Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Comportamento eletroquímico do Ti-cp e das ligas Ti-Ta em soluções fisiológicas

Rodrigo R. A. Garcia[1] , Alain Robin[2] , Jorge L. Rosa[3]

Abstract

The electrochemical behavior of cp-Ti and Ti-20, 40, 60 and 80Ta alloys (wt%) was studied in Ringer´s solution at room temperature using the following pH-total fluoride concentration conditions: pH7,5 (natural pH)-0 ppmF; pH5-1000 ppmF; pH5-5000 ppmF; pH2-0 ppmF; pH2-1000 ppmF; pH2-5000 ppmF. The study was based on open-circuit potential measurements, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance measurements. cp-Ti and Ti-Ta alloys showed a passive behavior in Ringer´s solution of pH2 and pH7,5 without fluorides, which was characterized by noble potentials (in stability region of TiO_2 and Ta_2O_5 oxides in Ti and Ta Pourbaix´diagrams, respectively), low values of corrosion current density and high values of impedance. The Ti-Ta alloys were passive in all solutions containing fluorides. On the contrary, cathodic potentials (in the stability region of Ti ions in Ti Pourbaix´diagram), high values of corrosion current density and low values of impedance were measured for cp-Ti in Ringer´s solution of pH2 and pH5 containing 1000 and 5000 ppm total fluoride, corresponding to an active behavior. The active behavior of cp-Ti was associated to the dissolution of TiO_2 oxide film by HF e HF_2^- species present in these solutions. An increase in corrosion resistance with the increase in Ta content was observed.

Keywords: titanium, Ti-Ta alloys, corrosion, passivation, physiological solutions

Resumo

O comportamento eletroquímico do Ti-cp e das ligas Ti-20, 40, 60 e 80Ta (% em massa) foi avaliado em solução de Ringer à temperatura ambiente utilizando as seguintes combinações de pH e concentração de fluoretos total: pH7,5 (pH natural)-0 ppmF; pH5-1000 ppmF; pH5-5000 ppmF; pH2-0 ppmF; pH2-1000 ppmF; pH2-5000 ppmF. O estudo foi baseado em medições de potencial em circuito aberto, polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica. O Ti-cp e as ligas Ti-Ta apresentaram um comportamento passivo em solução de Ringer de pH2 e 7,5 sem a presença de fluoretos, caracterizado por potenciais nobres (na região de estabilidade dos óxidos TiO_2 e Ta_2O_5 dos diagramas de Pourbaix do Ti e Ta, respectivamente), baixos valores de densidades de corrente de corrosão e altos valores de impedância. As ligas Ti-Ta se mantiveram passivas em todas as soluções contendo fluoretos. Ao contrário, potenciais de corrosão catódicos (na região de estabilidade dos íons de Ti do diagrama de Pourbaix), altos valores de densidade de corrente de corrosão e baixos valores de impedância foram medidos para o Ti-cp em solução de pH2 e pH5 contendo 1000 e 5000

[1] Engenheiro Químico - FAB
[2] Dr., Engenheiro Eletroquímico e Eletrometalúrgico – EEL/USP
[3] Mestre, Tecnólogo – EEL/USP

ppm de fluoretos, revelando seu comportamento ativo. O comportamento ativo do Ti-cp está relacionado com a dissolução do filme de TiO_2 por HF e HF_2^-, espécies majoritárias nestas soluções. Foi observado um aumento da resistência à corrosão com o aumento do teor de Ta nas ligas.

Palavras-chave: titânio, ligas Ti-Ta, corrosão, passivação, soluções fisiológicas

Introdução

O Ti-cp e a liga Ti-6Al-4V são largamente usados em cirurgia restaurativa, como para implantes ortopédicos, marcapassos e válvulas cardíacas. Em ortodontia, o Ti e a liga Ti-6Al-4V tem aplicações em implantes dentários e em braquetes [1-4].
A resistência à corrosão do Ti e da liga Ti-6Al-4V é devida à formação espontânea de um filme passivante de óxidos, que apresenta alta estabilidade em fluídos biológicos [5]. No entanto, em ambientes ácidos redutores e em presença de certos íons complexantes, como os íons fluoretos, esta estabilidade pode ser prejudicada e o titânio e a liga Ti-6Al-4V serem severamente atacados [5-11]. Foi relatado que em ambiente contendo íons fluoretos, há formação de fluoretos e oxifluoretos de titânio solúveis [12-13]. O efeito dos íons fluoretos é intensificado em ambientes ácidos devido à formação de HF [7].
Foi mostrado que a liberação, mesmo que em pequenas quantidades, de Al e particularmente de V no corpo humano poderia ter efeitos indesejáveis, devido à citotoxicidade destes dois elementos [14]. Assim, ligas sem V contendo elementos como Nb e Fe foram desenvolvidos (Ti-6Al-7Nb e Ti-5Al-2,5Fe). Mais recentemente, ligas sem Al e sem V, como as ligas Ti-Nb-Zr, Ti-Mo e Ti-Ta foram produzidas, tendo em vista a biocompatibilidade do Zr, Nb, Mo e Ta [14].
Uma quantidade muito grande de estudos está disponíveis na literatura sobre o comportamento eletroquímico do Ti e da liga Ti-6Al-4V em meios fisiológicos sintéticos. Já, os trabalhos sobre o comportamento eletroquímico das ligas Ti-Ta nestes meios são escassos [15-19].
O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento eletroquímico de ligas Ti-Ta em solução de Ringer, visando possíveis aplicações destes materiais em implantes ortodônticos. Como pode ocorrer acidificação do ambiente bucal pela ingestão de bebidas e alimentos ácidos e pela geração de ácidos orgânicos devido ao metabolismo de carboidratos das bactérias cariogénicas, foi avaliado o efeito do pH da solução. Da mesma forma, como os tratamentos à base de fluoretos são empregados como métodos para prevenir a formação da placa dentária e o desenvolvimento de cáries, o efeito dos fluoretos foi também investigado. O estudo foi baseado em medições do potencial em circuito aberto, polarização potenciodinâmica e medidas de impedância eletroquímica. Os resultados obtidos para as ligas foram comparados com aqueles do Ti-cp.

Materiais e Métodos

As ligas Ti-Ta (x = 20, 40, 60 e 80 % em massa) foram obtidas por fusão a arco seguida de tratamento térmico a 1200^{o}C por 48h e resfriamento no forno. Os resultados da preparação e da caracterização das ligas Ti-Ta foram objetos de uma outra publicação [20]. As ligas Ti-20Ta e Ti-40Ta apresentam-se bifásicas $\alpha + \beta$ e as ligas Ta-60Ta e Ti-80Ta são constituídas

unicamente da fase β. Isso se deve ao caráter β estabilizador do Ta. O Ti-cp utilizado foi na forma bruto de fusão. As microestruturas do Ti-cp e das ligas Ti-20Ta e Ti-60Ta são mostradas na Figura 1. Dos lingotes das ligas e do Ti-cp foram confeccionados corpos de prova cilíndricos que foram embutidos a quente em suportes de PTFE (teflon) deixando uma área exposta em torno 0,5 cm^2. Antes de cada ensaio, os eletrodos de trabalho foram lixados com papel abrasivo de SiC até grana 600, lavados com água destilada e secos com papel absorvente. Foi usada uma célula eletroquímica típica de três eletrodos, sendo o contra-eletrodo, uma folha de platina de área 18 cm^2 e o eletrodo de referência, aquele de calomelano saturado (ECS) (E_{ECS} = 0,242 V/ENH).
A solução eletrolítica foi a solução de Ringer de composição: 8,6 g NaCl + 0,3 g KCl + 0,33 g $CaCl_2$-$2H_20$ em 1000 mL de água deionizada. O pH desta solução está em torno de 7,5. Para analisar o efeito do pH e da presença de fluoretos, o pH da solução foi também ajustado a 5 e 2, e NaF foi adicionado para se obter uma concentração de fluoretos total de 1000 e 5000 ppm. A Tabela 1 indica as condições pH-concentração de fluoretos investigadas neste trabalho. A temperatura de trabalho foi a ambiente.
O estudo foi baseado em medições de potencial em circuito aberto durante 3 horas, impedância eletroquímica no OCP (frequências de 0,1 a 10^5 Hz e amplitude de sinal 10 mV) e polarização potenciodinâmica (varredura de -0,5 V vs OCP até 2 V/ECS com velocidade de 1 mV s^{-1}). Foram utilizados a interface eletroquímica SOLARTRON 1287 A, o analisador de resposta em frequência SOLARTRON 1260 A e o software Ecorr/Zplot SOLARTRON 125587S.

Resultados

As Figuras 2 e 3 mostram a variação do potencial em circuito aberto (OCP) do Ti-cp e das ligas Ti-Ta em função do tempo nas soluções de pH2 sem fluoretos e contendo 1000 ppm de fluoretos, respectivamente. Dois tipos de evolução são observados:
- No primeiro, o potencial em circuito aberto é levado para potenciais mais positivos e tende a se estabilizar com o tempo de imersão. Isto é observado para todos os materiais na solução de pH2 (Figura 2) e de pH7,5 sem fluoretos e somente para as ligas Ti-Ta nas demais soluções investigadas.
- No segundo, o potencial em circuito aberto é deslocado para os potenciais mais negativos e tende também a se estabilizar com o tempo de imersão. Este comportamento é observado somente para o Ti-cp nas soluções de pH2 (Figura 3) e de pH5 contendo 1000 e 5000 ppm de fluoretos.
A evolução do potencial em circuito aberto com o tempo de imersão para potenciais mais nobres é característica da estabilidade do filme passivante formado naturalmente ao ar sobre a superfície dos materiais e seu crescimento na solução.
Ao contrário, uma variação do potencial para valores mais negativos reflete a dissolução do filme passivador e a ativação da superfície.
A Tabela 2 mostra os valores dos OCP do Ti-cp e das ligas Ti-Ta em todas as soluções investigadas.
Só o Ti-cp apresentou os dois comportamentos (Figuras 2 e 3). Os valores dos potenciais do Ti-cp nas soluções contendo fluoretos (Tabela 2) se encontram na região de estabilidade dos ions de Ti do diagrama de Pourbaix Ti-H_2O [21], confirmando o estado ativo do Ti-cp (Figura 4). Nas soluções sem fluoretos, os potenciais do Ti-cp se encontram na região de estabilidade de TiO_2, atestando o estado passivo (Figura 4).

Os potenciais de corrosão das ligas Ti-Ta em todas as soluções investigadas se encontram nas regiões de estabilidade de TiO_2 e Ta_2O_5 dos diagramas de Pourbaix Ti-H_2O e Ta-H_2O [21], respectivamente, confirmando o estado passivo (Figuras 4 e 5).
As Figuras 6 e 7 apresentam as curvas de polarização do Ti e das ligas Ti-Ta em soluções de pH2 sem fluoretos e contendo 1000 ppm de fluoretos, respectivamente.
Curvas de polarização do mesmo formato e com a parte anódica característica de materiais passivos foram obtidas para os materiais cujo potencial em circuito aberto evoluiu para valores mais positivos, a saber o Ti em soluções de pH2 (Figura 6) e pH7,5 sem fluoretos e as ligas Ti-Ta em todas as soluções investigadas.
Para o Ti todas as curvas de polarização anódica obtidas nas soluções contendo fluoretos tem uma forma em S similar àquela representada na Figura 7. Estas curvas são caracterizadas por um pico de corrente anódica, correspondente a uma transição ativo-passivo, seguido de um patamar de corrente para sobrepotenciais mais elevados, correspondente à região passiva. Estes resultados confirmam o estado ativo espontâneo do Ti nas soluções contendo fluoretos.
De um modo geral, as densidades de corrente de corrosão do Ti-cp e das ligas Ti-Ta nas soluções onde eles se encontram passivos (soluções de pH2 e pH7,5 sem fluoretos para o Ti-cp e todas as soluções para as ligas Ti-Ta) são da ordem de grandeza de 10^{-6}-10^{-5} A cm^{-2}. No estado ativo (em soluções contendo fluoretos), as densidades de corrente de corrosão do Ti-cp são da ordem de 10^{-3} A cm^{-2}.
A diminuição do pH e o aumento da quantidade de íons fluoretos, individualmente, tendem a reduzir levemente a resistência à corrosão dos materiais mas é a conjugação do baixo pH e da presença de fluoretos que produz o maior efeito sobre a resistência à corrosão dos materiais. Na solução de pH2 contendo 1000 ppm de fluoretos por exemplo, as densidades de corrente de corrosão deduzidas das curvas de polarização (Figura 7) são em torno de 10^{-3} A cm^{-2} para o Ti-cp, 10^{-4} A cm^{-2} para a liga Ti-20Ta e 10^{-5} A cm^{-2} para as ligas Ti-40, 60 e 80Ta.
É também nas soluções de baixo pH contendo fluoretos que se observa mais diferença entre os diversos materiais. Nestas condições, as ligas Ti-40, 60 e 80Ta se mostraram superiores, seguidas da liga Ti-20Ta, e finalmente o Ti-cp.
Os diagramas de Nyquist obtidos para o Ti-cp e as ligas Ti-Ta apresentam todos arcos ou semi-arcos capacitivos (Figura 8), cujos diâmetros variam em função do pH, do teor de fluoretos na solução e do material. A resistência à corrosão pode ser avaliada pelo valor do módulo da impedância a baixas freqüências. De um modo geral, as impedâncias a baixas freqüências para o Ti-cp no estado passivo e as ligas Ti-Ta são na ordem de 10^3-10^4 Ω cm^2. Nas soluções contendo fluoretos, nas quais o Ti-cp é ativo, baixos valores de impedância na ordem de alguns Ω cm^2 foram medidos (Figura 8).
Nas soluções de baixo pH e com a presença de fluoretos, é evidente o aumento da resistência à corrosão com o aumento do teor de Ta. Na solução de pH2 contendo 1000ppm de fluoretos por exemplo, o Ti apresenta impedância em torno de 9 Ω cm^2 , a liga Ti-20Ta em torno de 200 Ω cm^2 e as demais ligas impedância entre 3 e 8.10^3 Ω cm^2.
Estes resultados da impedância eletroquímica estão de acordo com aqueles obtidos usando a técnica de polarização potenciodinâmica.
A depassivação do Ti-cp em soluções fisiológicas de pH ácido contendo fluoretos foi observada por outros autores [7-8,10-11] e foi mostrado que uma relação definida entre pH e teor de fluoretos conduz à depassivação. Nakagawa [7] atribuiu a depassivação do Ti-cp à presença de HF.
Quando se adicionam fluoretos na forma de NaF, não significa que só haverá íons F^- em solução decorrente da dissociação do sal. De fato, existem equilíbrios entre F^- e duas outras espécies contendo flúor, HF e HF_2^-. As concentrações de F^-, HF e HF_2^- são dependentes do

pH e da concentração de fluoreto total e podem ser calculadas a partir das constantes de equilíbrio [22] das seguintes reações:

$HF \Leftrightarrow H^+ + F^-$ $K_1 = [H^+][F^-]/[HF] = 1{,}30 \times 10^{-3}$ mol L^{-1}

$HF_2^- \Leftrightarrow HF + F^-$ $K_2 = [HF][F^-]/[HF_2^-] = 0{,}104$ mol L^{-1}

e da igualdade: $[F\ total] = [F^-] + [HF] + 2[HF_2^-]$

As concentrações de F^-, HF e HF_2^- nas condições investigadas (pH 2, 5 e 7,5 e 1000 ppm e 5000 ppm F total) são mostradas na Figura 9.

- a pH 7,5 e 5, F^- é de longe a espécie predominante independentemente da concentração de fluoretos total (na faixa investigada) mas a pH 5, a soma das concentrações de HF e HF_2^- não é desprezível e chega a 15 ppm e 220 ppm nas soluções contendo 1000 e 5000 ppm de fluoretos total, respectivamente.
- a pH 2, HF é a espécie predominante tanto na solução contendo 1000 ppm fluoretos como 5000 ppm, com concentração de 840 e 3400 ppm, respectivamente. Neste pH, a concentração de HF_2^- é de 86 e 1372 ppm, respectivamente.

Assim, em soluções de pH2 e pH5 contendo fluoretos, pode se atribuir o estado ativo do Ti à dissolução do filme de TiO_2 pelas espécies HF e HF_2^-. Foi proposta a formação das espécies solúveis, $TiHF_6^-$, $Ti(OH)_2F^+$ e TiF_4 [23].

Considerando a formação de $TiHF_6^-$, as reações de dissolução de TiO_2 seriam:

$TiO_2 + 6HF \rightarrow TiHF_6^- + 2H_2O + H^+$

$TiO_2 + 3\ HF_2^- + 2H^+ \rightarrow TiHF_6^- + 2H_2O$

Como as ligas Ti-Ta permanecem passivas nestas mesmas soluções, pode se deduzir que os filmes passivadores sobre as ligas Ti-Ta constituídos dos óxidos TiO_2 e Ta_2O_5 [16] são mais resistentes ao ataque do que os filmes formados unicamente de TiO_2.

Conclusões

O estudo do comportamento eletroquímico do Ti-cp e das ligas Ti-xTa (x=20, 40, 60 e 80 % em massa) em soluções de Ringer de vários pH e concentrações de íons fluoretos mostrou que:

- O Ti-cp é passivo em solução de Ringer de pH natural (pH7,5) em ausência de fluoretos;
- As ligas Ti-Ta são passivas em solução de Ringer de pH natural (pH7,5) em ausência de fluoretos, de pH 5 contendo 1000 e 5000 ppm de fluoretos e de pH2 sem fluoretos e contendo 1000 e 5000 ppm de fluoretos;
- O Ti-cp é ativo em solução de Ringer de pH2 e pH5 contendo 1000 e 5000 ppm de fluoretos;
- A depassivação do Ti nas soluções contendo fluoretos está relacionada com a presença de HF e HF_2^- que conduzem à dissolução do filme passivador de TiO_2 e provavelmente à formação de fluorcomplexos de titânio solúveis;
- A diminuição do pH e o aumento da concentração de fluoretos, individualmente, reduz a resistência à corrosão dos materiais, mas o efeito combinado do baixo pH e da presença de fluoretos é muito mais significativo na redução da resistência à corrosão;
- O aumento do teor de tântalo nas ligas aumenta a resistência à corrosão.

Referências bibliográficas

[1] STRANG, R. et al. Dental materials: 1996 literature review Part 1. **Journal of Dentistry**, v.26, p.191-207, 1998.
[2] STRANG, R. et al. Dental materials: 1996 literature review Part 2. **Journal of Dentistry**, v.26, p.273-291, 1998.
[3] JONES, F. H. Teeth and bones: applications of surface science to dental materials and related biomaterials. **Surface Science Reports**, v. 42, p.75-205, 2001.
[4] GIOKA, C.; BOURAUEL, C.; ZINELIS, S.; ELIADES, T.; SILIKAS, N.; ELIADES, G. Titanium orthodontic brackets: structure, composition, hardness and ionic release. **Dental Materials**, v. 20, p.693-700, 2004.
[5] ASM- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. HANDBOOK. **Corrosion**. Ohio: Materials Park. 1992. v.13. 1415 p.
[6] TOUMELIN-CHEMLA, F.; ROUELLE, F.; BURDAIRON, G. Corrosive properties of fluoride-containing odontologic gels against titanium. **Journal of Dentistry**, v. 24, p.109-115, 1996.
[7] NAKAGAWA, M.; MATSUYA, S.; SHIRAISHI, T.; OHTA, M. Effect of fluoride concentration and pH on corrosion behavior of titanium for dental use. **Journal of Dental Research**, v. 78, p.1568-1572, 1999.
[8] NAKAGAWA, M.; MATSUYA, S.; UDOH, K. Effects of fluoride and dissolved oxygen concentrations on the corrosion behavior of pure titanium and titanium alloys. **Dental Materials Journal**, v. 21, p.83-92, 2002.
[9] MELE, M. F. L.; CORTIZO, M. C. Electrochemical behaviour of titanium in fluoride-containing saliva. **Journal of Applied Eletrochemistry**, v. 30, p.95-100, 2000.
[10] SCHIFF, N.; GROSGOGEAT, B.; LISSAC, M.; DALARD, F. Influence of fluorinated mouthwashes on corrosion resistance of orthodontics wires. **Biomaterials**, v.5, p.1995-2002, 2002
[11] AL-MAYOUF, A. M.; AL-SWAYIH, A. A.; AL-MOBARAK, N. A.; AL-JABAB, A. S. Corrosion behavior of a new titanium Alloy for dental implant applications in fluoride media. **Material Chemistry and Physics**, v. 86, p. 320-329, 2004.
[12] BOERE, G. Influence of fluoride on titanium in an acidic environment measured by polarization resistance technique. **Journal of Applied Biomaterials**, v. 6, p. 283-288, 1995.
[13] ODA, Y.; KAWADA, E.; YOSHINARI, M.; HASEGAWA, K.; OKABE, T. The influence of fluoride concentration on the corrosion of titanium and titanium alloys. **Journal of the Japanese Society for Dental Materials and Devices**, v. 15, p. 317-322, 1996.
[14] KURODA, D.; NIINOMI, M.; MORINAGA, M.; KATO, Y.; YASHIRO, T. Design and mechanical properties of new beta type titanium alloys for implant materials. **Materials Science and Engineering A**, v. 243, p. 244-249, 1998.
[15] TRILLO, E. A.; ORTIZ, C.; DICKERSON, P.; VILLA, R.; STAFFORD, S. W.; MURR, L. E. Evaluation of mechanical and corrosion biocompatibility of TiTa alloys. **Journal of Materials Science- Materials in Medicine**, v. 12, p. 283-292, 2001.
[16] ZHOU, Y. L.; NIINOMI, M.; AKAHORI, T.; FUKUI, H.; TODA, H. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloys for biomedical applications. **Materials Science and Engineering A**, v. 398, p. 28-36, 2005.
[17] ROBIN, A.; MEIRELIS, J. P., Influence of fluoride concentration and pH on corrosion behavior of Ti-6Al-4V and Ti-23Ta alloys in artificial saliva. **Materials and Corrosion**, v. 58, p. 173-180, 2007.

[18] ROBIN, A.; MEIRELIS, J. P., EIS study of Ti-23Ta alloy in artificial saliva. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 44, p. 352-357, 2009.
[19] MARECI, D.; CHELARIU, R.; GORDIN, D-M.; UNGUREANU, G.; GLORIANT, T. Comparative corrosion study of Ti-Ta alloys for dental applications. **Acta Biomaterialia**, v. 5, p. 3625-3639, 2009.
[20] SOUZA, K. A.; ROBIN, A. Preparation and characterization of Ti-Ta alloys for applications in corrosive media. **Materials Letters**, v. 57, p. 3010-3016, 2003.
[21] POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Oxford: Pergamon Press, 1966. p.217, p. 253.
[22] CATARRIN, S.; Frateur, I.; Musiani, M.; Tribollet, B. Electrodissolution of p-Si in acidic fluoride media. Modeling of the steady state. **Journal of the Electrochemical Society**, v.147, p. 3277-3282, 2000.
[23] FOVET, Y.; GAL, J-Y.; TOUMELIN-CHEMLA, F. Influence of pH and fluoride concentration on titanium passive layer: stability of titanium dioxide. **Talanta**, v. 53, p. 1053-1063, 2001.

Tabela 1- Condições pH/concentração de fluoretos investigadas (x).

[F] ppm	pH2	pH5	pH7,5
0	x	o	x
1000	x	x	o
5000	x	x	o

(o)- condições não investigadas

Tabela 2- OCP (em V/ECS) do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer com diferentes pH e teores de fluoretos.

	Ti	Ti-20Ta	Ti-40Ta	Ti-60Ta	Ti-80Ta
pH 7,5 – 0 ppm F	-0,039	-0,071	0,058	-0,115	0,021
pH 5 – 1000 ppmF	-1,095	-0,195	0,048	-0,061	0,035
pH 5 – 5000 ppmF	-0,910	-0,352	0,045	-0,071	0,002
pH 2 – 0 ppmF	0,177	0,006	0,068	0,103	0,040
pH 2 – 1000 ppmF	-0,866	-0,113	0,063	0,104	0,120
pH 2 – 5000 ppmF	-0,888	-0,054	0,039	0,203	0,008

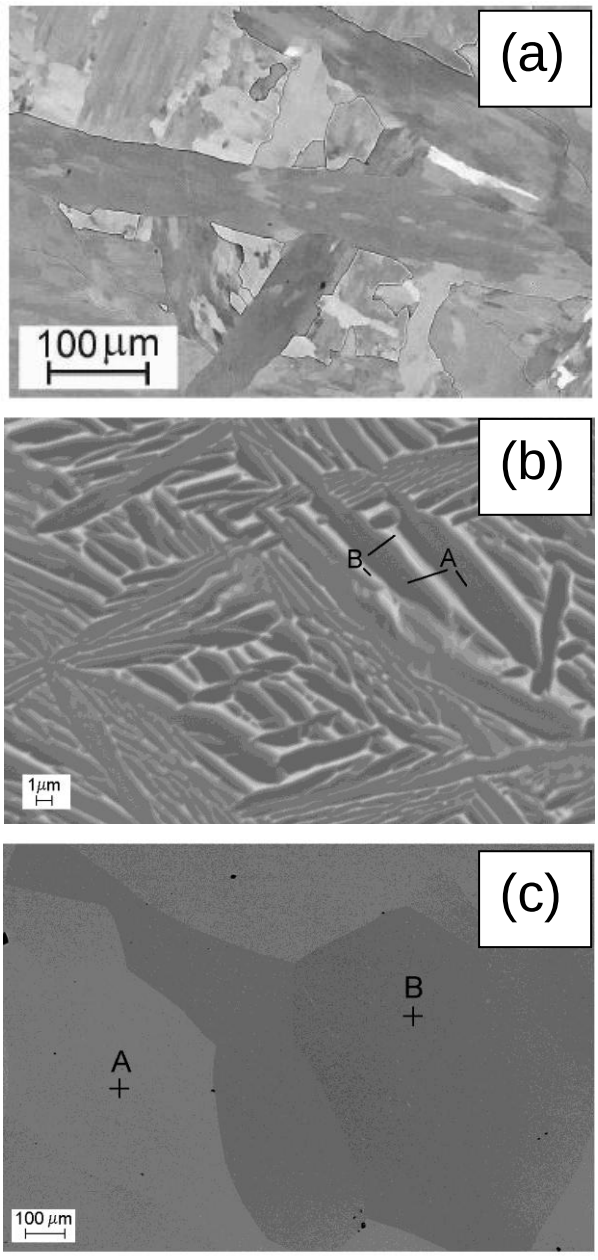

Figura 1- (a) Microestrutura serrilhada de grãos da fase α típica do Ti-cp bruto de fusão; (b) Microestrutura da liga Ti-20Ta (região A: fase α ; região B; fase β); (c) Microestrutura da liga Ti-60Ta (regiões A e B: fase β; a diferença de contraste entre as regiões A e B é devida à orientação diferente dos grãos).

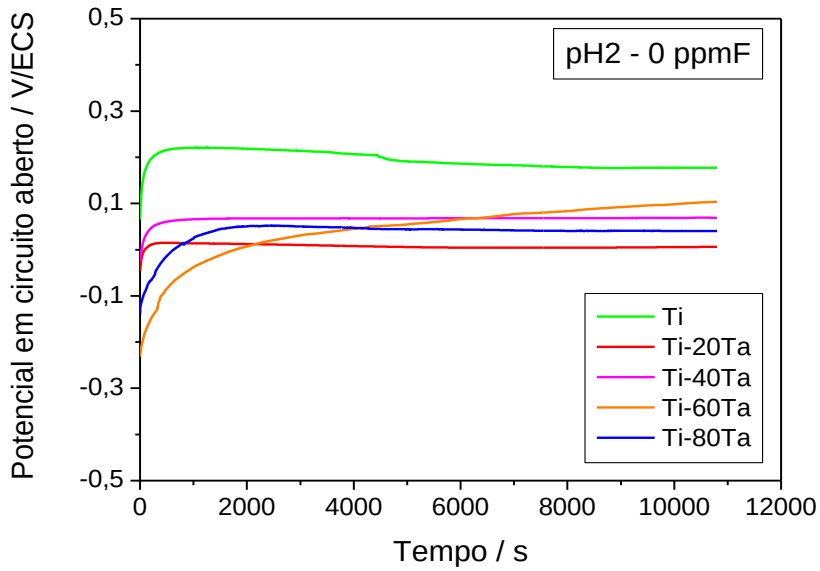

Figura 2- Variação do OCP do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer de pH2 sem adição de fluoretos.

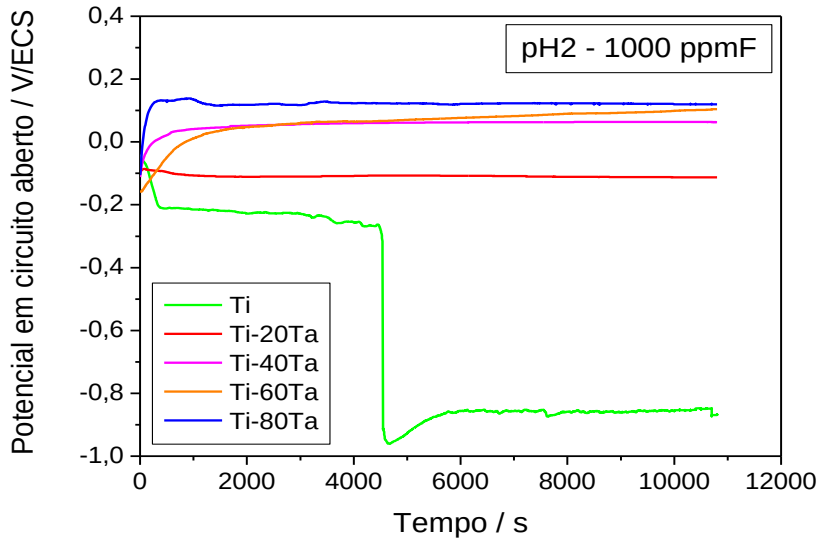

Figura 3- Variação do OCP do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer de pH2 contendo 1000 ppm de fluoretos.

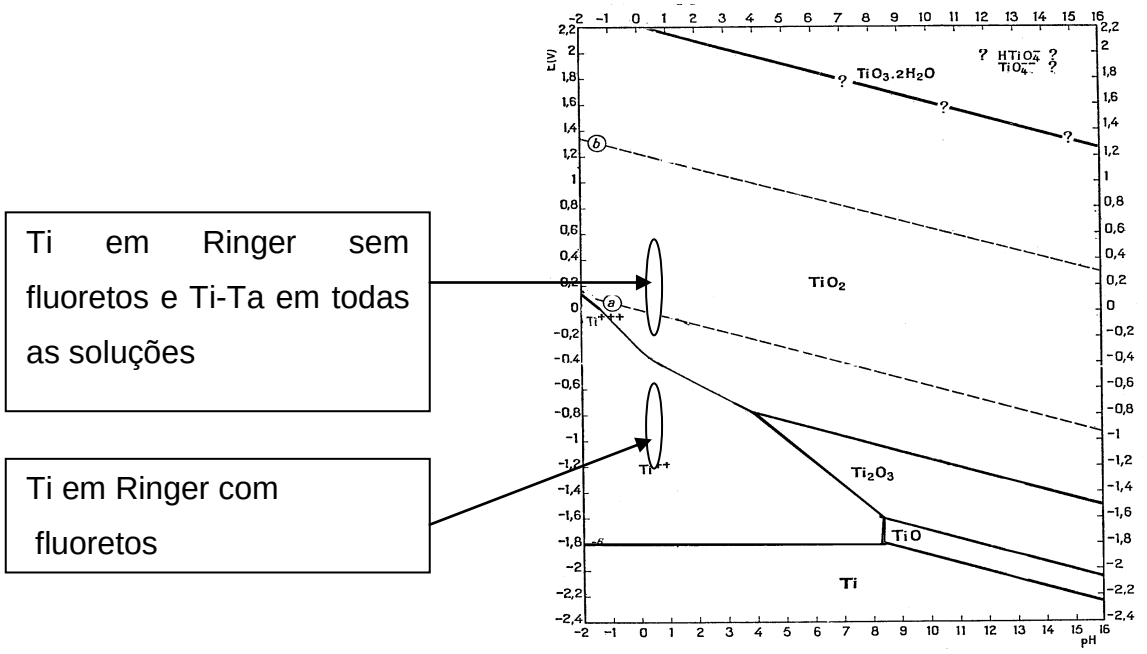

Figura 4- Posições dos OCP e diagrama de Pourbaix do sistema Ti-H_2O [21].

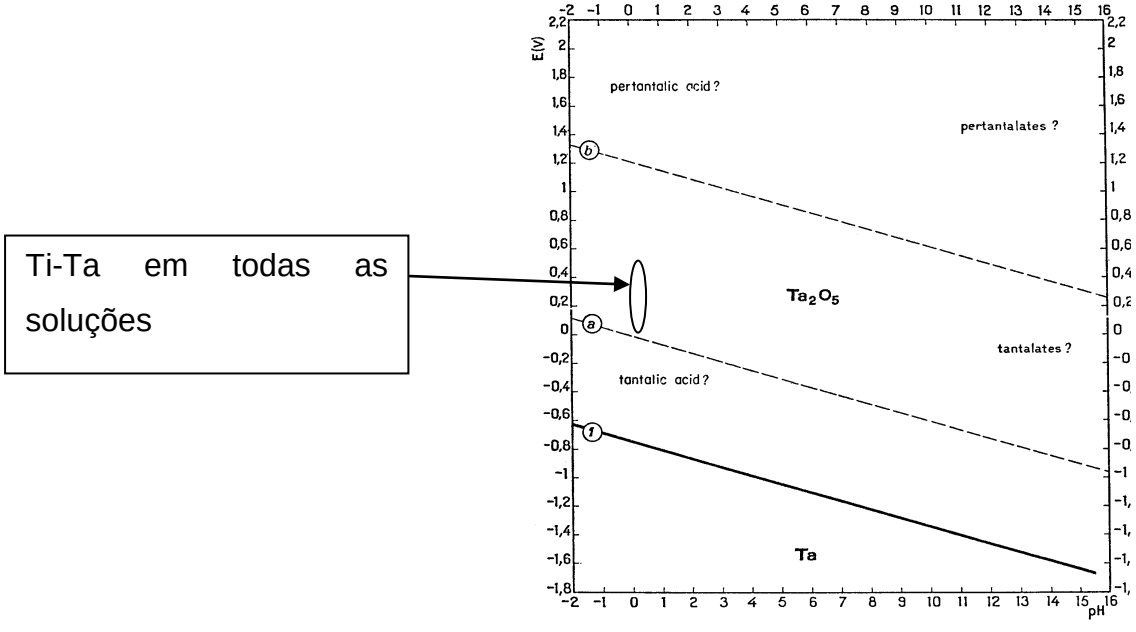

Figura 5- Posições dos OCP e diagrama de Pourbaix do sistema Ta-H_2O [21].

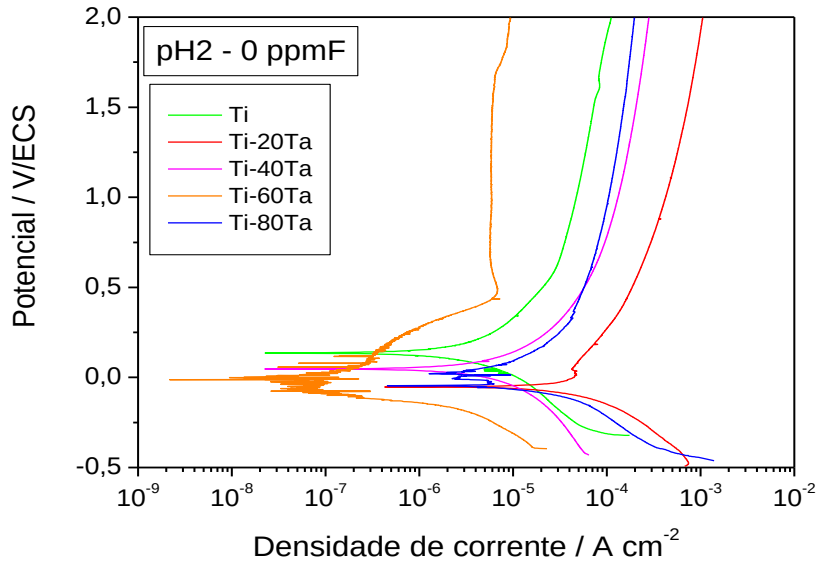

Figura 6- Curvas de polarização do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer de pH2 sem adição de fluoretos.

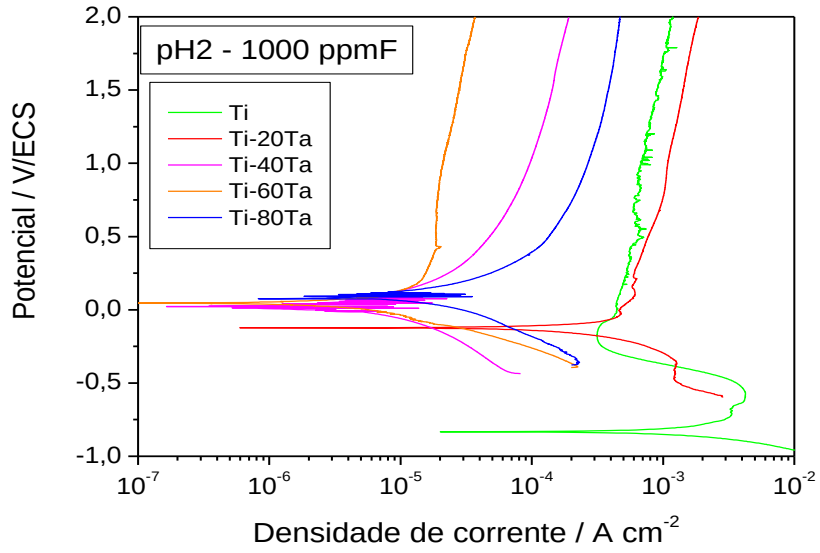

Figura 7- Curvas de polarização do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer de pH2 contendo 1000 ppm de fluoretos.

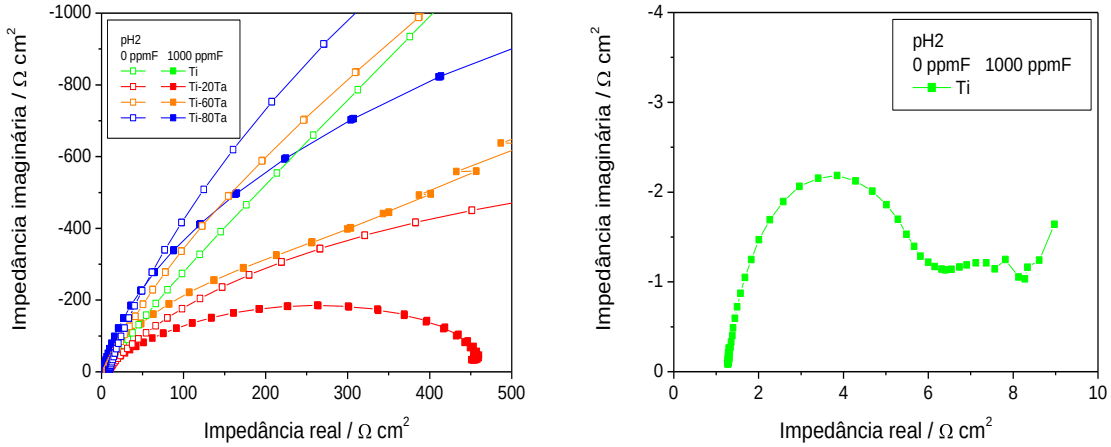

Figura 8- Diagramas de Nyquist do Ti e das ligas Ti-Ta em solução de Ringer de pH2 sem fluoretos e contendo 1000 ppm de fluoretos.

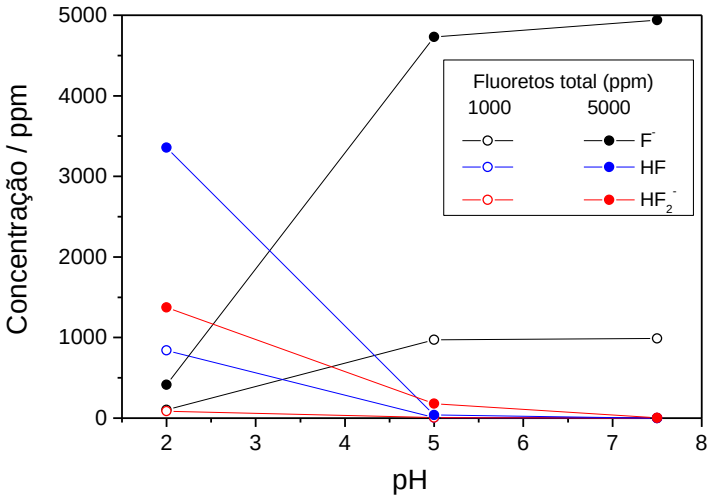

Figura 9- Concentrações de F^-, HF e HF_2^- em função do pH e do teor de fluoreto total.