

## **ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO E CITOTOXICIDADE DO AÇO 17-4PH OBTIDO POR METALURGIA CONVENCIONAL E POR MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO.**

Costa, I., Correa, O. V., Rogero, S.O., Saiki, M.  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – 05508-900 - São Paulo – SP  
[icosta@ipen.br](mailto:icosta@ipen.br)  
Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
IPEN/CNEN-SP

### **RESUMO**

*Neste trabalho foi avaliada a resistência à corrosão do aço inoxidável endurecível por precipitação 17-4PH obtido por moldagem de pós por injeção e por metalurgia convencional em solução naturalmente aerada de cloreto de sódio 3%, a 25°C. Os resultados destes dois tipos de aço foram comparados. A resistência à corrosão destes aços foi investigada por meio de ensaios eletroquímicos em tempos crescentes de ensaio. A susceptibilidade à corrosão por pites foi avaliada utilizando-se curvas de polarização potenciodinâmica cíclica, e a tendência à corrosão intergranular, pela norma ASTM A 262, prática A modificada. Adicionalmente, a citotoxicidade dos dois tipos de aço 17-4PH foi investigada por dois métodos, o de vermelho neutro e o "overlay". Ambos aços apresentaram-se passivos na solução de cloreto, sob condições de estado estacionário, no potencial de corrosão, mas apresentaram susceptibilidade à corrosão por pites no ensaio de polarização potenciodinâmica. O aço fabricado por moldagem de pós por injeção, todavia, mostrou-se ligeiramente mais susceptível à corrosão por pites, e isto foi comprovado pela observação da superfície por microscopia eletrônica de varredura após o ensaio. Pites de corrosão foram associados com as porosidades e com a presença de inclusões de óxidos no fundo destas porosidades. Nenhum dos dois aços testados apresentou tendência à corrosão intergranular ou citotoxicidade por qualquer dos testes realizados.*

Palavras-chave: corrosão, citotoxicidade, aços endurecíveis por precipitação, metalurgia do pó, moldagem de pós por injeção.

### **INTRODUÇÃO**

Os aços endurecíveis por precipitação são aços inoxidáveis que podem ser endurecidos por tratamentos térmicos e podem ser classificados em austeníticos, semi-austeníticos e martensíticos. O aço inoxidável 17-4PH é um aço de baixo carbono no estado solubilizado que pode ser endurecido por precipitação pertencente ao grupo dos aços martensíticos (Chuang et al., 1999). Após tratamentos de envelhecimentos a microestrutura deste aço é composta de martensita e precipitados intermetálicos de cobre extremamente finos, cuja propriedade depende da temperatura de

envelhecimento usada. É ferromagnético, seja no estado solubilizado ou envelhecido. É um dos aços endurecíveis por precipitação mais empregados, sendo utilizado em usinas nucleares, aeronaves, turbinas e componentes de indústrias químicas devido a uma combinação de boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão a temperaturas até aproximadamente 700°C e resistência moderada à corrosão em meios salinos. A principal vantagem deste aço em comparação aos aços austeníticos, tais como, AISI 304 e 316, é a sua resistência mecânica bastante superior após tratamentos de envelhecimento. O tratamento de endurecimento que aumenta a resistência mecânica do aço 17-4PH promove a precipitação de fases tais como a fase  $\epsilon$  rica em cobre e/ou a fase  $\alpha'$  rica em cromo (El Hilali et al., 1999). Estudos de corrosão deste tipo de aço produzido por metalurgia convencional abordaram a resistência à corrosão generalizada, por pites e a fragilização por hidrogênio (Chuang et al., 1999), corrosão sob tensão fraturante (El Hilali et al., 1999) e corrosão em frestas (Malik et al., 1995).

Nos últimos anos, este aço tem sido produzido também por técnicas de metalurgia do pó. É geralmente aceito que materiais produzidos por metalurgia do pó apresentam porosidades, as quais, por sua vez, afetam a resistência à corrosão e isto tem sido objeto de estudo de várias pesquisas recentes (Borges et al., 1994; Pereira et al., 1995; Sobral et al., 1995, 1997; Maahn et al., 1994; Fedrizzi et al., 1994; Raghu et al., 1988; Tremblay & Angers, 1995; Otero et al., 1997; Klar & Samal, 1995; Sands et al., 1966). A porosidade inerente aos aços produzidos por metalurgia do pó geralmente resulta em diminuição da resistência à corrosão destes em comparação aos aços fabricados por metalurgia convencional (Maahn et al., 1994; Fedrizzi et al., 1994; Raghu et al., 1988; Tremblay & Angers, 1995; Otero et al., 1997; Klar & Samal, 1995; Sands et al., 1966; Sobral et al., 2001a, 2001b). A porosidade aumenta a área de material metálico exposto ao meio corrosivo e pode, eventualmente, induzir corrosão em frestas, gerando células de concentração dentro dos poros e, conseqüentemente, reduzindo a passividade do aço sinterizado.

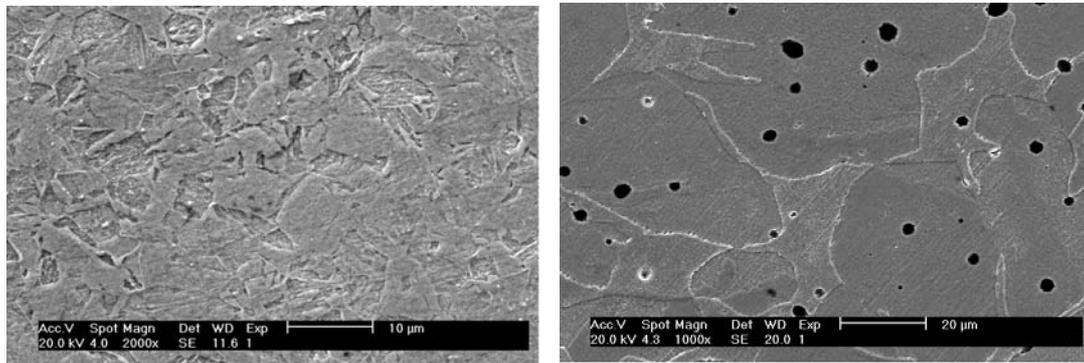
Recentemente, uma nova técnica de metalurgia do pó, conhecida por moldagem de pós por injeção (PIM) foi desenvolvida e esta tem sido utilizada para a fabricação de componentes sinterizados com maior resistência à corrosão. A tecnologia PIM é comercialmente usada para a manufatura de pequenos componentes com alto grau de complexidade (Mathiesen & Maahn, 1995). Geralmente são usados pós finos (<25  $\mu\text{m}$ ), resultando em densidades do sinterizado de cerca de 98% da densidade teórica da liga. Ligas fabricadas por moldagem por injeção geralmente apresentam poucos poros e arredondados o que aumenta a resistência à corrosão do material comparativamente aos aços fabricados por outras técnicas de metalurgia do pó.

Aços moldados por injeção podem ser utilizados em componentes ortodônticos e instrumentos cirúrgicos, como os aços 316L e 17-4PH freqüentemente usados para aplicações ortodônticas. O comportamento de resistência à corrosão do aço 316L, seja convencional ou produzido por metalurgia do pó tem sido bastante estudado, mas o mesmo não ocorre com o aço 17-4PH, particularmente o fabricado pela tecnologia PIM. Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão do aço 17-4PH PIM em meio de cloreto de sódio em períodos crescentes de

ensaio e também a sua citotoxicidade, visando seu uso em aparelhos ortodônticos. A susceptibilidade à corrosão por pites e intergranular deste aço, foram também avaliadas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de aço 17-4PH fabricadas pela tecnologia PIM foram fornecidas pela LUPATECH, Steelinject, Caxias do Sul, Brasil. Após a etapa de moldagem por injeção, foi realizada uma pré-sinterização a 980°C por 1 hora em atmosfera de H<sub>2</sub>. Esta foi seguida por sinterização a 1300°C por 4 horas em atmosfera redutora argônio/hidrogênio. A densidade final do aço sinterizado foi 7.6 g.cm<sup>-3</sup>. A densidade teórica deste aço é de 7.8 g.cm<sup>-3</sup>, resultando em porosidade de cerca de 3%, o que indica ausência de porosidade interconectada. A composição química do aço 17-4PH PIM usada neste estudo foi apresentada em trabalho anterior (Sobral et al., 2001a). A Figura 1 mostra micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da microestrutura dos dois tipos de aço 17-4PH usados, o fabricado por metalurgia convencional e por moldagem de pós por injeção.



(a)

(b)

Figura 1. Microestrutura dos aços 17-4PH produzidos por (a) metalurgia convencional e (b) pela técnica de moldagem de pós por injeção (PIM). Ataque: Solução de Villela.

O aço 17-4 PH fabricado por metalurgia convencional mostra uma estrutura predominantemente martensítica com pequenos grãos, enquanto o fabricado por PIM apresenta grãos grandes com uma estrutura martensítica no interior dos grãos e poros arredondados. Os grãos grandes podem ser consequência das altas temperaturas adotadas nos estágios de pré-sinterização e sinterização.

Amostras dos dois tipos de aço foram preparadas para os ensaios eletroquímicos por embutimento em resina de cura a frio e após endurecimento foi preparada a superfície para exposição ao eletrólito. A superfície foi lixada com papel de carbetto de silício até acabamento com grana #2000, polida com pasta de diamante (6 µm e 1 µm), lavada com água deionizada e seca com ar quente. Após esta preparação as amostras foram imersas no meio de ensaio que consistiu de uma solução de cloreto de sódio 3% a 25 ± 2°C.

### Resistência à corrosão.

Para avaliar a resistência à corrosão dos aços foram utilizados ensaios eletroquímicos que consistiram de medidas de potencial de circuito aberto ( $E_{ca}$ ) em função do tempo e polarização cíclica potenciodinâmica. A susceptibilidade à corrosão intergranular dos aços 17-4 PH foram avaliadas pela norma ASTM A262, utilizando a prática A modificada (ataque eletrolítico usando persulfato) (ASTM A262-81), após tratamento térmico a 675°C por 1h. Para os ensaios de polarização foi utilizado um potenciostato 273A EG&G PAR e um arranjo de três eletrodos, um fio de platina como eletrodo auxiliar e um eletrodo de calomelano saturado como eletrodo de referência. Os parâmetros de interesse determinados foram a densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ), o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), o potencial de pite ou de quebra da película passiva ( $E_{pite}$ ), o potencial de repassivação ou de proteção ( $E_{prot}$ ) e a densidade de corrente passiva ( $i_{pass}$ ). As amostras foram polarizadas de -500 mV vs  $E_{ca}$  na direção anódica e a direção foi revertida quando a densidade de corrente aumentou por aproximadamente  $10^3$  vezes e esta foi interrompida quando se atingiu o potencial de proteção.

As superfícies dos aços foram observadas, antes e após o ensaio de imersão e também após ensaio de polarização por microscopia eletrônica de varredura com um microscópio Philips XL-30.

#### Ensaio de citotoxicidade.

A investigação de toxicidade nos dois tipos de aço foi feita pelo ensaio de citotoxicidade através de dois métodos: difusão em agar (overlay) e incorporação do vermelho neutro, seguindo metodologia descrita em trabalho anterior (Rogerio et al., 2003).

#### Análise dos produtos de corrosão após imersão em meio de cultura.

Os produtos de corrosão obtidos, após imersão em meio de cultura para ensaio de citotoxicidade, foram quantificados pelo método de análise por ativação com nêutrons, conforme procedimento descrito em trabalho anterior (Rogerio et al., 2000).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A susceptibilidade à corrosão intergranular do aço 17-4PH foi avaliada por ataque eletrolítico em solução de persulfato de sódio após tratamento térmico a 675°C por 1h. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) são mostradas na Figura 2. O aço convencional apresenta microestrutura predominantemente martensítica e não se observou ataque intergranular após o tratamento térmico e ataque eletrolítico. O aço 17-4PH PIM tratado termicamente também não apresentou ataque intergranular, indicando alta resistência a esta forma de ataque. Pites rasos foram observados na superfície deste último aço, além de poros arredondados e partículas esféricas dentro dos poros. Estas partículas foram analisadas por análise de energia dispersiva (EDS) e os resultados indicaram que estas correspondem a partículas de  $SiO_2$ , possivelmente retidas dentro dos poros durante o processo de fabricação (Macdonald et al., 1993; Sekine, 1991). Algumas das partículas de sílica podem ter sido removidas dos poros por polimento mecânico ou ataque

eletrolítico. O tamanho médio de grãos do aço PIM após tratamento térmico foi de  $(43 \pm 4) \mu\text{m}$ . A estrutura dos aços na Figura 2 mostra que nenhum deles apresenta susceptibilidade ao ataque intergranular.

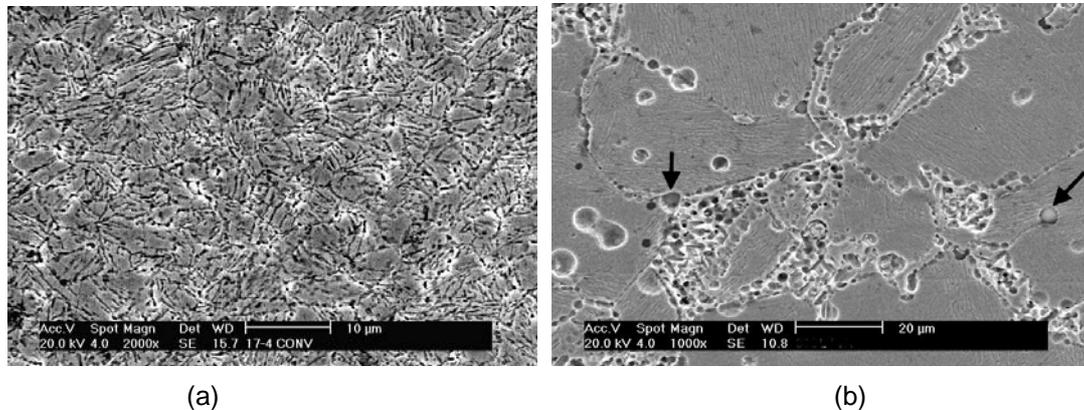


Figura 2. Micrografia dos aços 17-4PH após tratamento térmico ( $675^{\circ}\text{C}$  por 1h) e ataque eletrolítico. Aço fabricado por (a) metalurgia convencional; (b) moldagem de pós por injeção.

A Figura 3 mostra a variação do potencial de circuito aberto  $E_{ocp}$ , com o tempo para um período de 21h. Nesta figura nota-se que imediatamente após imersão este potencial era de aproximadamente  $-215\text{mV}$ , diminuindo nos primeiros minutos de imersão para  $-225\text{mV}$ , deslocando-se em seguida para valores mais nobres, até que após 2h um potencial relativamente estável e de cerca de  $-160\text{mV}$  foi atingido. Este potencial manteve-se estável por 1h, e em seguida apresentou pequena queda. Entre 5h e 19h nota-se uma tendência de aumento do potencial, ocorrendo um número de oscilações cuja frequência diminuiu com o tempo até que após 19h de ensaio ocorreu uma razoável estabilização do potencial com poucas oscilações em torno de um potencial de aproximadamente  $-100\text{mV}$ . Um período de 20h foi determinado como um período adequado para a estabilização do potencial deste aço.

As curvas de variação do  $E_{ca}$  vs tempo (Figura 3) indicaram comportamento passivo para os dois aços 17-4PH estudado em solução naturalmente aerada de cloreto de sódio. A queda inicial de  $E_{ca}$  observada nos primeiros minutos de imersão deve ter ocorrido pela dissolução parcial da película de óxido formada ao ar, logo após imersão no meio de ensaio. Esta queda foi seguida por um aumento de potencial, causada provavelmente pelo espessamento do óxido passivo para períodos mais longos de ensaio. Já as oscilações observadas na curva de  $E_{ca}$  vs tempo sugere períodos de quebra do filme passivo seguidos por sua recuperação na superfície do aço, de forma similar à que ocorre durante a nucleação de pites e repassivação. Estes resultados sugerem que o ataque agressivo do íons cloreto ao filme passivo causam a formação de pites instáveis que tendem a repassar sob condições de estado estacionário.

A Figura 4 mostra curvas de polarização típicas dos aços 17-4PH convencional e PIM, em solução naturalmente aerada de cloreto de sódio. O potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) obtido destas curvas para ambos os aços 17-4PH, convencional e PIM, foi de aproximadamente  $-310\text{mV}$  e  $-358\text{mV}$ , respectivamente. Desde  $E_{corr}$  até  $-175\text{mV}$  (SCE) a curva de polarização para o aço 17-4PH PIM tem

comportamento típico de ativação por polarização. Em potenciais de cerca de -175mV observa-se variação na inclinação de Tafel e em aproximadamente -75mV (SCE) um pequeno pico anódico é notado. Um grande aumento na corrente ocorreu em potenciais próximos a 10mV e superiores, indicando a quebra do filme passivo ( $E_b$ ). A direção de polarização foi revertida quando a densidade de corrente aumentou por três ordens de grandeza. O potencial no qual a curva na direção reversa coincide com a região passiva, isto é, quando o “loop” é completado, é conhecido como potencial de proteção,  $E_{prot}$ .

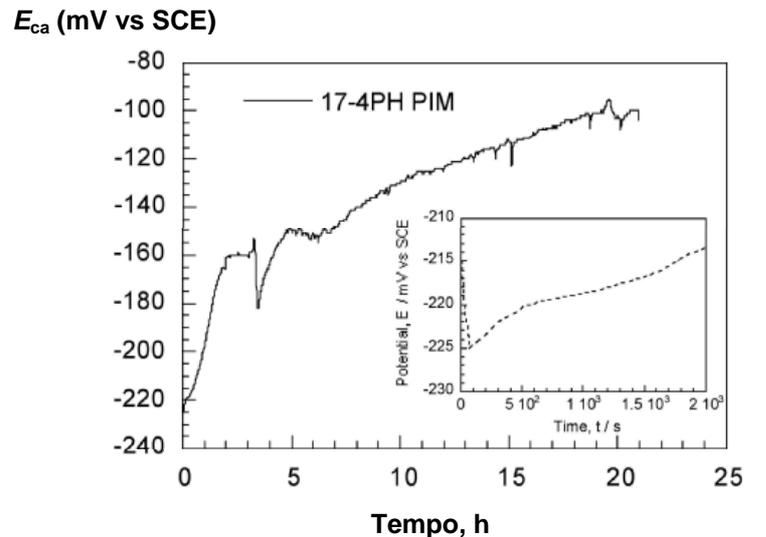


Figura 3. Variação de  $E_{ca}$  vs tempo para aço 17-4PH (PIM) em solução NaCl 3% a 25 °C.

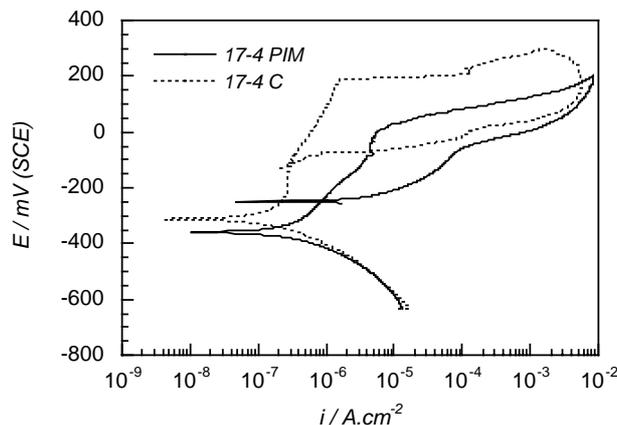


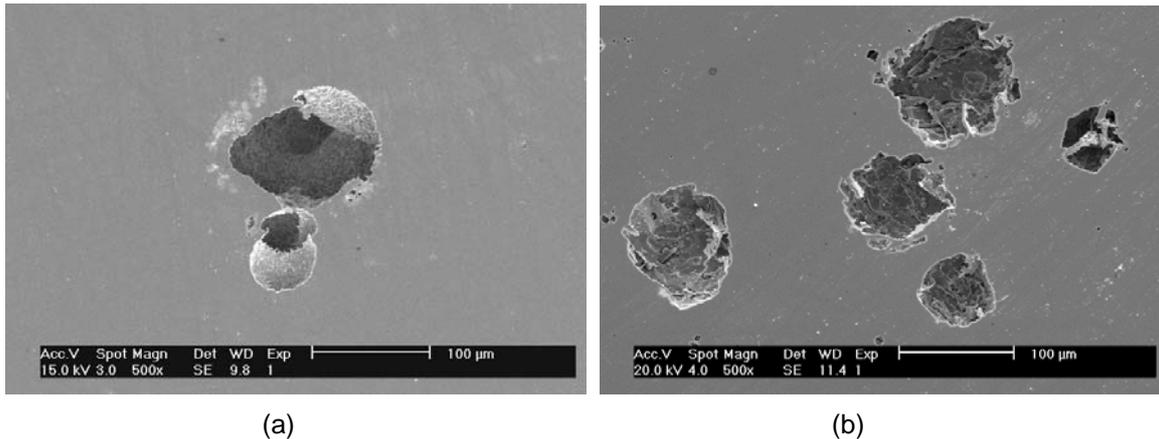
Figura 4. Curvas de polarização cíclica potenciodinâmica dos aços 17-4PH produzidos por moldagem de pós por injeção (17-4 PIM) e metalurgia convencional (17-4 C).

Os valores de densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) foram determinados pela extrapolação da parte catódica da curva para o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ). O valor estimado para o aço PIM foi de  $6 \times 10^{-7}$  A.cm<sup>-2</sup> que é típico de metais passivos. Entretanto, a indicação de um comportamento ativo para baixas sobretensões sugere que a camada passiva não é altamente resistente, permitindo a dissolução parcial do aço, pelo menos nas regiões mais fracas da película de óxido superficial. A

curva de polarização do aço convencional indica um comportamento essencialmente passivo na faixa de potenciais de aproximadamente  $-250\text{mV}$  até  $-100\text{mV}$ , com uma densidade de corrente passiva ( $i_{\text{pass}}$ ) de aproximadamente  $3 \times 10^{-7} \text{ A.cm}^{-2}$ . Em potenciais acima de  $-100\text{mV}$  (SCE) a densidade de corrente lentamente aumenta, mas somente em potenciais em torno de  $190\text{mV}$ , o aumento de corrente indica a quebra do filme passivo. A comparação das curvas de polarização para os dois aços, PIM e convencional, permite observar que as densidades de corrente para o aço convencional foram menores em toda a faixa de potenciais. O potencial de quebra do filme passivo e o de proteção associados com este último tipo de aço foram também significativamente superiores aos do aço PIM. Estes resultados indicam a presença de uma película com características mais protetoras sobre o aço convencional em comparação ao PIM. O valor estimado para a densidade de corrente de corrosão,  $i_{\text{corr}}$ , para o primeiro tipo de aço foi de  $1.5 \times 10^{-7} \text{ A.cm}^{-2}$ , isto é, da mesma ordem de grandeza da associada ao aço PIM.

As principais diferenças observadas nas curvas de polarização dos dois aços (Figura 4) são a indicação de um comportamento pseudo-ativo para o aço PIM em baixas sobretensões, e maiores valores de densidade de corrente para este aço em toda a faixa de polarização anódica. O aumento de corrente com o aumento do potencial deve-se provavelmente ao ataque do aço nas áreas de defeito do filme e/ou a permeabilidade desta película. As regiões mais susceptíveis do filme passivo são as regiões de defeito ou descontinuidades que podem ser relacionadas com a presença de porosidades e de partículas de óxido, observadas no aço fabricado pela tecnologia PIM. Valores de  $E_b$  e  $E_{\text{prot}}$  menores para o aço PIM comparados ao convencional, sugere uma maior susceptibilidade à corrosão por pites do primeiro. Neste aço, as áreas dos poros podem atuar como frestas, abaixando a resistência do aço a esta forma de ataque. É possível que o teor de oxigênio nas regiões de difícil acesso embaixo das partículas de óxido seja insuficiente para causar o rápido reparo deste filme, uma vez tenha sido danificado. A alta disponibilidade de oxigênio no caso do aço convencional, por sua vez resulta em menores densidades de corrente passiva ( $i_{\text{pp}}$ ) e maiores valores de  $E_b$  e  $E_{\text{prot}}$  para este aço em relação ao aço PIM.

Outra evidência de maior susceptibilidade à corrosão por pites para o aço PIM foi a maior densidade destes em comparação ao aço convencional após o ensaio de polarização conforme observado por MEV e indicado na Figura 5. Estes pites foram aparentemente relacionados com as porosidades e partículas internas a esta, apoiando resultados da literatura (Sobral et al., 2001a).

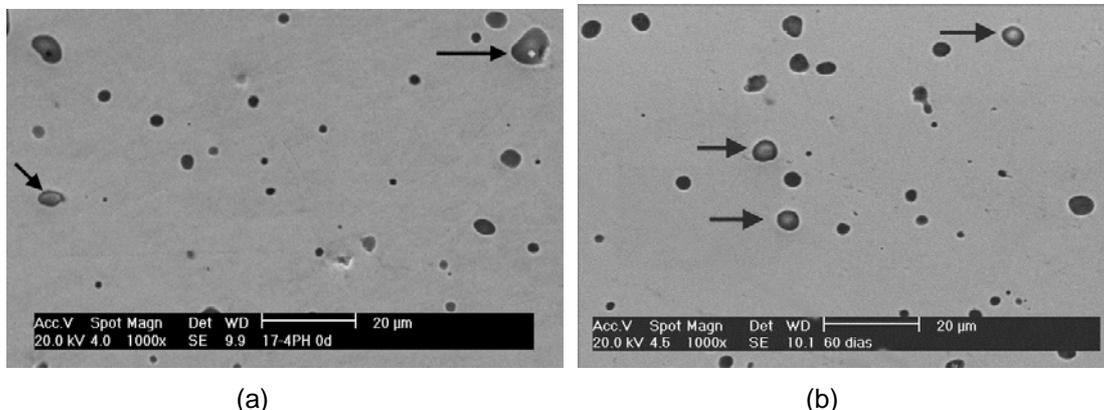


(a)

(b)

Figura 5. Micrografias obtidas por MEV dos aços 17-4PH após polarização cíclica mostrando pites. Aço 17-4PH fabricado por (a) metalurgia convencional e (b) por moldagem de pós por injeção.

Sob condições de estado estacionário, não se observou a formação de pites no aço 17-4PH PIM, mesmo após períodos mais longos de imersão na solução de cloreto de sódio (60 dias) conforme indicado na Figura 6. Estes resultados apóiam os de variação de  $E_{ca}$  com o tempo, que indicaram o crescimento do filme passivo nesta solução. Após 60 dias de imersão não foram observados sinais de corrosão na superfície das amostras do aço 17-4PH PIM, e esta apresentava-se ainda com brilho metálico. As porosidades e as partículas de óxido associadas são as prováveis responsáveis pelas oscilações no  $E_{ca}$  com o tempo devido à nucleação de pites, mas estes foram instáveis e aparentemente ocorreu a repassivação dos mesmos em condições de estado estacionário.



(a)

(b)

Figura 6. Micrografias por MEV do aço 17-4PH PIM (a) antes do ensaio e (b) após 60 dias de imersão em solução de cloreto de sódio 3%. Setas apontam para partículas de sílica dentro de porosidades.

Os resultados do ensaio de citotoxicidade por ambas as metodologias adotadas mostraram que os dois tipos de aço apresentaram comportamentos semelhantes ao do controle negativo, demonstrando não toxicidade no ensaio. No método de difusão em agar somente o controle positivo apresentou um halo de 21mm de diâmetro ao redor da amostra e os metais em teste, assim como o controle negativo, apresentaram halo de 0mm. No método de incorporação do vermelho neutro pode-se verificar que o controle positivo apresentou um índice de citotoxicidade  $IC_{50\%}$  de 24, conforme indica a Figura 7. Os controles negativo e positivo são utilizados para testar a eficácia do método utilizado.

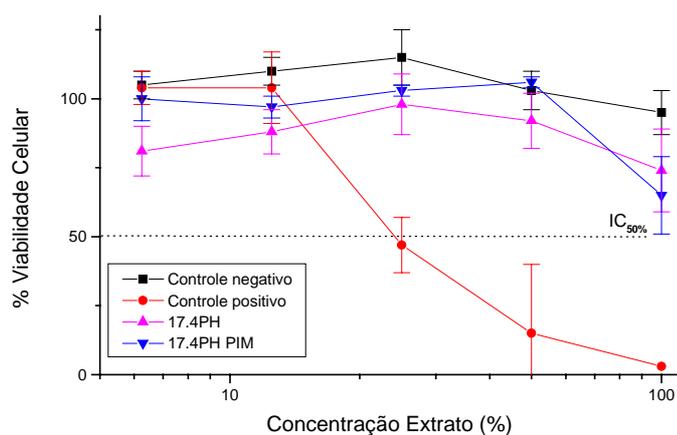


Figura 7. Curvas de viabilidade celular no ensaio de citotoxicidade pelo método de incorporação do vermelho neutro dos aços 17.4PH convencional e obtido por moldagem de pós por injeção.

Os produtos de corrosão após imersão de amostras do aço 17-4PH PIM em meio de cultura por 10 dias foram analisados pelo método de ativação com nêutrons, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Concentrações de elementos nos meios de cultura após o teste de corrosão e no branco.

Elementos	Aço 17.4 PH PIM	Branco
Ca, ng mL <sup>-1</sup>	91 ± 7	81 ± 8
Co, ng mL <sup>-1</sup>	<b>6,3 ± 0,2</b>	0.0014 ± 0.0001
Cr, ng mL <sup>-1</sup>	761 ± 4	618 ± 3
Ni, ng mL <sup>-1</sup>	≤ 0,61	≤ 0,61
Zn ng mL <sup>-1</sup>	0,36 ± 0,01	0,45 ± 0,02

As análises dos produtos de corrosão indicaram a liberação do Co destes materiais. Os elementos Ca, Cr e Zn foram detectados nos extratos, porém na mesma ordem de grandeza do branco.

## CONCLUSÕES

O aço 17-4PH produzido por moldagem de pós por injeção (PIM) mostra comportamento passivo sob condições de estado estacionário e os pites que podem eventualmente nuclear nestas condições aparentemente repassivam em meio de cloreto de sódio naturalmente aerado. Os resultados indicaram que a película passiva formada na superfície do aço PIM é menos protetora que a formada sobre aço de composição química similar, mas produzido por metalurgia convencional. O aço PIM apresenta maior tendência à corrosão por pites que o convencional mas nenhum dos dois tipos de aço apresentou susceptibilidade à corrosão intergranular. Nenhum dos aços estudados

apresentou citotoxicidade embora a análise dos produtos de corrosão em meio de cultura tenha mostrado a presença de cobalto em baixas quantidades.

## AGRADECIMENTOS

À LUPATECH pelo aço 17-4 PH PIM usado neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM A262-81, Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels.
2. Borges, P.C.; Pereira, N.C.; Franco, C.V.; Klein, A. N. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater**, v. 2, p. 2, 1994.
3. Chuang, H.J.; Chen, S.Y.; Chan, S.L.I. **Corros. Sci.**, v.41, p.1347, 1999.
4. El Hilali, F.; Habashi, M.; Mohsine, A. **Ann. Chem. Sci. Mat.**, v. 24, p. 169, 1999.
5. Fedrizzi, L.; DeFlorian, F.; Tiziani, A. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v. 7, p. 273, 1994.
6. Klar, E.; Samal, F.K. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v. 11, p. 11, 1995.
7. Maahn, E.; Jensen, S.K.; Larsen, R.M.; Mathiesen, T. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v. 7, p. 253, 1994.
8. Macdonald, D. D.; Song, H.; Makela, K.; Yoshida, K., **Corrosion**, v.49, p. 8, 1993.
9. Malik, A.U.; Siddiqi, N.A.; Ahmad, S.; Andijani, I.N. **Corros. Sci.**, v. 37(10), p. 1521, 1995.
10. Mathiesen, T.; Maahn, E. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v. 3, p. 45, 1995.
11. Otero, E.; Pardo, A.; Utrilla, M.V.; Pérez, F.J.; Merino, C. **Corros. Sci.**, v. 39, p. 453, 1997.
12. Pereira, N.C.; Mittelstadt, F.G.; Spinelli, A.; Franco, C.V.; Maliska, A.M.; Klein, A.N.; Muzart, J.L.R. **J. Mater. Sci.**, v. 30, p. 4817, 1995.
13. Raghu, T.; Malhotra, S.N.; Ramakrishnan, P. **Brit. Corros. J.**, v. 2, p. 109, 1988.
14. Rogero, S.O.; Lugão, A. B.; Ikeda, T.I.; Cruz, A.S., **Mater. Res.**, v. 6, p. 317, 2003.
15. Rogero, S.O.; Higa, O.Z.; Saiki, M.; Correa, O.V.; Costa, I., **Toxicology in Vitro**, v. 14, p. 497, 2000.
16. Sands, R.L.; Bidsmesd, G.F.; Oliver, D.A. **Mod. Dev. Powder Metall.**, v. 2, p. 73, 1966.
17. Sekine, I., **Corros. Sci.**, v. 32, p. 815, 1991.
18. Sobral, A.V.C; Maliska, A.M.; Tosi, G.; Muzart, J.L.R.; Klein, A.N.; Franco, C.V. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v. 3 (11), p. 57, 1995.
19. Sobral, A.V.C.; Boblitz Parent, A.C.; Muzart, J.L.R.; Franco, C.V. **Surf. Coat. Technol.** v. 92, p.10, 1997.

20. Sobral, A.V.C.; Ristow Jr, W.; Azambuja, D.S.; Costa, I.; Franco, C.V. **Corros. Sci.**, v. 43(6), p. 1019, 2001a.
21. Sobral, A.V.C.; Ristow Jr, W.; Correa, O.V.; Franco, C.V.; Costa, I. **Key Eng. Mater.**, v. 189-191, p. 667, 2001b.
22. Tremblay, A.; Angers, R. **Adv. Powder Metall. Particul. Mater.**, v.7, p. 225, 1995.

## **A COMPARATIVE STUDY OF THE CORROSION RESISTANCE AND CYTOTOXICITY OF 17-4PH STEEL OBTAINED BY CONVENTIONAL METALLURGY AND BY POWDER INJECTION MOLDING.**

### **ABSTRACT**

In this study the corrosion resistance of the precipitation hardening stainless steel 17-4PH obtained by powder injection molding (PIM) or by conventional metallurgy has been investigated in sodium chloride solution 3% at 25°C. The results of the two types of stainless steels were compared. The corrosion resistance was evaluated by electrochemical techniques at increasing immersion time. The pitting corrosion resistance was investigated by cyclic potentiodynamic polarization curves. The susceptibility to intergranular corrosion was evaluated using the ASTM A262, Practice A modified. Additionally, the cytotoxicity of the two types of steels was investigated by two procedures, neutral red uptake and overlay method. The results showed that both steels were passive in the test solution under steady state conditions, but both presented susceptibility to pitting. The PIM steel, however, was more susceptible to pitting than the conventional one. This was supported by surface observation by SEM after polarization test. Pits were associated to porosities and to the presence of oxide inclusions trapped inside the porosities. None of the steels showed susceptibility to intergranular corrosion or cytotoxicity by both types of methods used.

Key-words: corrosion, cytotoxicity, precipitation hardening steels, powder metallurgy, powder injection molding.