

PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE CORROSÃO DE DOIS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE IMPLANTES ORTOPÉDICOS

Enrico José Giordani

Vagner Alves Guimarães

Itamar Ferreira

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, 13.083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: enrico@fem.unicamp.br

Resumo

O aço inoxidável austenítico ASTM F 138 é amplamente utilizado na fabricação de implantes ortopédicos devido principalmente às suas boas propriedades mecânicas, razoável resistência à corrosão, boa usinabilidade e conformabilidade, além do baixo custo. Entretanto, este aço é suscetível à corrosão localizada quando em contato com fluido corpóreo, sendo indicado geralmente para aplicações temporárias. Assim sendo, tornou-se eminente a necessidade de se desenvolver novos materiais com boas propriedades mecânicas, conformabilidade e usinabilidade, mas com melhor resistência à corrosão localizada, a um custo similar ao do aço ASTM F 138. Diante desta necessidade, o aço inoxidável austenítico, com alto teor de nitrogênio (entre 0,25 e 0,50% N), de classificação ISO 5832-9, parece promissor devido à alta resistência à corrosão associado às boas propriedades mecânicas. Este trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente as propriedades mecânicas básicas e propriedades de corrosão localizada dos aços inoxidável ASTM F 138 e ISO 5832-9. Este último apresentou melhores valores de limite de resistência à tração (σ_t) e alongamento. A partir do ensaio de polarização cíclica potenciodinâmica, verificou-se que o aço inoxidável austenítico ISO 5832-9 mostrou-se menos suscetível à corrosão localizada quando comparado com o aço austenítico ASTM F 138.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas, Propriedades de corrosão, Implantes Ortopédicos, Biomateriais.

1. INTRODUÇÃO

Por mais de meio século os aços inoxidáveis têm sido usados como material de implantes ortopédicos para substituição de articulações e fixação de fraturas. Todavia, os primeiros aços inoxidáveis austeníticos eram bastante suscetíveis à chamada corrosão intergranular, causada pela precipitação preferencial de carbonetos de cromo nos contornos de grãos e conseqüente sensitização das regiões adjacentes. Uma abordagem para resolver o problema da corrosão intergranular é a redução do teor de carbono, o que deu origem aos aços do tipo L, *Low Carbon*, produzidos pelo processo de fusão à vácuo com baixíssimos níveis de inclusões. Nessa categoria se enquadram os aços do tipo ASTM F 138 (classe especial do AISI 316 L para aplicações cirúrgicas). Outra forma de controlar a corrosão intergranular é a adição de elementos estabilizadores, ou seja, elementos que possuem maior afinidade pelo

carbono que o cromo, tais como o nióbio, titânio, vanádio e tungstênio. Um dos objetivos desses elementos é a formação de carbonetos mais estáveis que os carbonetos de cromo (Lopez, 1993).

O meio fisiológico com sua alta concentração de eletrólitos é um ambiente altamente agressivo em termos de corrosão, tanto generalizada quanto as mais diversas formas de corrosão localizada que, isoladamente ou associada a esforços mecânicos, são geralmente responsáveis por falhas em implantes ortopédicos (Giordani, 1999; Sivakumar & Rajeswari, 1995). Infelizmente, um dos maiores causadores da destruição da passividade é o íon cloreto, abundantemente disponível em fluídos do corpo. Contudo, competindo com esses processos de destruição existe o processo de reparo, a repassivação. Desta forma, as ligas mais eficientes para aplicações em implantes são aquelas cujas superfícies, não somente formem filmes passivos, ou seja, que resistam aos processos iniciais de destruição, mas também sejam capazes de repassivação a uma taxa suficientemente alta (Gentil, 1982; Lopez, 1993).

Os aços do tipo ASTM F 138 apresentam uma performance satisfatória no corpo humano, especialmente quando empregados como implantes temporários para fixação de fraturas. A questão que se apresenta para os pesquisadores é o desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação que permitam a produção de próteses permanentes com bom desempenho e custo mais acessível que as ligas de titânio e cromo-cobalto. A *International Organization for Standardization*, através da norma ISO 5832-9 de 1992, fixou limites de composição, bem como, características e métodos de ensaios dos aços inoxidáveis austeníticos para implantes, com alto teor de nitrogênio. Esses aços constituem-se, atualmente, nos materiais de baixo custo mais promissores para a fabricação de implantes ortopédicos. Todavia, a substituição do aço ASTM F 138 pelo ISO 5832-9 requer um estudo comparativo das propriedades mecânicas e resistência à corrosão dos dois materiais. Esse trabalho tem por objetivo avaliar a viabilidade da substituição do aço inoxidável ASTM F 138 pelo ISO 5832-9, no que diz respeito à propriedades mecânicas básicas, obtidas no ensaio de dureza Brinell e ensaio de tração, em meio neutro, e propriedades de corrosão, obtidas no ensaio de polarização cíclica potenciodinâmica, em meio fisiológico artificial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram dois aços inoxidáveis austeníticos, sendo um de classificação ASTM F 138 (ISO 5832-1) e outro ISO 5832-9 (ASTM F 1586), produzidos pela VILLARES S/A. Ambos foram recebidos na forma de barras laminadas com diâmetro de 15,87 mm. A tabela 1 apresenta a composição química em porcentagem de peso dos principais elementos presentes nestes aços.

Tabela 1. Composição química dos principais elementos dos aços inoxidáveis ASTM F 138 e ISO 5832-9 produzidos pela Villares S/A.

Composição química (% peso)	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu	N	Nb	Fe
ASTM F 138	0,019	0,51	1,73	14,1	17,5	2,04	0,0014	0,022	0,06	0,046	—	balanço
ISO 5832-9	0,032	0,03	3,83	11,0	22,6	2,41	0,0026	0,023	0,05	0,291	0,42	balanço

Para a realização do estudo comparativo entre os dois materiais foram determinadas as propriedades mecânicas básicas, obtidas em ensaio de tração monotônico e ensaio de dureza Brinell, e a suscetibilidade a corrosão localizada pelo ensaio de polarização cíclica potenciodinâmica.

O ensaio de tração foi conduzido segundo a norma ASTM E 8M, utilizando-se uma máquina de ensaios MTS modelo 810 com capacidade de 10 toneladas. A velocidade de deslocamento do pistão foi de 0,02 mm/s. Os corpos de prova foram retirados de barras de 15,87 mm de diâmetro para os dois aços e suas dimensões estão mostradas na figura 1.

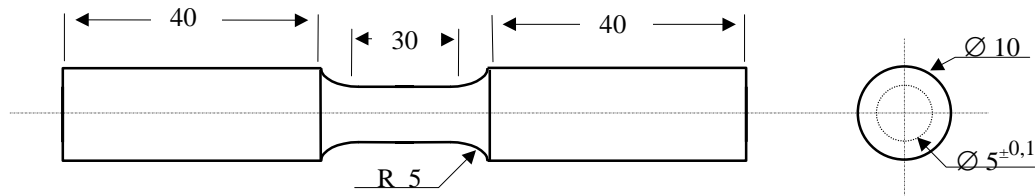


Figura 1. Corpo de prova de tração. Dimensões em milímetro.

O ensaio de dureza Brinell foi realizado segundo a norma ASTM E 10, utilizando-se um durômetro da marca HECKERT WPM, modelo HPO 250, com um penetrador esférico de aço de 2,5 mm de diâmetro. A carga utilizada no ensaio foi de 187,5 kgf (1839 N) com um tempo de aplicação de 10 a 15 segundos. Foram realizadas medidas de dureza na seção transversal e na superfície externa de corpos de prova retirados das barras laminadas.

O ensaio de polarização cíclica potenciodinâmica foi conduzido com base na norma ASTM G 61. Este tipo de ensaio é realizado com a finalidade de se verificar comparativamente a suscetibilidade à corrosão localizada (por pite e por fresta) de materiais metálicos passivos. O ensaio consiste na realização de um ciclo de varredura de potencial, observando-se a corrente de corrosão desenvolvida durante esta varredura. Essa corrente indica a intensidade de corrosão que o material está sofrendo. Os principais parâmetro determinados a partir deste ensaio são:

- E_{pite} – potencial de pite, é o potencial, a partir do qual a corrente de corrosão anódica cresce rapidamente. Quanto maior (mais nobre) o valor deste potencial, menor a suscetibilidade à corrosão localizada do material;
- E_{rep} – potencial de repassivação, é dado pelo potencial em que o laço de histerese é completado. Quanto menor o valor deste potencial, maior a suscetibilidade à corrosão localizada do material.

O ensaio foi conduzido a temperatura ambiente ($22 \pm 2^\circ\text{C}$), em um potenciostato da marca EG&G PRINCETON APPLIED RESEARCH, modelo 273A. O eletrólito utilizado foi um fluido fisiológico artificial naturalmente aerado que consistia de uma solução de 9 gramas de NaCl em água destilada e deionizada até completar 1 litro (NaCl 0,9%). O eletrodo de referência utilizado foi do tipo calomelano saturado (*SCE*) e o contra eletrodo utilizado foi de platina. O potencial de varredura iniciou-se em -750 mV com uma taxa constante durante todo o ensaio de 1200 mV/hora. O potencial de reversão não foi estipulado, sendo que esta reversão ocorria quando a densidade de corrente de corrosão atingia $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. O ensaio era interrompido logo após o potencial de repassivação (E_{rep}) ter sido atingido. Os corpos de prova foram cortados a partir das barras nas condições de recebimento, lixados e polidos com pasta de diamante de $1 \mu\text{m}$ em sua seção transversal. A célula continha uma tampa lateral de *teflon* com um furo passante de 12 mm de raio que delimitava o contato do eletrólito com a superfície polida do material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Microestrutural

A figura 2 mostra as microestruturas das seções transversais e longitudinais dos aços inoxidáveis ASTM F 138 e ISO 5832-9 produzidos pela Villares S/A, nas condições de recebimento, observadas por microscopia ótica, utilizando-se um microscópio Neophot-32.

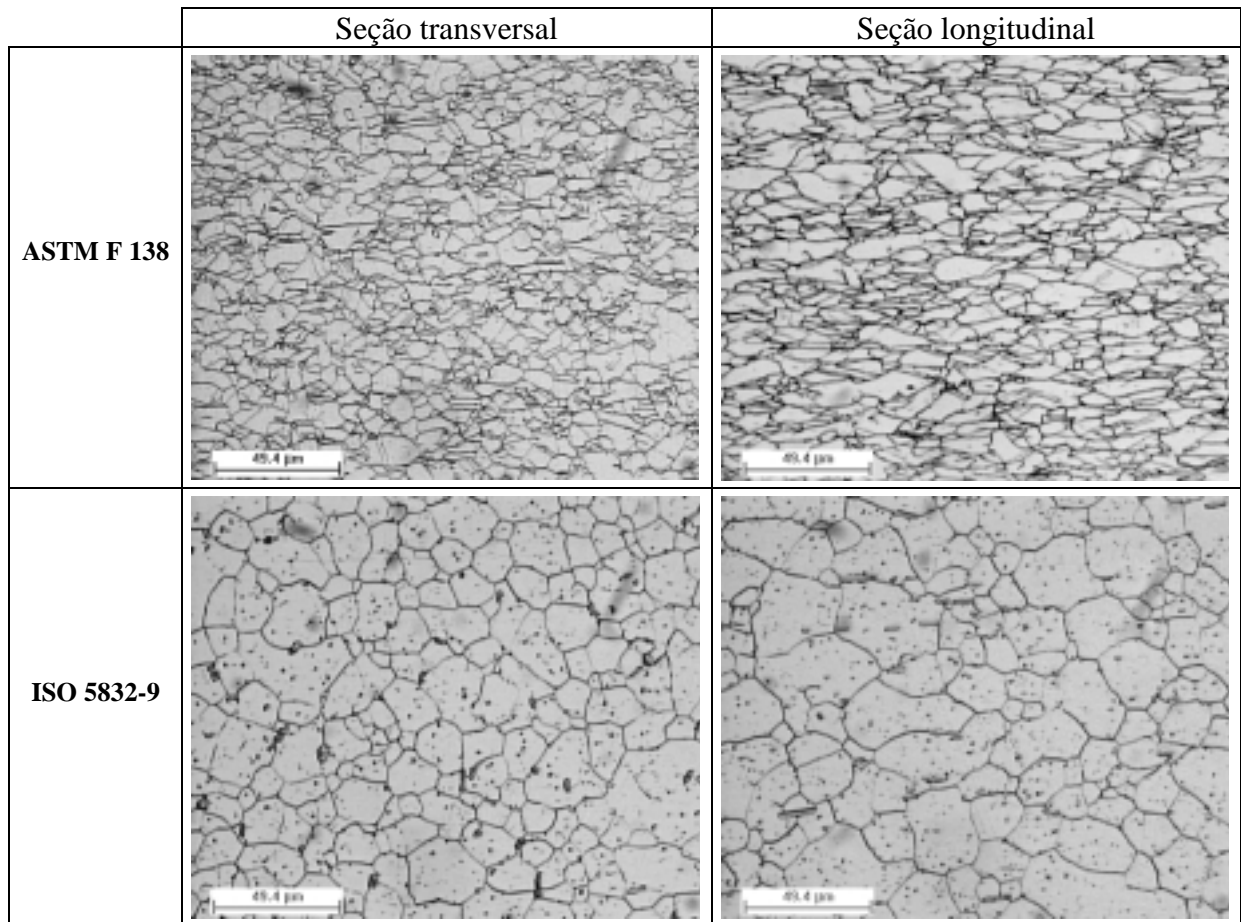


Figura 2. Microestruturas das seções transversal e longitudinal dos aços ASTM F 138 e ISO 5832-9 observadas por microscopia ótica. Ataque: 60% HNO₃ (Voort, 1989).

Observa-se que os dois materiais apresentam microestrutura composta basicamente de grãos austeníticos, sendo que o aço ASTM F 138 apresenta grãos preferencialmente alongados na direção de laminação, quando observada a microestrutura da seção longitudinal. Esta orientação evidencia uma condição encruada ou deformada, proveniente do processo de laminação a que foi submetido este material. Já o aço ISO 5832-9 apresenta grãos equiaxiais tanto na seção transversal como na seção longitudinal, que por sua vez evidencia uma condição recristalizada. A microestrutura deste aço também revela a presença de partículas de precipitados primários, de forma geralmente alongadas e alinhadas na direção de laminação, como pode ser visto na seção longitudinal. Uma análise semi-quantitativa por *EDS* (*Energy Dispersive Spectroscopy*) realizada no microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JXA 840 A, mostrou que estes precipitados são ricos em nióbio e são mencionados na literatura técnica como fase Z (Örnhagen, *et al.*, 1996). Acredita-se que esta fase Z tem pouca influência sobre as propriedades de corrosão do material.

3.2 Propriedades Mecânicas Básicas

A partir das curvas tensão-deformação mostradas na figura 2 e das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração (tabela 2), pode-se verificar que o aço ISO 5832-9 apresentou limite de resistência à tração (σ_t) e principalmente alongamento total consideravelmente superior ao do aço ASTM F 138. Essa combinação confere ao material maior tenacidade, quando esta propriedade é avaliada a partir da área sob a curva tensão-deformação. Uma consideração importante a ser feita é acerca do valor do limite de escoamento (σ_e) determinado para o aço ISO 5832-9 que apresenta-se sensivelmente inferior ao valor apresentado pelo aço ASTM F 138. Isto ocorre provavelmente devido ao fato deste último mostrar evidências de um certo grau de encruamento, caracterizado pela presença de grãos alongados em sua microestrutura (figura 1).

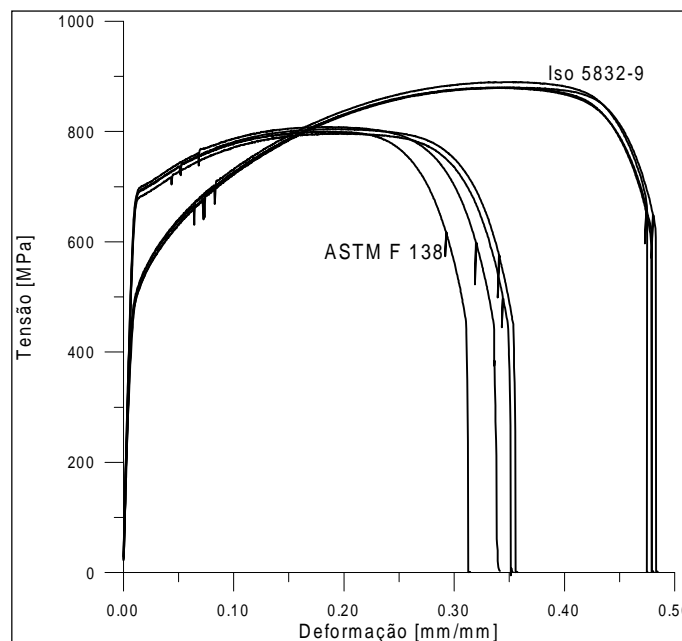


Figura 3. Curvas tensão-deformação para os aços inoxidáveis austeníticos ASTM F 138 e ISO 5832-9.

Tabela 2. Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração monotônico para os aços inoxidáveis ASTM F 138 e ISO 5832-9.

MATERIAL	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento Total em 5d, (mm/mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
ASTM F 138	679,7 ± 6,1	802 ± 4,5	80,5 ± 2,2	39,0 ± 2,3	207,5 ± 5,0
ISO 5832-9	484,3 ± 8,4	882,3 ± 4,5	68,0 ± 1,3	48,4 ± 0,3	193,0 ± 7,9

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell. Observa-se uma sensível diferença nos valores de dureza verificadas na seção transversal e longitudinal dos dois aços. Este fato é atribuído ao encruamento superficial gerado pelo processo de descascamento por usinagem a que os aços inoxidáveis foram submetidos. A diferenças mais acentuada no aço ISO 5832-9 é racionalizada pelo fato deste aço apresentar um coeficiente de encruamento consideravelmente superior, como observado na figura 3.

Tabela 3. Dureza Brinell determinada para os aços inoxidáveis austeníticos ASTM F 138 e ISO 5832-9.

Material	HBS 2,5/187,5, (seção transversal)	HBS 2,5/187,5 (superfície externa)
ASTM F 138	241 ± 3	304 ± 3
ISO 5832-9	231 ± 4	327 ± 5

3.3 Suscetibilidade à Corrosão Localizada

O fator *PRE* (*pitting resistance equivalent*) dado por $\%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$ (Örnghagen, *et al.*, 1969), que serve como uma indicativa da resistência à corrosão por pite em meios contendo cloretos, sugere uma considerável melhora desta propriedade para o aço ISO 5832-9 ($PRE \cong 35$) quando comparado ao aço ASTM F 138 ($PRE \cong 25$).

A partir das curvas de polarização cíclica potenciodinâmica, como os exemplos mostrados na figura 4, e dos valores dos parâmetros determinados neste ensaio e mostrados na tabela 4, verifica-se que o aço inoxidável austenítico ISO 5832-9 apresentara-se bem menos suscetíveis a corrosão localizada que o aço inoxidável austenítico ASTM F 138. Este fato pode ser constatado pela superioridade, tanto do potencial de pite ($E_{p\text{ite}}$), como pela ausência do laço de histerese para este material.

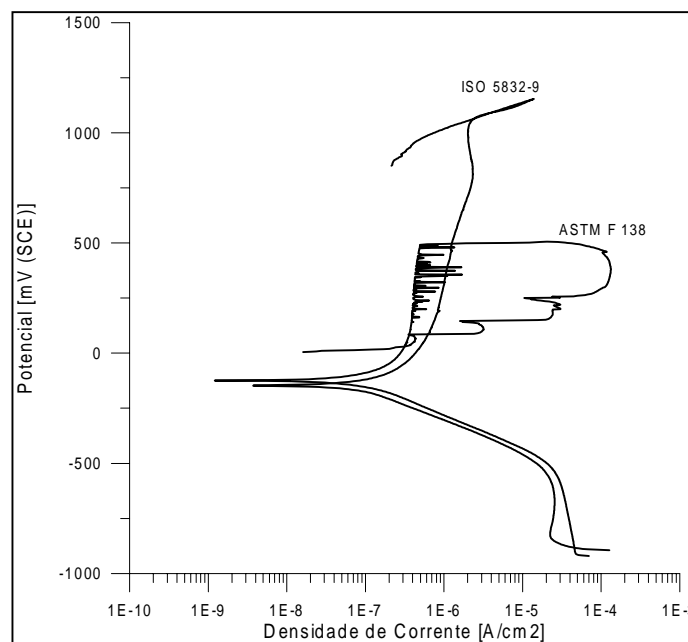


Figura 4. Curvas obtidos a partir de ensaios de polarização cíclica potenciodinâmica para os aços ASTM F 138 e ISO 5832-9.

Tabela 4. Resultados obtidos a partir de ensaios de polarização cíclica potenciodinâmica para os aços ASTM F 138 e ISO 5832-9.

MATERIAL	$E_{p\text{ite}}$ (mV)	E_{rep} (mV)
ASTM F 138	543 ± 36	284 ± 202
ISO 5832-9	1049 ± 11	1053 ± 16

A ausência do laço de histerese é uma indicativa de que não ocorreu corrosão localizada durante o ensaio do aço inoxidável ISO 5832-9 (Rondelli *et al.*, 1997).

Atribui-se principalmente ao nitrogênio em solução sólida, além do papel de estabilizador da austenita, o aumento tanto da resistência a corrosão localizada como da resistência mecânica do aço inoxidável austenítico ISO 5832-9 (Nyström *et al.*, 1997; Aidar *et al.*, 1998).

4. CONCLUSÕES

As propriedades mecânicas, no que diz respeito a resistência à tração, alongamento total e consequentemente tenacidade, apresentaram-se consideravelmente superiores para o aço ISO 5832-9 quando comparadas ao aço ASTM F 138.

A resistência à corrosão localizada, avaliada pelo ensaio de polarização cíclica potenciodinâmica em meio fisiológico artificial naturalmente aerado, apresenta-se sensivelmente superior para o aço inoxidável ISO 5832-9 quando comparada ao aço inoxidável ASTM F 138.

A despeito da constatação da superioridade do aço inoxidável ISO 5832-9, no tocante a propriedades mecânicas básicas e propriedades de corrosão localizada, é indiscutível a necessidade de se avaliar as propriedades mecânicas cíclicas (fadiga), principalmente em meio agressivo (fadiga-corrosão), para a substituição do aço ASTM F 138.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Baumer S/A pelo fornecimento dos aços inoxidáveis abordados neste trabalho e ao CNPq pela concessão de bolsas de pesquisa.

Referências

- Voort, G.F.V., 1989, "The Metallography of Stainless Steel", JOM/Journal of Metals, March, pp.6-11.
- Örnham, C., Nilsson, J.-O.; and Vannevik, H., 1996, "Characterization of a Nitrogen-Rich Austenitic Stainless Steel Used for Osteosynthesis Devices", Journal of Biomedical Materials Research, v.31, pp.97-103.
- Rondelli, G., Vincentini, B.; and Cigada, A., 1997 "Localised Corrosion Tests on Austenitic Stainless Steel for Biomedical Applications", British Corrosion Journal, v.32, n.3, pp.193-196.
- Lopez, G.D., 1993, "Biodeterioration and corrosion of metallic implants and prosthetic devices" Medicina Buenos Aires, v.53, n.3, pp.260-274.
- Gentil, V., 1982, "Corrosão", Ed. Guanabara S.A., Rio de Janeiro, Brasil, Cap.8.
- Giordani, E.J.; Guimarães, V.A.; and Ferreira, I., 1999, "Failure analyze of two ASTM F 138 Stainless Steel Orthopedic Implants", Acta Microscópica, v.8 Supplement A, October, pp.255-256.
- Aidar, C.H.; Beneduce Neto, F.; Alonso, N.; and Tschiptschin, A.P., 1996, "Aço inoxidável austenítico com elevado teor de nitrogênio para utilização em implantes cirúrgicos", Metalurgia & Materiais, Junho, pp.303-306.
- Sivakumar, M. and Rajeswari, S., 1995, "Corrosion Induced Failure of a Stainless Steel Orthopaedic Implant Device", Steel Research, v.66, n.1, pp.35-38.

- Nyström, M.; Lindstedt, U.; Karlsson, B.; and Nilsson, J.-O, 1997, “Influence of Nitrogen on Deformation Behaviour of Austenitic Stainless Steel”, *Materials Science and Technology*, v.13, n.7, pp.560-567.