



## RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE AÇO ABNT 316-L: LAMINADO E SINTERIZADO.

### Marcelle Maia

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Av. Sete de Setembro, 3165 – Curitiba/ PR, Brasil – CEP 80230-901, marcellemaia@hotmail.com

### Paulo César Borges

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Av. Sete de Setembro, 3165 – Curitiba/ PR, Brasil – CEP 80230-901, pborges@cefetpr.br

**Resumo.** *Este artigo apresenta o comportamento quanto à corrosão do aço inoxidável ABNT 316-L: laminado e o obtido por Injeção de Pós Metálicos. Os parâmetros eletroquímicos foram obtidos através de ensaios a condições normais de temperatura e pressão, com auxílio de um potenciostato/galvanostato interfaceado a um microcomputador. Como meio eletroquímico utilizou-se uma solução similar à água marinha, NaCl a 3,5% em peso. A tendência de dissolução ativa ou a formação de filme passivante (parâmetros termodinâmicos e cinéticos) foi obtida a partir do ensaio potenciodinâmico utilizando-se o programa Analysis M270 da PARC para aquisição e tratamento dos dados. Nos resultados são apresentadas: as composições químicas obtidas através de espectrômetro de emissão ótica; a análise microestrutural (fases presentes, quantidade, tamanho e distribuição destas) utilizando uma bancada de preparação metalográfica, microscópios ópticos e software de análise de imagens e; os resultados de corrosão (potencial de corrosão, corrente de troca, densidade de corrente, constantes de Tafel, taxa de corrosão). Pode-se concluir que a porosidade residual (tamanho, forma, quantidade e distribuição) decorrente do processo de fabricação influencia acentuadamente no comportamento de corrosão destes aços devido ao aumento de superfície de contato com o agente agressor e de seu acesso ao interior da peça através de poros comunicantes.*

**Palavras-chave:** *corrosão, teste eletroquímico, aço inoxidável.*

### Introdução

A resistência a corrosão de peças sinterizadas tem sido alvo de estudos devido a porosidade residual presente nestes materiais. Nos trabalhos de Borges (1994), Sobral (1997) e Pereira (1995), que estudaram a resistência à corrosão de alguns aços sinterizados com e sem tratamento de superfície, é evidenciado que o tamanho, forma, quantidade e distribuição dos poros decorrentes do processo de fabricação, influenciam acentuadamente o comportamento de corrosão do aço sinterizado; relatam que as taxas de corrosão dos materiais sinterizados são maiores do que as obtidas em materiais convencionais de mesma composição. Isto se deve ao aumento da porosidade residual, que proporciona um aumento da área superficial e, portanto, da superfície de contato com o agente agressor (meio corrosivo) e de seu acesso ao interior da peça através de poros comunicantes.

A metalurgia do pó é um dos processos de maior crescimento nos últimos tempos, que possibilita a obtenção de peças na sua forma final, sem ou quase nenhum acabamento posterior, com alto índice de aproveitamento de material. Economicamente, formas geométricas complexas, precisão dimensional rigorosa, grandes lotes de produção e propriedades químicas e mecânicas tornam este processo mais atrativo e competitivo que as técnicas convencionais. (Chiaverini, 2001)

O processo baseia-se fundamentalmente nas seguintes etapas: obtenção e mistura dos pós, sua moldagem ou compactação em uma matriz na dimensão e forma final do produto e a sinterização, que pode ser definida como um tratamento térmico a uma temperatura abaixo do ponto de fusão da liga metálica, em condições controladas de temperatura, tempo e ambiente. Inúmeras operações adicionais podem ser feitas após a etapa de sinterização, (impregnação com óleo, recompactação, etc) conforme as exigências do produto. (MPIF, 1995)

Como método alternativo, a moldagem por injeção de pós encontrou espaço na indústria, principalmente pela capacidade de produzir grandes volumes e em quase todos os tipos de materiais (metais, cerâmicas, compostos intermetálicos e compósitos). Nesta técnica, o pó metálico é misturado a um ligante plástico, formando uma massa polimérica, a qual é injetada em matrizes, semelhante a injeção de polímero. Da mesma forma, também é conformada. Antes da sinterização, é necessária a remoção deste ligante plástico para evitar a distorção do componente em função da evaporação e expansão do ligante na temperatura de sinterização. Além dos danos causados aos produtos, pode-se ainda contaminar as próprias peças do forno. (EPMA, 1995) Entre as várias aplicações, peças sinterizadas injetadas 316L podem ser especialmente importantes em componentes ortodônticos e instrumentos cirúrgicos.

Como a microestrutura presente no aço sinterizado é decorrente dos parâmetros de processamento (decomposição química durante a retirada do ligante, tempo e temperatura, atmosfera e meio de aquecimento, sinterização no estado sólido ou líquido) e das características dos pós-utilizados (tamanho e distribuição das partículas, compressibilidade e pureza química), qualquer alteração nesses parâmetros interfere na cinética da sinterização, e assim, varia a microestrutura da peça e, conseqüentemente, seu comportamento em relação à corrosão. (Minuth, 1996; Klar, 1995; Mathiesen, 1995)

Este trabalho apresenta um estudo comparativo quanto à corrosão dos aços inoxidáveis ABNT 316-L laminado e injetado sinterizado em forno de baixa pressão. A investigação é feita através de testes eletroquímicos potenciostáticos em solução salina de 3,5%.

## **Materiais e Métodos**

O processo de moldagem por injeção pode ser dividido em quatro etapas: preparação da matéria-prima (obtenção e mistura), moldagem por injeção, retirada do ligante e sinterização.

Os pós são misturados com um composto orgânico constituído usualmente de termoplásticos, ceras, óleos e lubrificantes, formando uma massa polimérica, a fim de garantir características de injetabilidade para as partículas de pó durante a moldagem e manter a forma da peça, até alcançar-se algum grau de resistência. (Bose, 1995) A mistura é normalmente realizada em temperaturas relativamente altas, para garantir que o ligante torne-se liquefeito, e assim, obtém-se uma massa de injeção com boa homogeneidade. O tempo de processamento depende da geometria da cavidade, viscosidade da mistura e pressão de injeção.

Um bom ligante não deve ser agressivo ao pó, e sim, ter uma boa adesão a ele, ser termicamente estável, deve molhar a superfície do pó para propiciar uma boa fluidez e baixar a sua viscosidade, deve ser facilmente removível do componente e os produtos da sua decomposição não devem ser tóxicos. (Neto, 2001)

Um outro importante ponto a ser mencionado é a forma da cavidade do molde, que deve permitir uma distribuição progressiva da mistura de pós para prevenir a separação do pó do ligante, mantendo a densidade do pó e gradientes de sedimentação em níveis aceitáveis.

Após o término da injeção, o material injetado deve ser resfriado para aumentar a resistência e dureza; e assim, iniciar a etapa de remoção do ligante, que torna-se um componente indesejado e

deve ser eliminado. Esta etapa consiste em extrair o material orgânico do componente injetado e é executado em diversos estágios. Existem várias técnicas a serem empregadas na remoção do ligante, porém as que mais têm sido difundidas são a extração química e a degradação térmica. Na extração química, o baixo ponto de fusão e os componentes voláteis do ligante são dissolvidos através de um fluido, reduzindo o conteúdo do ligante na peça injetada, e originando uma estrutura com porosidade aberta, abrindo canais para a etapa de degradação térmica. Durante esta etapa, o ligante residual é removido por mecanismos de evaporação e fluxo capilar. A aplicação destas duas técnicas permite uma eficiente extração do ligante. Finalmente, é realizada a etapa de sinterização em forno a vácuo e atmosfera controlada.

Os materiais utilizados na investigação foram o aço ABNT 316 - L laminado (comercial) e o aço ABNT 316-L sinterizado obtido por injeção, processado pela Lupatech, Steelinject, Caxias do Sul, Brasil, em forno a vácuo com atmosfera controlada de Argônio/ Hidrogênio, em patamar de 980°C na pré-sinterização por um período de 13 horas e 1300°C durante três horas para a sinterização.

A metodologia aplicada para estudo comparativo dos aços inoxidáveis ABNT 316-L laminado e sinterizado dividiu-se em três partes: caracterização química, microestrutural e quanto à resistência a corrosão.

### **Caracterização Química**

A caracterização química foi realizada em espectrômetro de emissão óptica com o objetivo de verificar e analisar a composição química de ambos os materiais. Os resultados são comparados com os valores especificados para o ABNT 316 – L conforme Norma NBR 5106.

### **Caracterização Microestrutural**

A caracterização microestrutural foi feita com o auxílio de um microscópio ótico após a preparação metalográfica das amostras, conforme segue: corte metalográfico: longitudinal e transversal, através da cortadeira Struers/Labotom; embutimento: feito em resina termofixa do tipo Baquelite; lixamento: polimento; ataque químico (água-régia concentrada - ácido clorídrico e nítrico) e medição do tamanho de grão: através do método do intercepto (processo de Heyn), segundo a norma NBR 11568.

### **Caracterização Quanto à Resistência a Corrosão**

O sistema de medição utilizado para investigação do comportamento do aço inoxidável ABNT 316-L quanto à corrosão foi um Potenciostato/Galvanostato EG&G - Princeton Applied Research modelo 273 interfaceado a um microcomputador por meio de uma placa GPIB National Instruments Co.

A célula teste consiste de um sistema de três eletrodos: o de trabalho que são as amostras metálicas; o de referência que assume potencial estável, no caso, eletrodo de calomelano saturado e o eletrodo de grafite como auxiliar ou contra-eletrodo, que é ionicamente inerte e serve como fonte ou escoadouro de elétrons para suprir a corrente que flui através do eletrodo de trabalho. Foi utilizado como eletrólito uma solução salina aerada de 3,5% em peso preparada a partir de água destilada e NaCl de alta pureza.

Os eletrodos de trabalho confeccionados a partir do aço laminado foram lixados com lixa de granulometria 150, 220, 320, 420 e 600, a fim de uniformizar o acabamento. Já as amostras sinterizadas foram utilizadas na condição como processadas. Antes de montar os eletrodos de trabalho foi realizada uma limpeza em ultra-som (Metason 60T Struers), em solução de álcool (NaOH) e posteriormente enxaguadas em água destilada e secas com papel toalha.

Neste trabalho, as características de corrosão do aço inoxidável 316 L foram investigadas através de técnica eletroquímica potenciodinâmica. Inicialmente foram realizados ensaios  $E_{CORR}$  x

tempo durante 2700 segundos para a determinação do potencial de corrosão e avaliação da tendência de dissolução ou à formação de filmes passivantes sobre o eletrodo de trabalho em regime de circuito aberto ( $E_{oc}$ ) dos materiais no eletrólito em questão. E em seguida, realizaram-se ensaios potenciodinâmicos, polarizando o eletrodo de trabalho de  $-250$  mV vs  $E_{oc}$  até  $1600$  mV, a uma velocidade de  $0,8$  mV/s. Neste teste, visualiza-se o comportamento dinâmico dos materiais nos potenciais verificados. Obtêm-se também, taxa de corrosão, constantes de Tafel, com o auxílio do programa Softcorr M352 da PARC para análise dos resultados advindos destes ensaios.

Todos os resultados mostrados neste trabalho são a média de pelo menos três medições. O erro indicado corresponde a  $1,96 \sigma$ .

## Resultados e Discussões

Os resultados das análises químicas dos aços laminado e sinterizado mostrados nas Tabelas (1) e (2) apresentam composição química similar ao ABNT 316L, conforme NBR 5106 (Tab. 3).

Tabela 1. Composição Química da amostra sinterizada

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	V	Al	Cu	C	Fe
%	16,09	12,74	2,24	<0,18	0,76	0,02	0,012	0,15	0,011	0,29	<0,016	Balanço

Tabela 2. Composição Química da amostra laminada.

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	V	Al	Cu	C	Fe
%	17,12	10,10	1,97	1,47	0,49	0,03	0,007	0,16	0,012	0,121	0,026	Balanço

Tabela 3. Composição Química para o aço inoxidável segundo a NBR 5106.

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C	Fe
%	16 – 18	10 – 14	2 - 3	(máx) 2	(máx) 1	(máx) 0,045	(máx) 0,03	(máx) 0,025	Balanço

A comparação microestrutural, demonstra que os dois materiais são 100% austenítico, porém no sinterizado há a presença de poros, o que diminui a sua densidade em aproximadamente 6% (Figura 1).

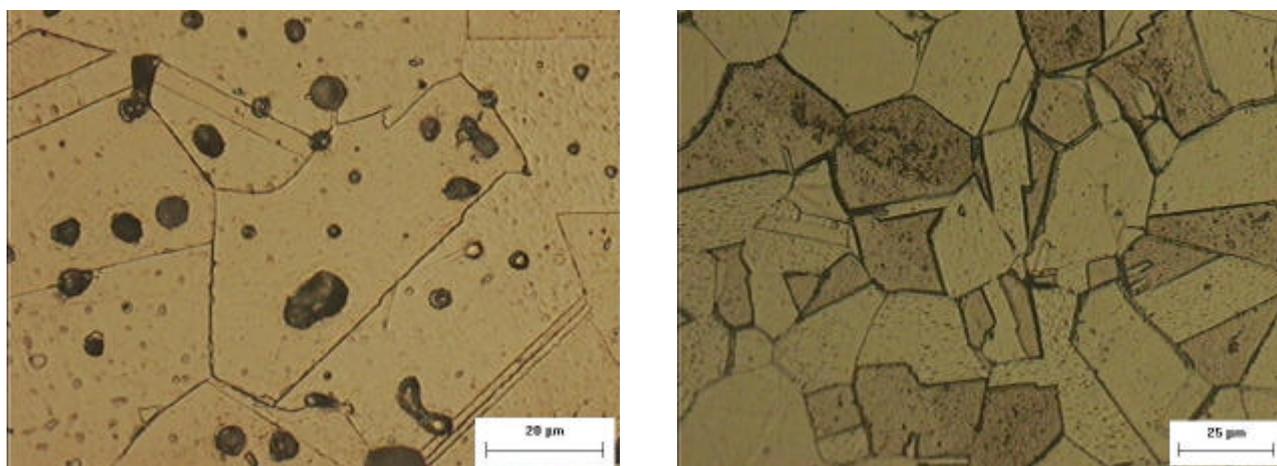


Figura 1. Aço ABNT 316L a) Sinterizado e b) Laminado

Pela medição do tamanho de grãos o aço laminado pode ser classificado como ABNT TG 8, enquanto o sinterizado é classificado como ABNT TG 4, ou seja, o tamanho de grão do aço sinterizado é maior do que o laminado.

Os resultados da análise de corrosão podem ser visualizados na Tabela 04 e na Figura 03.

Na Tabela 04 podemos verificar os potenciais médios de corrosão, as constantes de Tafel e as taxas de corrosão de cada um dos materiais. A análise destes valores permitem concluir que tanto os potenciais bem como as taxas de corrosão indicam um melhor desempenho do material laminado. Isto provavelmente está relacionado com os seguintes fatores: aumento da superfície em virtude dos poros; alteração da composição química superficial durante o processamento do material sinterizado em ambiente de baixa pressão.

Tabela 4. Resultados Médios  $E_{corr}$ ,  $I_{corr}$  e TC.

Amostras	$B_a$	$B_c$	$E_{corr}$ (V)		$i_{corr}$ (mA/mm <sup>2</sup> )		TC (mm/ano) x 10 <sup>-6</sup>	
			Média	desv.p.	média	desv.p.	Média	desv.p.
Laminado	0,10	0,10	0,127	0,016	24,02	7,27	38,71	11,67
Sinterizado	0,10	0,10	0,093	0,020	27,79	10,49	44,79	16,90

Na Figura 03 podemos visualizar que a curva de polarização do material laminado encontra-se deslocada para a esquerda e acima, indicando assim um comportamento melhor para este material. Ou seja, o material laminado apresentou-se mais nobre e com taxas de dissolução menores para um mesmo potencial. Pode-se verificar também que não houve passivação no meio estudado.

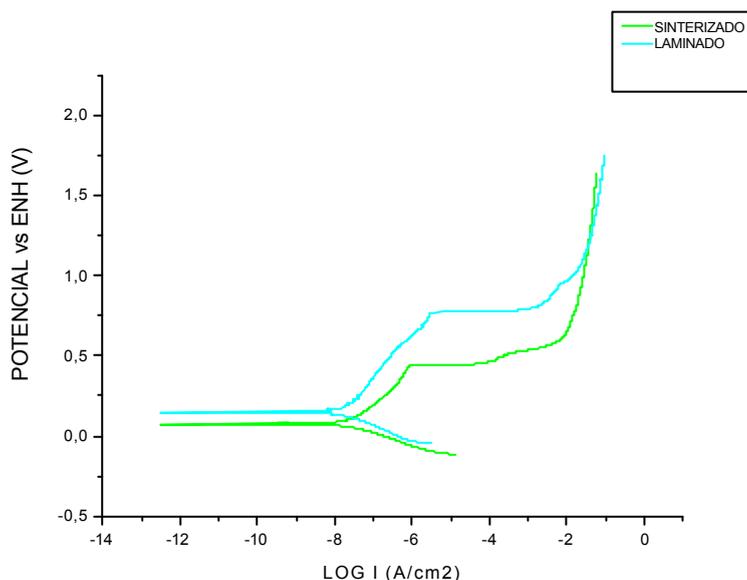


Figura 03. Curvas de Polarização Potenciodinâmica para os Materiais Sinterizado e Laminado

## Conclusões

A presença de poros no material sinterizado aumentou a taxa de corrosão do material em questão, bem como, deslocou a curva potenciodinâmica para potenciais menos nobres e para correntes de dissolução maiores.

Os resultados demonstram que a resistência a corrosão de aço sinterizado é afetada pela presença de poros abertos, bem como eles agem conjuntamente no aumento da área superficial efetiva do material. Portanto, a resistência a corrosão de materiais sinterizados é consideravelmente reduzida pela porosidade residual.

### 3. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela concessão da bolsa de IC, aos Professores Carlos Cruz e João Batista e a todos os demais colegas que de alguma forma colaboraram no andamento desta atividade.

### 4. REFERÊNCIAS

- Borges, P. C., Pereira, N. C., Franco, V. C., Klein A. N., “Electrochemical Evaluation Of Corrosion Resistance of Sintered And Ionitrided Iron”, *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Material*, Vol. 02, pp 61-67, 1994.
- Chiaverini, V., *Metalurgia do Pó*, 4ª edição, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.
- EPMA, *Metalurgia*, v.72, n.4, 1995.
- Klar, E., and Samal, P. K., “Effect of Density and Sintering Variables on The Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels”, *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Material*, Vol. 11, pp 03-17, 1995.
- Mathiesen T., and Maahn E., “Effect of Pore Morphology on the Corrosion Behavior of Sintered 316L Stainless Steel”, *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Material*, Vol. 11, pp 45-55, 1995.
- Minuth, P. K., Kunert, P. Meinhardt, D., Petyzoldt, F. e Veltl, G., “Mechanical and Corrosion Properties of MIM Parts Produced from Blends of Gas and Water Atomised Powders”, *Advanced in powder Metallurgy & Particulate Materials*, U.S, Vol. 11, pp 19-29, 1996.
- MPIF; *Powder Metallurgy Design Manual*, 1995
- Neto, S. C., *Estudo da Cinética de Sinterização e Evolução Microestrutural de Ligas Fe-Ni-P Injetadas*, Dissertação de Mestrado, UFSC, 2001
- Pereira, N. C., Mittelstadt, F. G., Spinelli, A., Maliska, A. M., Muzart J. L. R., Klein, A. N., and Franco, V. C., “Electrochemical and Microstructural Studies of Sintered and Sintered-Plasma Nitrided Steel Containing Different Alloying Elements”, *Journal of Material Science*, Vol. 30 Number 19, pp 4817-4822, 1995.
- PM<sup>2</sup>TEC’ 97- *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, Chicago, USA, July 03-08, 1997, in press.
- Sobral, A. V. C., Parente, A. C. B., Muzart, J. L. R., and Franco, C.; “Influence of Si and Mo as alloy elements in the electrochemical corrosion of sintered ion-nitrided steel”, *Surface and Coatings Technology*, 92, pp 10-15, 1997.

# CORROSION RESISTANCE OF SINTERING AND PLATE ABNT 316 – L STAINLESS STEEL

## **Marcelle Maia**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Av. Sete de Setembro, 3165 – Curitiba/ PR, Brasil – CEP 80230-901, marcellemaia@hotmail.com

## **Paulo César Borges**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Av. Sete de Setembro, 3165 – Curitiba/ PR, Brasil – CEP 80230-901, pborges@cefetpr.br

**Abstract.** This article presents the behavior about corrosion of ABNT 316-L stainless steel: plated and obtained by injection of powders metallic. The electrochemical parameters were obtained through of tests a normal conditions of temperature and pressure, with assistance of the potenciostat/galvanostat connected to desktop computer. A solution of seawater, NaCl 3,5% (weight), was used as electrochemical environment. The tendency of active dissolution or a formation of film passivante (thermodynamics parameters and kinetics) was obtained from the potentiodynamic test using the program Analysis M270 of PARC for acquisition and treatment of data. In the results are showed: the chemical compositions carried out in a spectrometer of optic emission; the microstructurall analysis (phases presents, quantity, size and distribution these) was accomplish by metallography analysis using optics microscopy and software of analysis of images and corrosion results (corrosion potential, exchange current, density of current, Tafel constants, corrosion rate). We can conclude that the residual porosity (size, form, quantity and distribution) affect the corrosion behavior of these steels due to increase of contact surface with the electrolyte.

**Key-words:** corrosion, electrochemical test, stainless steel.