

ÍMÃS DE TERRAS RARAS – A NECESSIDADE DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO*

Célia Aparecida Lino dos Santos¹
Zehbour Panossian²

Resumo

Os métodos convencionais e os mais recentes de proteção contra a corrosão (revestimentos metálicos aplicados por eletrodeposição, deposição química (electroless), deposição química em fase vapor, deposição física de vapor e aplicação de tintas) empregados para as ligas de aço-carbono também são empregados para as ligas à base de TR-Fe-B. Essa proteção torna-se necessária, uma vez que essas ligas possuem microestrutura muito mais complexa que as dos aços-carbono e apresentam em sua composição metais de terras raras os quais são intrinsicamente susceptíveis à corrosão. Os revestimentos utilizados são, no geral, constituídos de metais mais nobres do que as ligas, sendo por isso de extrema importância que sejam mantidos íntegros durante o manuseio individual dos ímãs e durante a sua montagem, ou, o posicionamento nos diversos dispositivos em que eles são empregados atualmente. O rompimento do revestimento implicará a diminuição da vida útil dos dispositivos.

Palavras-chave: Ímãs permanentes; Terras raras; Corrosão, Proteção contra corrosão.

RARE EARTH MAGNETS – THE NEED FOR PROTECTION AGAINST CORROSION

Abstract

Conventional and the latest corrosion protection methods (electroless plating, electroless deposition, chemical vapor deposition, physical vapor deposition and paint application) are also used for carbon steel alloys and for TR-Fe-B based alloys. This protection is necessary since these alloys have a much more complex microstructure than those of carbon steels and have in their composition rare earth metals which are intrinsically susceptible to corrosion. The coatings used are generally made of nobler metals than the alloys and it is a very important characteristic because they must be kept intact during the individual handling of the magnets and during their assembly or positioning on the various devices in which they are currently employed. The rupture of the coating will reduce the life of the devices.

Keywords: Permanent magnets; Rare earths; Corrosion; Protection against corrosion.

¹ Química, Doutora em Química (Físico-Química), Pesquisadora, LCP/CTMM, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.-IPT – Brasil (e-mail: clsantos@ipt.br).

² Física, Doutora em Ciências, Diretora de Inovação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.-IPT e Professora convidada do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da USP – Brasil (e-mail: zep@ipt.br).

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais aplicações industriais dos metais de terras raras (TR) é a fabricação de ímãs permanentes. A China é o maior fornecedor mundial de produtos de TR e, conseqüentemente, líder do mercado internacional.

A China sempre controlou rigidamente suas exportações de TR e, em 2012, impôs uma restrição de cotas de fornecimento de TR, fato que assustou o mercado internacional e trouxe insegurança quanto ao fornecimento desses metais (1). Algumas iniciativas ao redor do mundo estão sendo conduzidas para a produção de TR de modo a diminuir a dependência da China (2).

No Brasil, estudos estão em andamento para a produção dos óxidos e metais de TR, além da proposição de projetos para o estabelecimento de uma cadeia produtiva no país, ou seja, o desenvolvimento de empresas que façam a extração mineral, obtenção e separação dos óxidos, redução dos metais, produção de ligas, produção dos ímãs permanentes e finalmente, empresas consumidoras desses ímãs (3).

As ligas magnéticas à base de TR são susceptíveis à corrosão e, esta característica, torna-se muito relevante quando se deseja estabelecer uma cadeia produtiva neste setor visto que o produto final deve resistir às ações do meio externo.

No presente trabalho, são apresentadas a definição de metais de TR, o processo de obtenção da liga magnética e as principais formas de proteção da liga (Nd-Pr)-Fe-B, além dos resultados de caracterização dos revestimentos, dos ensaios de exposição à câmara de névoa salina e dos ensaios eletroquímicos.

1.1 Revisão bibliográfica

Os ímãs de terras raras são considerados como ímãs permanentes e podem ser classificados mediante a sua composição química ou com base na sua geração de desenvolvimento. Considerando-se a composição química, os ímãs são classificados como: ligas à base de TR e cobalto; ligas à base de TR e ferro; ligas à base de TR, ferro e nitreto e, ligas a base de TR, ferro e carbetos. As ligas contendo nitreto e carbetos constituem os desenvolvimentos mais recentes (4).

Considerando-se a geração de desenvolvimento, tem-se a classificação (4):

- primeira geração (1:5): SmCo_5 , PrCo_5 , $(\text{Sm,Pr})\text{Co}_5$, MMCo_5 (MM representa mistura de metais de terras raras);
- segunda geração (2:17): $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ e, ainda, $\text{Sm}_2(\text{Co, Cu, Fe, M})_{17}$ (M representa metal de transição);
- terceira geração: a base de terra rara e ferro, ligas ternárias de TR-Fe-B como Nd-Fe-B; Pr-Fe-B; TR-Fe-B (TR= La, Ce, MM); Nd-Fe(M)-B e NdFe(M1)(M2)-B.

A descoberta do ímã a base de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ foi anunciada pela Sumitomo Metais Especiais no Japão, em 1984. A empresa utilizou um processo de fabricação similar ao empregado na fabricação do ímã SmCo_5 . Praticamente ao mesmo tempo, uma composição equivalente foi anunciada por outra empresa, a General Motors, que empregou um processo diferente baseado na técnica de solidificação rápida (5).

A Comissão de Nomenclatura em Química Inorgânica da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) recomenda o uso das seguintes expressões (6):

- “metais de terras-raras”, cujo símbolo geral é “TR” (*RE – rare earth*), para os elementos escândio (Sc), ítrio (Y) e do lantânio (La) ao lutécio (Lu), pertencentes

ao Grupo 3 da tabela periódica e que possuem, respectivamente, os seguintes números atômicos (Z), 21, 39, 57 a 71;

- “lantanóides”, símbolo “Ln”, para os elementos com números atômicos entre 57 a 71 (do La ao Lu).

Destaca-se que o elemento Pm (Z= 61) é um produto da fissão nuclear do urânio. Além do Pm, outro elemento que apresenta radioatividade é o Lu. Esse apresenta radioatividade natural para o isótopo $^{176}_{71}\text{Lu}$, um beta emissor de meia vida de $7,3 \cdot 10^{10}$ anos. Esses elementos caracterizam-se pelo preenchimento sucessivo dos elétrons 4f adicionados à configuração do La, que é considerado como um elemento protótipo (7).

As TR podem ser classificadas como leves (do La ao Gd) e pesadas (do Tb ao Lu, incluindo o Y). Aceita-se, também, a classificação em três grupos: leves (do La ao Nd); médias (do Sm ao Gd) e pesadas (do Tb ao Lu, incluindo o Y) (8).

O termo “terra rara” remonta à época do descobrimento desses elementos entre 1750 e 1800. O emprego do adjetivo “raro” não é claro na literatura, mas há quem considere que raro se referia, em épocas passadas, a objetos estranhos ou surpreendentes e, não necessariamente, escassos ou singulares. Assim, o adjetivo raro refere-se ao comportamento dos compostos desses metais e não a sua ocorrência natural. O termo “terra”, por sua vez, foi amplamente empregado para designar óxidos no século 19 (3).

Os metais de TR são utilizados na forma combinada com outros elementos, por serem extremamente eletropositivos e se oxidarem rapidamente quando expostos ao ar (9,10).

O neodímio é o elemento de TR predominante na liga Nd-Fe-B enquanto que o ferro é o metal de transição principal. O cobalto pode ser adicionado em pequenas quantidades. A porcentagem em massa de terras raras totais é de aproximadamente 31 %. O praseodímio é um elemento de TR que pode ser utilizado parcialmente em substituição ao neodímio, geralmente para reduzir custos, seja na sua forma pura ou em mistura com neodímio (5).

Para aplicações a temperaturas acima de 150 °C, o neodímio é parcialmente substituído por disprósio, cerca de 5 % em massa, e para alguns graus adiciona-se o térbio para aumentar a coercividade (iHc) ou resistência à desmagnetização. O uso do disprósio é de particular importância para a fabricação de motores de veículos elétricos híbridos. Contudo, há um inconveniente, o disprósio é escasso e muito mais caro do que o neodímio (5,11).

Um ímã permanente ideal a base de TR-Fe-B é constituído por duas fases: a fase ferromagnética (ϕ), que quando magnetizada produz o campo magnético externo e a fase não magnética (rica em elementos de TR) que promove o isolamento dos grãos da fase ϕ pela formação de uma fina camada. A quantidade da fase não ferromagnética deve ser suficiente somente para isolar os grãos da fase ϕ e evitar impactos negativos na remanência do ímã devido à diluição da fase ferromagnética (fase ϕ) (12).

A fabricação dos ímãs de TR é um processo complexo que envolve várias etapas. De um modo geral, a produção começa pelo estabelecimento da composição química da liga, seguida da sua fusão. Na sequência, há uma etapa de moagem e consolidação do pó obtido, uma etapa de acabamento (tratamento de superfície para proteção contra oxidação) e, a etapa final, que é a magnetização. Essas etapas podem ser executadas por dois processos: por metalurgia do pó (sinterização – ímãs sinterizados) ou por solidificação rápida (ímãs ligados). Os ímãs permanentes de TR

utilizados nos produtos de alta tecnologia e de maior valor agregado, tais como turbinas eólicas e motores para carros elétricos, são produzidos por metalurgia do pó (ímãs sinterizados) (13).

A etapa de proteção contra a corrosão é de fundamental importância para a produção dos ímãs permanentes. Os revestimentos protetivos (*coatings*) podem ser classificados genericamente como metálicos, de conversão e orgânicos.

Os revestimentos metálicos podem ser produzidos por eletrodeposição (*electroplating, electrodeposition*), imersão (*immersion*), deposição química (*electroless plating*), galvanização (*galvanization, galvanizing*), imersão a quente (*hot dipping*), aspersão térmica (*spray coating, metalizing*) e deposição em fase de vapor (*ion vapor deposition-IVD* ou *chemical vapor deposition-CVD*), ou, deposição física de vapor (*physical vapor deposition-PVD*) (14).

As camadas fosfatizadas são denominadas de camadas de conversão e são comumente empregadas como base de protetivos temporários (óleos ou graxas), ou, como pré-tratamento para pintura. Como proteção temporária, a camada fosfatizada atua somente pelo período de transporte/armazenamento das peças metálicas. Como pré-tratamento para pintura, ela favorece a ancoragem e a aderência das películas de tinta (15).

Os revestimentos orgânicos (*organic coatings*) são definidos, classicamente, como tintas compostas por resina, pigmento, carga, solvente e aditivos. Elas podem ser aplicadas por trinchas, pincéis, rolos ou por aspersão (pistola). A película de tinta, após a aplicação, pode ser curada a temperatura ambiente ou sob aquecimento em estufas (14).

A empresa Vacuumschmelze GMBH & Co. produz ímãs permanentes e utiliza os seguintes métodos de proteção (15):

- protetivos metálicos: revestimentos de níquel, de estanho e o duplo de níquel+estanho produzidos por eletrodeposição, revestimentos de nitreto de titânio¹ e alumínio produzidos por deposição em fase vapor;
- proteção temporária: camadas finas de fosfato de Nd/Fe (<0,5 µm) sobre a superfície dos ímãs;
- protetivos orgânicos: tintas à base de resina epóxi (do tipo *baked coating*) sem e com partículas de alumínio metálico (*aluminum flakes*).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram ensaiados ímãs comerciais de Nd-Fe-B na forma de anéis (19 mm x 10 mm x 5 mm) e de blocos retangulares (40 mm x 20 mm x 5 mm), todos com revestimento de níquel eletrodepositado, conforme a **Figura 1**.



(a)



¹ O nitreto de titânio é, na verdade, um revestimento cerâmico.

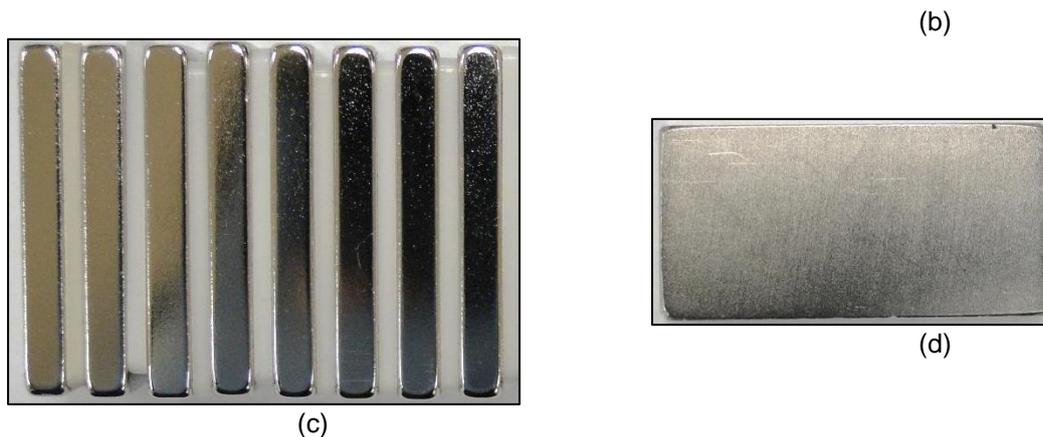


Figura 1. Imagens dos ímãs comerciais de Nd-Fe-B com revestimento de níquel eletrodepositado. (a) e (b) anéis. (c) e (d) blocos. Fonte: Elaborado pelos autores.

Os ímãs foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura-MEV (microscópio do tipo FEG-*Field Emission Gun*, fabricante FEI, modelo Quanta 400F e por espectroscopia por dispersão de energia de raios X-EDS) e por ensaios de corrosão, como: exposição à câmara de névoa salina; exposição à câmara úmida; ensaio de imersão; ensaio em autoclave; ensaios eletroquímicos (monitoramento do potencial e polarização potenciodinâmica).

Os ensaios de exposição à névoa salina consistiram em posicionar os ímãs magnetizados e desmagnetizados em uma câmara fechada em que uma névoa da solução de NaCl a 5 % (porcentagem em massa) foi aspergida continuamente a temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. O pH da solução ficou entre 6,5 e 7,2 e a umidade relativa foi de 100 %.

Para os ensaios eletroquímicos, corpos de prova na forma de blocos foram cortados para se obter um cubo com 1,0 cm de lado sem revestimento. Esse cubo foi embutido de maneira a expor uma única face com $1,0\text{ cm}^2$ de área, essa face foi lixada e polida previamente aos ensaios eletroquímicos. Um sistema eletroquímico convencional com três eletrodos foi utilizado: a liga magnética foi o eletrodo de trabalho, um eletrodo de calomelano saturado como eletrodo de referência e uma tela retangular de platina com lado de 2,0 cm foi utilizada como eletrodo auxiliar.

Os ensaios utilizaram como eletrólito a solução de NaCl 0,05 mol/L e pH=6,7. As medidas de monitoramento de potencial em função do tempo (10600 s – 3 h) e as curvas de polarização potenciodinâmicas, com velocidade de varredura (vv) de 0,166 mV/s, foram obtidas por meio do potenciostato/galvanostato PAR modelo 2273. A polarização linear anódica (PLA) varreu do potencial de circuito aberto (PCA) até -0,300 V/ECS e a polarização linear catódica (PLC) varreu do PCA até -1,300 V/ECS. Os ensaios foram conduzidos a temperatura ambiente (23 ± 2) °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O magnetismo dos ímãs impede que eles sejam analisados em microscópios eletrônicos. Tornou-se necessário desmagnetizá-los para proceder às análises. A título de comparação, foram testados dois modos de desmagnetização dos ímãs: tratamento térmico (TT) a $335\text{ }^{\circ}\text{C}$ em atmosfera natural (amostra identificada como Desmagnetizada por TT) e submissão do ímã a um campo magnético oposto (amostra identificada como Desmagnetizada).

Apresentam-se, na **Figura 2**, as imagens de MEV-FEG dos ímãs desmagnetizados por TT e por submissão a um campo magnético. Na **Tabela 1**, apresentam-se as quantificações realizadas por EDS nas áreas destacadas em vermelho na **Figura 2 (a) e (b)**.

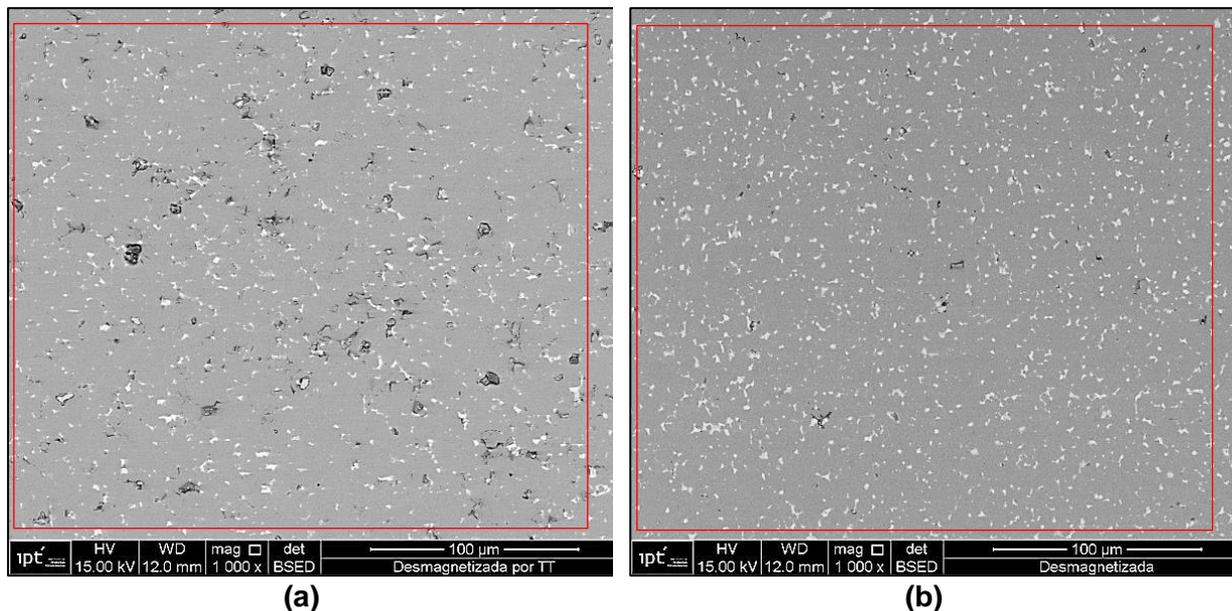


Figura 2. Imagens de MEV-FEG das amostras de ímãs de Nd-Fe-B. (a) Desmagnetizada por TT (b). Desmagnetizada por submissão a um campo magnético oposto. Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1. Quantificações semiquantitativas das áreas analisadas da Figura 2.

Elementos	Desmagnetizada por TT		Desmagnetizada	
	% massa	% atômica	% massa	% atômica
B	2,37	12,52	2,27	12,21
O	2,18	7,80	1,88	6,82
Fe	66,61	68,18	66,27	68,98
Pr	6,52	2,64	6,69	2,76
Nd	22,32	8,85	22,88	9,22
Total	100,00	99,99	99,99	99,99

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para ambas as amostras caracterizadas, o teor de TR (Nd+Pr) foi de 29 % e o teor de ferro de 66 %. Esses valores aproximam-se dos valores das ligas (Nd-Pr)-Fe-B observados na literatura.

O tratamento térmico desmagnetizou a liga, mas gerou trincas e buracos em sua estrutura, **Figura 2 (a)**. Diante disto, a desmagnetização por TT foi abandonada.

Os revestimentos de níquel foram analisados por MEV-FEG e dois tipos de revestimentos foram observados: única camada (corpo de prova desmagnetizado por TT) e tripla camada (corpo de prova desmagnetizado por submissão a um campo magnético oposto).

As imagens de MEV-FEG estão apresentadas na **Figura 3** em que se destacam as espessuras das camadas.

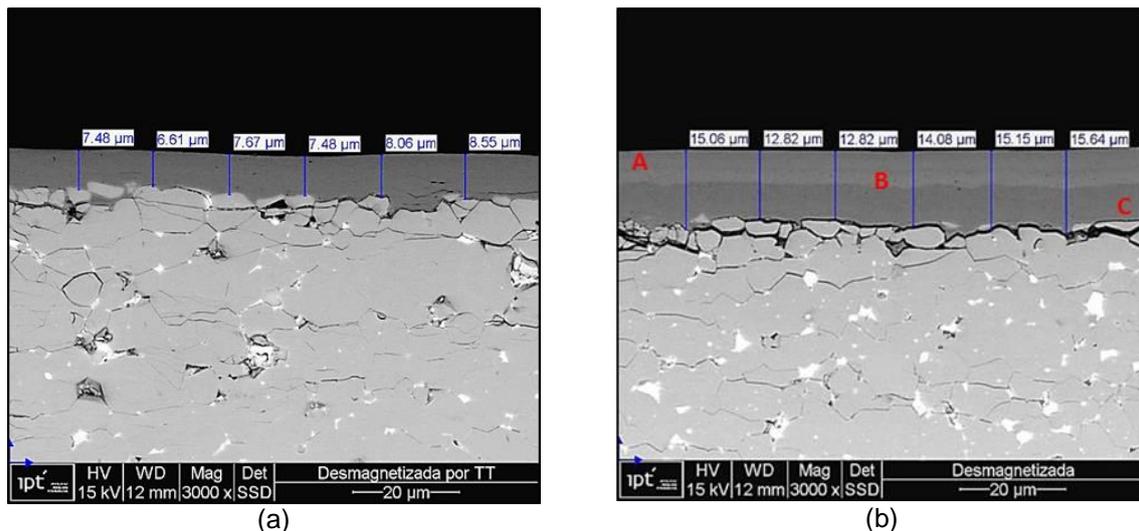


Figura 3. Imagens de MEV-FEG das amostras de ímãs de Nd-Fe-B. (a) Única camada - Desmagnetizada por TT (b). Tripla camada - Desmagnetizada por submissão a um campo magnético oposto. Fonte: Elaborado pelos autores.

Os banhos de eletrodeposição devem ser selecionados de modo a usar formulações que não agredam demasiadamente a superfície dos ímãs, visto que pode ocorrer um ataque da fase rica em Nd, levando à ocorrência de corrosão intergranular da liga magnética. As imagens da **Figura 3 (a)** e **(b)** apresentaram corrosão intergranular na interface substrato/revestimento.

Os revestimentos da **Figura 3** foram analisados por EDS e, o revestimento de única camada era composto por níquel e o de tripla camada era composto por níquel, cobre e níquel. Na **Tabela 2**, apresentam-se os valores das espessuras dos revestimentos de níquel.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão das medidas de espessuras dos revestimentos.

Amostra/Revestimento	Espessura média (μm)	Desvio padrão (μm)
Desmagnetizada por TT/Camada única (Ni)	7,64	0,65
Desmagnetizada/3 Camadas (Ni-Cu-Ni)	14,26	1,23
Desmagnetizada/Camada A (Ni)	3,82	0,26
Desmagnetizada/Camada B (Cu)	2,64	0,27
Desmagnetizada/Camada C (Ni)	7,82	0,82

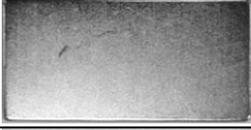
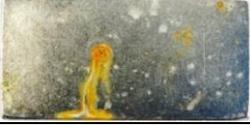
Fonte: Elaborado pelos autores.

O revestimento de tripla camada apresentou o dobro da espessura do revestimento de única camada de níquel, **Tabela 2**.

As imagens dos corpos de prova antes e após os ensaios de exposição à câmara de névoa salina estão apresentadas na **Tabela 3** (corpos de prova magnetizados) e na **Tabela 4** (corpos de prova desmagnetizados).

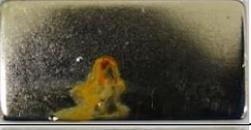
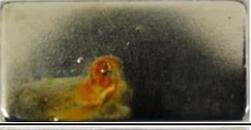
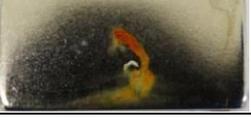
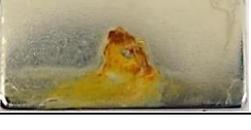
Os corpos de prova das amostras magnetizadas sofreram leve ataque superficial nas primeiras 24 h de ensaio. No segundo dia de exposição, houve o aparecimento de um ponto de corrosão localizada do revestimento em um dos corpos de prova e, no terceiro dia, outro corpo de prova apresentou ataque localizado. Assim, dos três corpos de prova magnetizados expostos à névoa salina, dois apresentaram corrosão localizada e o terceiro apresentou somente manchamentos em sua superfície, **Tabela 3**.

Tabela 3 – Ensaio de exposição em câmara de névoa salina. Corpos de prova magnetizados.

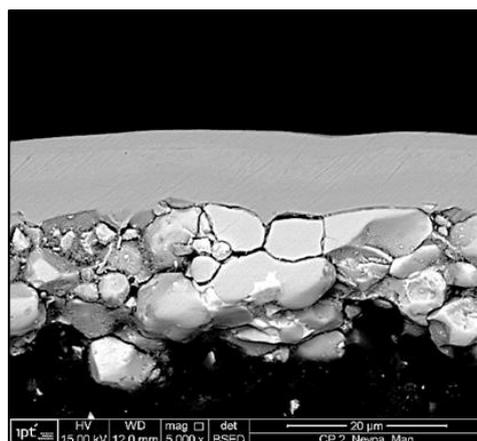
Identifi- cação	Tempo de ensaio			
	Inicial	24 h	48 h	72 h
CP 01				
CP 02				
CP 03				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Ensaio de exposição em câmara de névoa salina. Corpos de prova desmagnetizados.

Identifi- cação	Tempo de ensaio			
	Inicial	24 h	48 h	72 h
CP 01				
CP 02				
CP 03				

Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 4.** Imagem de MEV-FEG do corte transversal da amostra magnetizada após o ensaio de exposição em câmara de névoa salina.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os três corpos de prova das amostras desmagnetizadas, **Tabela 4**, apresentaram corrosão localizada nas primeiras 24 h de ensaio. Os corpos de prova foram mantidos na câmara, apesar de já terem sofrido corrosão, com o objetivo de verificar o surgimento de outros pontos de corrosão os quais não aconteceram.

Um dos corpos de prova magnetizados, após a exposição à névoa salina, foi desmagnetizado e cortado transversalmente para o registro no MEV-FEG, **Figura 4**.

A exposição à câmara de névoa salina promoveu o ataque ao substrato nas descontinuidades do revestimento de níquel tripla camada. Essa corrosão ocorreu entre os grãos da liga magnética, **Figura 4**.

Os revestimentos múltiplos, por apresentarem mais de uma camada, visam proteger melhor o substrato, uma vez que as porosidades de cada camada precisam estar alinhadas para que o substrato seja atingido (16).

Nos ensaios de névoa salina, nem todos os corpos de prova sofreram corrosão localizada, alguns ficaram manchados superficialmente. Esse fato justifica-se pela própria característica do revestimento de níquel com múltiplas camadas.

Os resultados dos ensaios eletroquímicos estão apresentados na **Figura 5** e na **Figura 6**. Na **Figura 5**, observa-se que a liga magnética apresentou comportamento típico de estado ativo, com os valores de PCA (potencial de circuito aberto) caindo durante os primeiros 1000 s de exposição ao meio. Após esse período, a superfície da liga se estabilizou e atingiu o potencial estável de -0,78 V/ECS ao final dos 10600 s de ensaio.

Na **Figura 6**, a curva de polarização linear anódica (PLA) apresentou um crescimento da densidade de corrente característica de estado ativo indicando que a liga magnética sofreu oxidação no intervalo de potencial ensaiado.

Na **Figura 6**, a curva de polarização linear catódica (PLC) apresentou valores de corrente constante entre -0,85 V/ECS e -1,10 V/ECS, entre 10-5 A/cm² e 10-4,5 A/cm² devido à redução do oxigênio dissolvido no eletrólito. A partir de -1,10 V/ECS até -1,30 V/ECS, a densidade de corrente cresceu devido à redução dos íons H₃O⁺ (H⁺) que geraram o gás H₂.

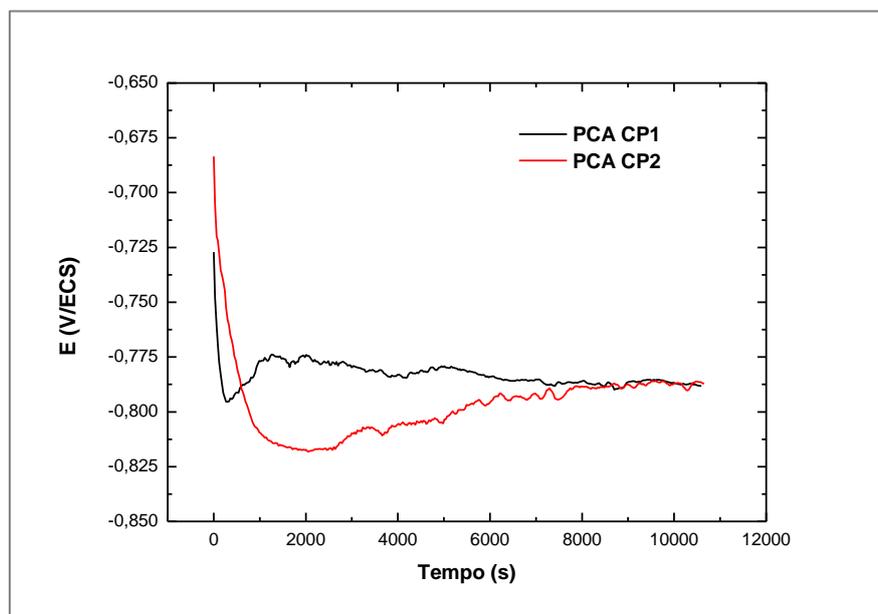


Figura 5. Ensaio de monitoramento do PCA em função do tempo. Corpos de prova CP1 e CP2 desmagnetizados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

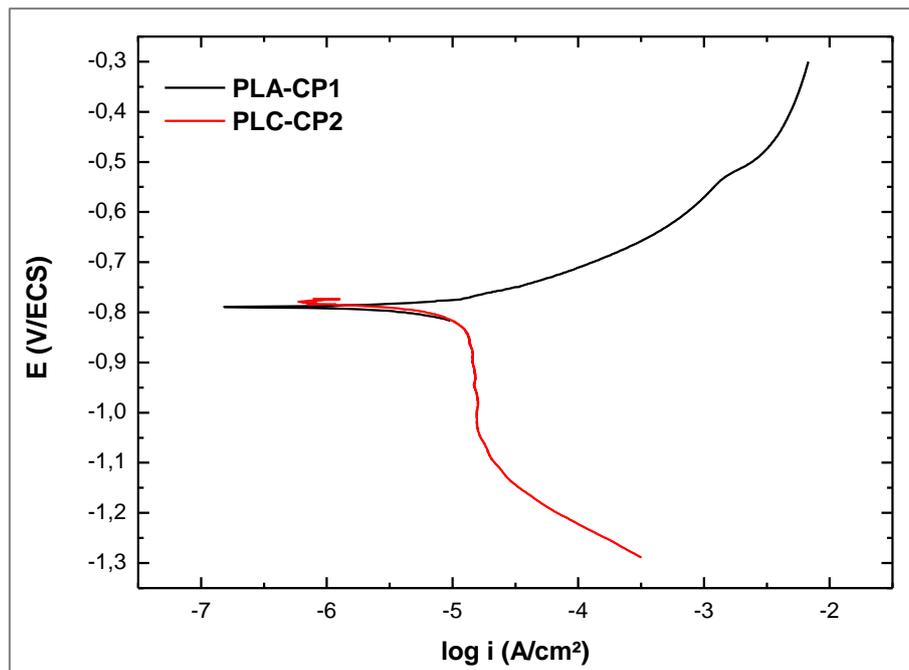


Figura 6. Curvas de polarização potenciodinâmicas. Curva preta: polarização linear anódica, $v_v = 0,166$ mV/s. Curva vermelha: polarização linear catódica, $v_v = 0,166$ mV/s. Corpos de prova CP1 e CP2 desmagnetizados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os corpos de prova foram examinados no MEV-FEG após os ensaios de polarização e as imagens estão apresentadas na **Figura 7**.

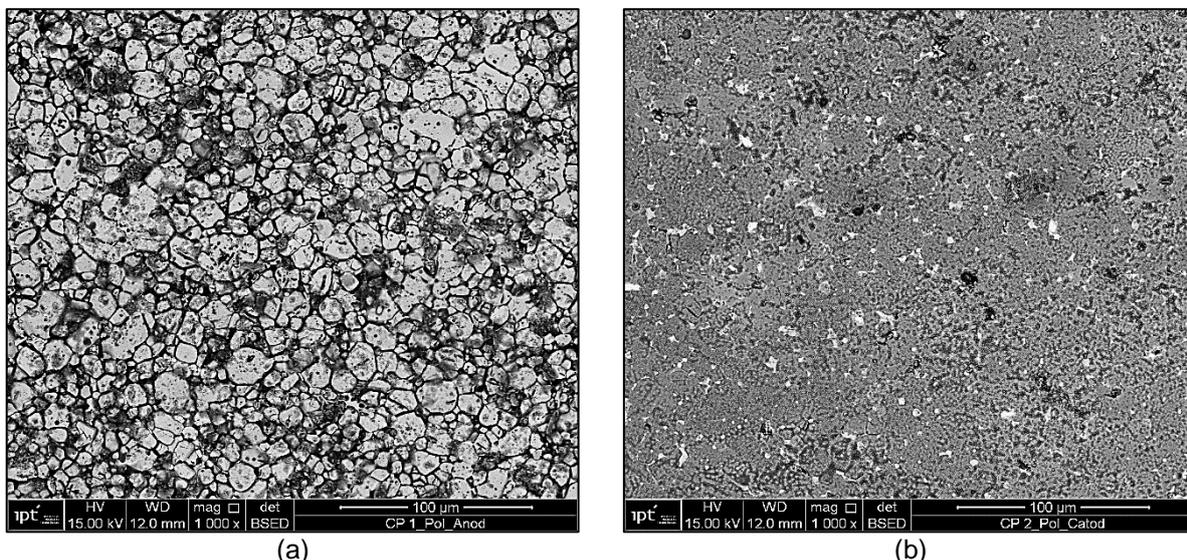


Figura 7. Imagens de MEV-FEG das superfícies dos corpos de prova após os ensaios de polarização potenciodinâmica. (a) Após PLA (b) Após PLC.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na **Figura 7 (a)**, observa-se que a superfície da liga magnética sofreu forte corrosão intergranular após a PLA. Após a PLC, a superfície mostrou-se rugosa devido ao período de exposição ao meio durante o monitoramento do PCA, que precedeu a polarização catódica.

4 CONCLUSÃO

Os métodos convencionais de proteção contra a corrosão e os mais recentes (revestimentos metálicos aplicados por eletrodeposição, deposição química (*electroless*), deposição química em fase vapor, deposição física de vapor; aplicação de tintas) empregados para as ligas de aço-carbono também são empregados para as ligas à base de TR-Fe-B. Essas, porém, possuem microestrutura muito mais complexa que as dos aços-carbono e apresentam em sua composição metais de terras raras os quais são intrinsecamente susceptíveis à corrosão.

Os ímãs precisam ser protegidos com revestimentos adequados a cada ambiente nos quais eles ficarão expostos. É de extrema importância que o revestimento seja mantido íntegro durante o manuseio individual das peças e durante a montagem ou o posicionamento desses ímãs nos diversos dispositivos em que eles são empregados atualmente. O rompimento do revestimento implicará a diminuição da vida útil dos dispositivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio ao IPT – **Fipt** pelo apoio financeiro a esse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Rocio MAR, da Silva MM, de Carvalho PSL, Cardoso JG da R. Terras-raras: situação atual e perspectivas [Internet]. BNDES Setorial; 2012. Acesso em: 10 mar. 2016. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1527?mode=full&submit_simple=Mostrar+registro+em+formato+completo.
- 2 UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries Rare Earths. Reston: USGS; 2016. Acesso em: 10 mar. 2016. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/mcs-2016-raree.pdf.
- 3 Lima IB, Leal Filho W. (Ed.). Rare earths industry technological, economic, and environmental implications. Amsterdam: Elsevier; 2016. 437 p.
- 4 Pan S. Rare earth permanent-magnet alloys' high temperature phase transformation: in situ and dynamic observation and its application in material design. Berlin: Heidelberg Springer; 2013. 290 p.
- 5 Dent PC. Rare earth elements and permanent magnets (invited). Journal of Applied Physics. 2012; 111 (7) :07A721-07A721.
- 6 Connelly NG, Hartshorn RM, Damhus T, Hutton AT. Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations; 2005. Cambridge: IUPAC; 2005. 377 p.
- 7 Abrão A. Química e tecnologia das terras-raras. Brasília: CETEM/CNPq; 1994. (Série Tecnologia Mineral 66).
- 8 Serra OA. Terras raras. São Paulo: CRQ4; 2013. Acesso em: 11 nov. 2016. Disponível em: http://www.crq4.org.br/quimicaviva_terrasraras.
- 9 Lucas J, Lucas P, Le Mercier T, Rollat A, Davenport W. Rare earths science, technology, production and use. Amsterdam: Elsevier; 2015. 369 p.
- 10 Forsyth M, Hinton B. (Ed.). Rare Earth- based corrosion inhibitors. Cambridge: Elsevier; 2014. 347 p.
- 11 Campos MF, Castro JA. Adição de disprósio em ímãs NdFeB por meio de difusão superficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO; 2013. Anais... Rio de Janeiro: ABCM; 2013. p. 1-4.
- 12 Faria RN, Lima LFCP. Introdução ao magnetismo dos materiais. São Paulo: Editora Livraria da Física; 2005. 192 p.

- 13 Brown DN. Fabrication, processing technologies, and new advances for RE-Fe-B Magnets. IEEE Transactions On Magnetics; 2016, 52 (7) :1-9.
- 14 Kanematsu H, Barry DM. (Ed.). Corrosion control and surface finishing: environmentally friendly approaches. Japan: Springer; 2016. 301 p.
- 15 Panossian Z., Santos CAL. Fosfatização de metais ferrosos parte 3: a utilização prática das diferentes camadas fosfatizadas. Corrosão & Proteção, Rio de Janeiro; 2006, 11 :27-29.
- 16 Panossian Z. Revestimentos metálicos. In: Panossian Z. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas; 1993. p. 590-612.