureza<sup>(2,4,5)</sup>. O baixo custo está diretamente ligado à facilidade de extração dos elementos substituintes do cromo e níquel. Uma alternativa apresentada pela literatura é a substituição parcial do cromo pelo alumínio<sup>(2,4,5)</sup>.

### Moagem de Alta Energia e Metalurgia do Pó

O processo de elaboração de ligas por moagem de alta energia é uma técnica alternativa para preparação de aços e ligas, que permite a produção de materiais homogêneos partindo da mistura pós-elementares com microestrutura controlada. A

produção das ligas é feita pela repetição de processos de soldagem e fratura da mistura de partículas de pó, onde tal combinação é de alta energia<sup>(6)</sup>

O presente trabalho visa à substituição total dos elementos de liga constituintes de um aço inoxidável de estrutura dúplex convencional, cromo e níquel, por alumínio e manganês, respectivamente, através do processamento de pós por moagem de alta energia com controle de uma atmosfera inerte.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### Moagem dos pós

Pós elementares de ferro, manganês e alumínio (60%Fe-25%Mn-15%Al) foram processados por um moinho de alta energia vibratório do tipo SPEX 8000 Mixer/Mill, utilizando poder de moagem de 5:1 por períodos de 8 horas. O poder de moagem é dado pela relação entre a massa dos corpos moedores (esferas de moagem) e a massa do pó a ser moído. Sendo a massa do pó aproximadamente 4g e a dos corpos moedores 20g, tem-se o poder de moagem acima citado. Utilizou-se atmosfera de nitrogênio nos processamentos do presente trabalho.

### Ensaio de Compressibilidade<sup>(7)</sup>

Os produtos de moagem foram submetidos a tratamento térmico de recozimento a 700°C sob vácuo, para alívio de tensões devido ao alto encruamento sofrido durante a moagem e em seguida compactados, em uma máquina de ensaios universal AG-I Shimadzu, em forma de pastilha em matriz de 8 mm de diâmetro, prensados uniaxialmente com elevação gradativa da carga, variando de 1000Kgf a 12000Kgf afim de se obter sua respectiva curva de compressibilidade. Curvas de compressibilidade resultam em densidade por tensão, a fim de determinar com qual tensão o material irá compactar<sup>(8,9)</sup>.

### Tratamento Térmico - Sinterização

Após compactação a pastilha foi submetida a tratamento térmico de sinterização em um forno tubular, em um tubo de quartzo de aproximadamente 10 mm de diâmetro, acoplado a uma bomba de vácuo, a fim de evitar oxidação durante o tratamento. O tratamento foi realizado a uma temperatura de sinterização de 1200°C por 1 hora.

### Etapas decorrentes

Seguido do tratamento térmico, a pastilha foi embutida em baquelite e submetida à metalografia, lixamento e polimento. E posteriormente submetida a ataque químico NITAL 2%. Por fim, foi analisada através de microscopias ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), além de ensaios de microdureza e difração de raios x.

### RESULTADO E DISCUSSÃO

A moagem resultou em pós ultrafinos que inicialmente apresentaram elevada dificuldade de compactação devido ao alto encruamento obtido durante o processo de moagem. A Fig. 1 mostra imagens dos produtos de moagem, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, MEV.

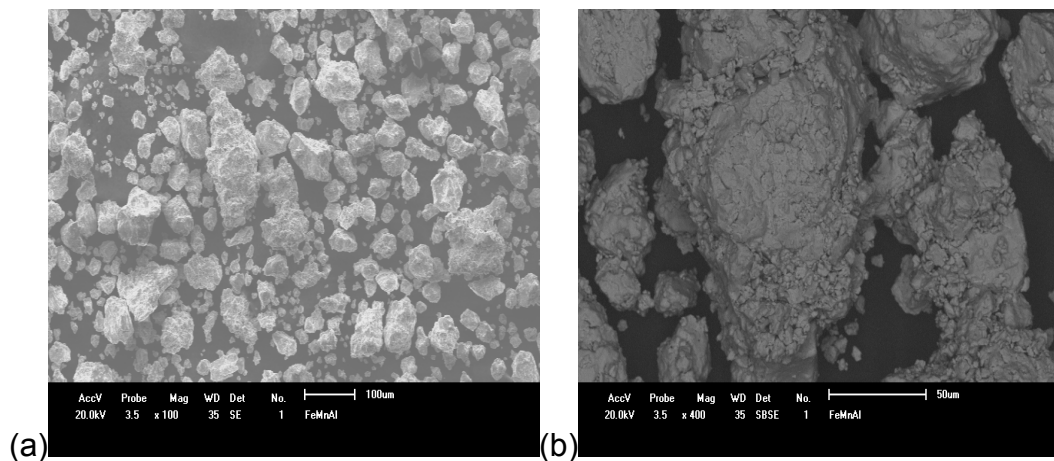


Fig. 1 – Imagens dos produtos de moagem obtidas por MEV. (a) SE e (b) BS.

Por meio das análises micrográficas do pó, pode-se também verificar a homogeneidade de distribuição dos elementos iniciais (ferro, manganês e alumínio) ao longo das partículas do produto de moagem, conforme ilustra a Fig. 1 (b), obtida por elétrons retro-espalhados.

Da compactação resultou-se curva de compressibilidade referente ao material, a qual apresentou característica típica de pós submetidos à moagem de alta energia, apresentando inicialmente uma pequena concavidade (1) referente ao acomodamento dos pós, seguida por uma característica quase linear (2), devido ao

alto encruamento sofrido e a alta energia adquirida durante o processo de moagem de alta energia<sup>(8)</sup>. A Fig. 2 representa a curva de compressibilidade dos produtos de moagem.

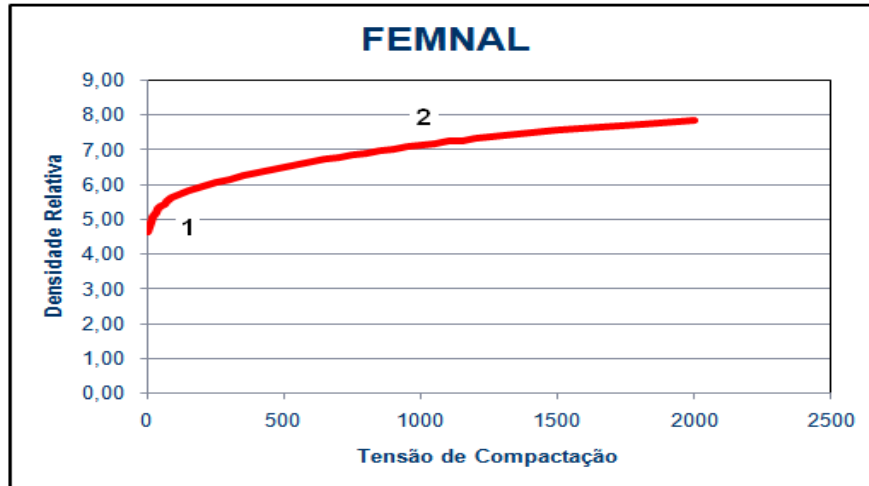


Fig. 2 – Curva de Compressibilidade dos pós de FEMNAL, indicando uma pequena curvatura (1) seguida por comportamento quase linear (2).

O ensaio de dureza, realizado no material após a etapa de tratamento térmico de sinterização, indicou uma dureza média de  $(198 \pm 32,5)$  HV. Estes valores de dureza, embora um pouco inferiores, são comparáveis ao dos aços inoxidáveis dúplex convencionais<sup>(9)</sup> considerando que foram obtidos por metalurgia do pó.

A análise metalográfica por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, indicou a formação de um aço de estrutura duplex de grãos finos e morfologia irregular conforme apresentado na Fig. 3.

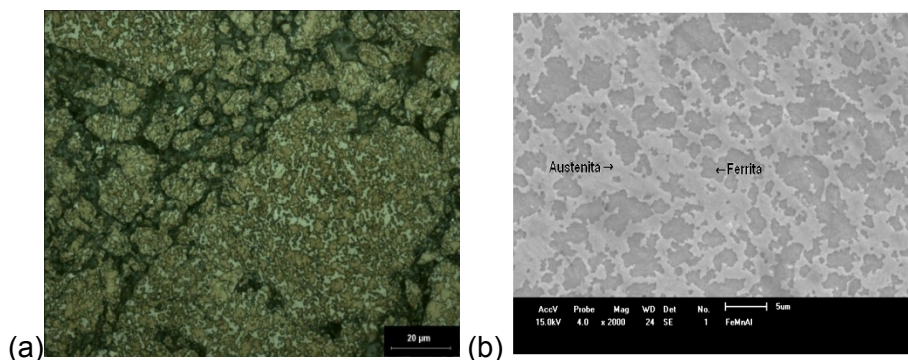


Fig. 3 - Imagem obtidas através de (a) MO e (b) MEV para demonstrar a formação de um aço inoxidável dúplex.

A obtenção de um aço inoxidável de estrutura dúplex de sistema FeMnAl foi comprovada através da difração de raios x, a qual identificou a presença das fases austenita e ferrita pelos picos característicos referentes a essas fases, principalmente pelos picos de intensidade em 43 e 44 graus, representado pela Fig. 4. Tais valores foram comparados com as fichas características de análises de estruturas austenítica e ferrítica, ficha JCPDS 33-0397 e ficha JCPDS 87-0722.

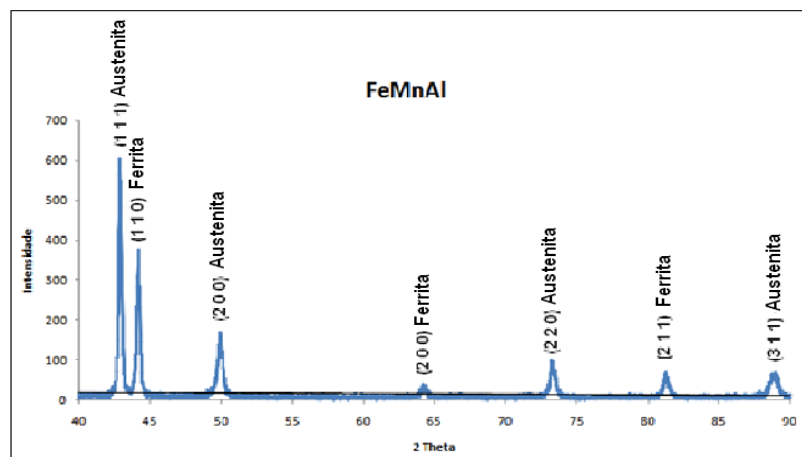


Fig. 4 - Difratoograma de raios x. Cada pico está associado ao seu respectivo plano cristalográfico, assim como sua fase característica – ferrita e austenita.

O difratograma de raios x obtido pode ser comparado também a outros referente a aços inoxidáveis de estrutura dúplex de sistema convencional, FeCrNi, porém apresenta pequenos deslocamentos dos picos devido a diferença de tamanho dos átomos dos diferentes sistema, assim como também suas eletronegatividades e interações entre si, que podem acarretar em alterações nos parâmetros de rede.

## CONCLUSÕES

Foi obtido um aço inoxidável de estrutura dúplex do sistema FeMnAl utilizando moagem de alta energia.

O aço inoxidável de estrutura dúplex obtido apresentou grãos finos de morfologia irregular e de dureza comparável ao dos aço inoxidáveis dúplex convencionais.

## **AGRADECIMENTOS**

À Fundação Araucária e ao programa CAPES/PROCAD pela bolsa de iniciação científica concedida e pelo apoio financeiro que viabilizaram o desenvolvimento do projeto.

## **REFERÊNCIAS**

1. PADILHA, A.F. PLAUT, R.L.; Stainless Steels Heat Treatment In: Geoge E. Totten (Editor). (Org). **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. 2th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, v.2, p.695-739, 2007.
2. SAHRAOUI, T. HADJI, M. YAHY, M., **Materials Science Engineering A** 523 (2009) 271-276.
3. CINTHO, O.M. SORDI, V.L. BUENO, L.O. Processamento e caracterização de uma chapa fina de aço FEMNAL para estampagem. UNICAMP, SP, 1988. **Anais do 8º CBCIMAT**.
4. VERCAMMEM, S. BLANPAIN, B. De COOMAN, B. WOLLANTS, P., **Acta Materialia** 52 (2004) 2005-2010.
5. Je Doo Yoo, K. Tae Park, **Materials Science and Engineering A** 496 (2008) 417-424.
6. SURYNARAYANA, C. **Mechanical Alloying and Milling, Process in Material Science**, vol. 46, p.1-184, 2001
7. ASTM B331-95 Standard Test Method For Compressibility of Metals Powders in Uniaxial Compaction, Atatiba, São Paulo, 2009. **Anais do Seventh International Latin-American Conference on Powder Tecnology – PTECH**.
8. ZILNYK, K.D.; CINTHO, O.M. A New Methodology for Compressibility Curves Construction.

9. *ASM Metals Handbook - Properties and Selection, Irons Steels, and High Performance Alloys*. Vol. 1. p. 861. (1990).

## **UTILIZATION OF ALUMINUM TO OBTAINING A DUPLEX TYPE STAINLESS STEEL USING HIGH ENERGY BALL MILLING**

### **ABSTRACT**

The obtaining of stainless steel using aluminum in its composition - FeMnAl system, has been researched subject since the sixties, by good mechanical properties and resistance to oxidation presented, when compared with conventional FeNiCr stainless steel system. In another point, the Aluminum and Manganese are low cost than traditional elements. This work, metallic powders of iron, manganese and pure aluminum, were processed in a Spex type high-energy ball mill in nitrogen atmosphere. The milling products were compressed into pastille form and sintered under inert atmosphere. The final products were characterized by optical and electronic microscopy and microhardness test. The metallographic analysis shows a typical austenite and ferrite duplex type microstructure. The presence of these phases was confirmed according x ray diffraction analysis.

Key words: high energy ball milling, FeMnAl steel stainless, duplex type.