

# **IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA DE MATERIAIS AVANÇADOS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Vinícius Martins Meireles (UNIVAP – Universidade do Vale do Paraíba, Bolsista PIBIC/CNPq)

viniciusmeireles@gmail.com

Dr. Bruno Bacci Fernandes (LAP/INPE, Orientador)

brunobacci@yahoo.com.br

## **COLABORADORES**

Dr. Rogério Moraes Oliveira (LAP/INPE, Colaborador, rogerio@plasma.inpe.br)

Dr. Mario Ueda (LAP/INPE, Colaborador, ueda@plasma.inpe.br)

Prof. Dr. Alfeu Saraiva Ramos (UNIFAL, Colaborador, alfeu\_ramos@hotmail.com)

Julho de 2015

# **IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA DE MATERIAIS AVANÇADOS**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)

Vinícius Martins Meireles (UNIVAP – Universidade do Vale do Paraíba, Bolsista PIBIC/CNPq)

viniciusmeireles@gmail.com

Dr. Bruno Bacci Fernandes (LAP/INPE, Orientador)

brunobacci@yahoo.com.br

## **COLABORADORES**

Dr. Rogério Moraes Oliveira (LAP/INPE, Colaborador, rogerio@plasma.inpe.br)

Dr. Mario Ueda (LAP/INPE, Colaborador, ueda@plasma.inpe.br)

Prof. Dr. Alfeu Saraiva Ramos (UNIFAL, Colaborador, alfeu\_ramos@hotmail.com)

Julho de 2015

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador Dr. Bruno Bacci Fernandes, por todo conhecimento, sua didática para me auxiliar na compressão dos estudos desenvolvidos e toda a força positiva na qual me inspirou a seguir o caminho de pesquisa. Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de participar de um projeto de iniciação científica, sendo esta uma das primeiras etapas de um futuro profissional cada vez mais promissor. Agradeço também à Carla da Silva, atual aluna de mestrado do INPE, por ter me apresentado o que é de fato estar envolvido em pesquisa, demonstrando com grande orgulho o trabalho no qual ela desenvolveu e despertou o meu interesse pela área.

Agradeço aos que fazem do grupo do Laboratório Associado de Plasmas (LAP) por todo o suporte e atenção ao longo da trajetória do projeto, principalmente ao chefe de laboratório Dr. Mário Ueda, ao Dr. Rogério de Moraes Oliveira pela implantação iônica por imersão em plasma, ao grupo do ITA e CTA, por disponibilizarem aparelhos para os testes de tração e análises em MEV.

Agradeço a minha família e amigos por estarem me apoiando e me aconselhando desde sempre nas escolhas que faço, sendo isto de grande valia para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.



## SUMÁRIO

### Conteúdo

<b>RESUMO</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>1.1. OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Ti-Si-B</b>	<b>6</b>
<b>3.2 Ti-6Al-4V</b>	<b>8</b>
<b>3.3 AL7075</b>	<b>10</b>
<b>4. CONCLUSÕES</b>	<b>13</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>13</b>

## Lista de figuras

Figura 3.1.1 – Análise de <i>EDS</i> da liga Ti-18Si-6B não tratada (a) área rugosa e (b) área de grãos soltos.	6,7
Figura 3.1.2 – Fratografia da amostra de Ti-18Si-6B e suas regiões de interesse, com ampliação à 100x.	7
Figura 3.1.3 – Análise superficial das amostras de Ti-5,5Si-20,5B (a) antes do tratamento por 3IP e (b) após o tratamento.	8
Figura 3.2.1 - Ensaio de tribologia das ligas Ti-6Al-4V.	9
Figura 3.2.2 - Curvas Potenciodinâmicas das ligas de Ti-6Al-4V.	9
Figura 3.3.1 - Curvas Potenciodinâmicas das ligas de AL7075.	10
Figura 3.3.2 – Testes de tração realizados em ligas de AL7075.	11
Figura 3.3.3 – Fratografias das amostras de AL7075 fraturadas obtidas com ampliações à 75x (a) não tratada e (b) tratada por 3IP.	11
Figura 3.3.4 – Fratografias das amostras de AL7075 fraturadas obtidas com ampliações à 500x (a) não tratada e (b) tratada por 3IP.	12
Figura 3.3.5 – Difratoograma de raios X (DRX) para as amostras de AL7075.	12

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros utilizados para implantação iônica por imersão em plasma nas ligas de Al 7075.	5
--	---

## RESUMO

Ligas de titânio, alumínio e aço inoxidável são excelentes materiais utilizados em aplicações industriais que exigem elevada resistência à corrosão e às tensões mecânicas. No entanto, possuem suas limitações e, a fim de ampliar sua durabilidade, o presente estudo descreve o tratamento de ligas de titânio e alumínio através da implantação iônica por imersão em plasma e também o método de sinterização por plasma para as ligas de Ti-Si-B. Análises de *EDS (Electron Dispersive Spectroscopy)* foram realizadas para a quantificação química das ligas sinterizadas, visto que possuem uma superfície heterogênea e com elevada porosidade. Ligas de Ti-6Al-4V foram submetidas à testes de tribologia e corrosão, sendo possível observar que as ligas tratadas por 3IP possuem maior resistência ao atrito e corrosão. Testes de corrosão também foram realizados com amostras de alumínio AL7075, com e sem tratamento, porém é observado que as ligas de Ti-6Al-4V possuem maior resistência à corrosão. Além disso, as ligas AL7075 foram submetidas à testes de tração, sendo observado que o tratamento por 3IP não evidencia uma melhoria na resistência à fratura, no entanto, ligas tratadas se tornaram mais dúcteis de acordo com imagens obtidas por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Análises por difração de raios X (DRX) indicam que as fases presentes antes e após o tratamento são semelhantes.

**Palavras-Chave:** *implantação iônica por imersão em plasma, corrosão, teste de tribologia, resistência à tração.*



## PLASMA IMMERSION ION IMPLANTATION IN ADVANCED MATERIALS

### ABSTRACT

Titanium, aluminum and stainless steel alloys are excellent materials to be used in industrial applications that require high corrosion resistance and mechanical strength. However, these alloys have their limitations and in order to increase its durability, this paper describes by now the treatment of titanium and aluminum alloys by immersion ion implantation in plasma and also the plasma sintering of Ti-Si-B alloy. EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) analyzes were performed for the chemical quantification of the sintered alloy, that shows a heterogeneous surface and high porosity. Ti-6Al-4V alloys were subjected to tribological and corrosion tests, which make possible to verify that the alloy treated by PIII has greater wear and corrosion resistance than the untreated one. Corrosion analyzes were also applied in AL7075 alloy that also presented an improvement after PIII, however less significant than the Ti-6Al-4V. Furthermore, AL7075 alloys were subjected to tensile tests, which showed no improvement neither worsening in mechanical strength. In the other hand, treated alloys become more ductile according to images obtained by SEM (Scanning Electron Microscopy). X-ray diffraction (XRD) analysis shows that the phases before and after treatment are similar in both cases.

**Keywords:** *Plasma immersion ion implantation, corrosion, tribology tests, tensile strength.*

## 1 - INTRODUÇÃO

Materiais avançados, tais como as ligas de titânio, alumínio e aço inoxidável, são extensivamente utilizadas em diversas aplicações industriais (automotivas, aeroespaciais, biomédicas, equipamentos de esportes e entre outros) as quais exigem elevada resistência mecânica, à corrosão e oxidação. As ligas de titânio são uma das mais importantes utilizadas na engenharia, pois possuem baixa densidade, alto ponto de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica e são altamente resistentes à corrosão e à fadiga [1-3]. Apesar das vantagens citadas anteriormente, essas ligas possuem baixa resistência ao desgaste e alto coeficiente de atrito, limitando seu uso em certas áreas, principalmente em aplicações biomédicas [4].

Para superar tais limitações, o tratamento térmico para materiais metálicos é um processo fundamental. Titânio e suas ligas são tratadas em altas temperaturas para alcançar diferentes propriedades, tais como maior resistência à fratura e fadiga, e conseqüentemente, produzir uma combinação ideal de ductilidade, usinabilidade e estabilidade estrutural [2]. Dentre os tratamentos térmicos, a implantação iônica por imersão em plasma (3IP) é o método mais eficiente conhecido desde então. É um tratamento que tem como principal função, a modificação superficial de peças de geometrias complexas, consistindo no bombardeamento das amostras por íons em uma câmara de vácuo, onde se produz o plasma que contém os íons, que podem ser implantados em amostras submetidas a diferentes temperaturas. A amostra é pulsada à altas voltagens negativas (2 – 300 kV), a fim de atrair os íons positivos para a superfície [5].

Estudos realizados até o presente momento, basearam-se em testes de tração, tribologia, corrosão e oxidação, determinando o desgaste das ligas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)/ espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e analisando sua estrutura e morfologia através de difração de raios-X (DRX). Através disso, é comprovado que o material adquire um aumento na resistência à corrosão, desgaste e dureza quando submetidos ao tratamento por 3IP [6]. Nas ligas de Ti-6Al-4V, notou-se que o aumento na espessura das camadas de nitreto está intimamente relacionado com o aumento em sua dureza e resistência à tração, identificando através de DRX as fases titânio  $\alpha$ , Ti $\beta$ , TiN e Ti<sub>2</sub>N, presentes em diferentes intensidades, antes e após o tratamento superficial por 3IP, sendo que as fases de nitretos foram identificadas após o tratamento [7]. Em ligas de Ti-Si-B, foram identificadas as fases titânio  $\alpha$ , Ti<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>B, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, TiB e Ti<sub>3</sub>Si, demonstrando que o tratamento por 3IP realizado à altas temperaturas é eficiente para reduzir o desgaste e o coeficiente de fricção. A liga Ti-7,5Si-22,5B apresenta menores taxas de desgastes sem tratamento entre as ligas de Ti-Si-B, porém

tratadas, todas as ligas apresentam similares reduções na taxa de desgaste, independente de sua composição estrutural [8].

Nos testes realizados com a liga Ti-6Al-4V, a relação entre tensão e deformação, durante os ensaios de tração até a sua total ruptura, evidenciam que a estrutura do material modifica seu comportamento mecânico, conseqüentemente, diferentes valores de intensidade na deformação plástica das ligas são aparentes, mas ainda não há relações exatas que comprovem a eficiência do tratamento. Por meio da MEV é possível visualizar que as fractografias apresentam diferentes tipos de fraturas ao longo de sua microestrutura devido à presença de defeitos, discordâncias e porosidades, sendo estes aspectos mais propensos em regiões próximas à borda das ligas. Por fim, o cisalhamento é mais intenso em regiões próximas à superfície, enquanto a formação de *dimples* é notável com maior intensidade em regiões próximas ao centro das ligas rompidas [7].

## 1.1 - OBJETIVO

O presente trabalho visa caracterizar as propriedades das ligas de Ti-6Al-4V, Ti-Si-B e alumínio (AL7075) através de testes de tração, corrosão e desgaste do material. Através destes testes, almeja-se a comparação de tais propriedades entre as ligas não-tratadas e tratadas superficialmente por implantação iônica por imersão em plasma (3IP) de nitrogênio, a fim de expandir a utilização destas ligas para outras aplicações diferentes das atuais.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Pós comerciais de Ti, Si e B foram utilizados para a preparação das ligas a partir da composição inicial Ti-18Si-6B (%-at.). O processo de moagem foi realizado em um moinho planetário Fritsch sob atmosfera de argônio, evitando assim contaminação atmosférica e ignição espontânea. Os vasos e as esferas utilizadas foram de aço inoxidável, a velocidade de rotação de 300 RPM e a relação de massa esferas/pós de 10:1. Os pós foram moídos por 1 hora em meio seco, e os pós que ficaram aderidos aos meios de moagem após o período de moagem foram recuperados através de moagens consecutivas de 15 minutos em álcool isopropílico. As soluções resultantes foram filtradas em filtro de papel e os pós foram secos com uma lâmpada incandescente [9].

Os pós foram compactados por prensagem uniaxial durante 2 minutos a 110 MPa, por prensagem isostática a 300 MPa. As duas operações foram realizadas em temperatura ambiente e as peças verdes foram sinterizadas em câmara de plasma sob atmosfera de argônio, em temperaturas de 1100°C. As peças sinterizadas tem diâmetro de 5 mm e altura de 12 mm. As amostras foram polidas com lixa de SiC e posteriormente com panos contendo suspensão de sílica coloidal [9].

As ligas de Al 7075 foram cortadas com dimensões de 15mm de diâmetro e 3mm de espessura, sendo lixadas e polidas para a obtenção de uma superfície espelhada com poucos riscos. As amostras foram limpas em banho de ultrassom para o tratamento subsequente de plasma. A implantação iônica por imersão em plasma (3IP) é descrita com mais detalhes no relatório anterior [7]. Os parâmetros de tratamento são listados na tabela abaixo:

Fonte CC		Filamento CA		Pulsos (kV;µs;Hz)	Tempo (min.)	Temperatura (°C)
Tensão(V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)			
150	0,75	9-10	5-8	30;5;50	60	200

Tabela 2.1 – Parâmetros utilizados para implantação iônica por imersão em plasma nas ligas de AL7075.

Medições através de difração de raios x (DRX) foram obtidas por um difratômetro Philips (modelo PW3719) no modo padrão de  $2\theta$  (voltagem à 40 kV e corrente à 45 mA). Os ensaios de tração das peças foram realizados no equipamento Instron 8501, com capacidade de carga de 100kN. Para os ensaios de tração, foi utilizado um corpo-de-prova plano com uma seção útil de aproximadamente 2x2x4 mm. Os ensaios foram realizados a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min (ou velocidade de deformação de aproximadamente  $0,002 \text{ s}^{-1}$ ) até a total ruptura das ligas. A fim de se obter detalhes da estrutura das peças tratadas e não tratadas por 3IP, caracterizou-se as mesmas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), sob a medida de elétrons secundários, gerando imagens de suas fotografias.

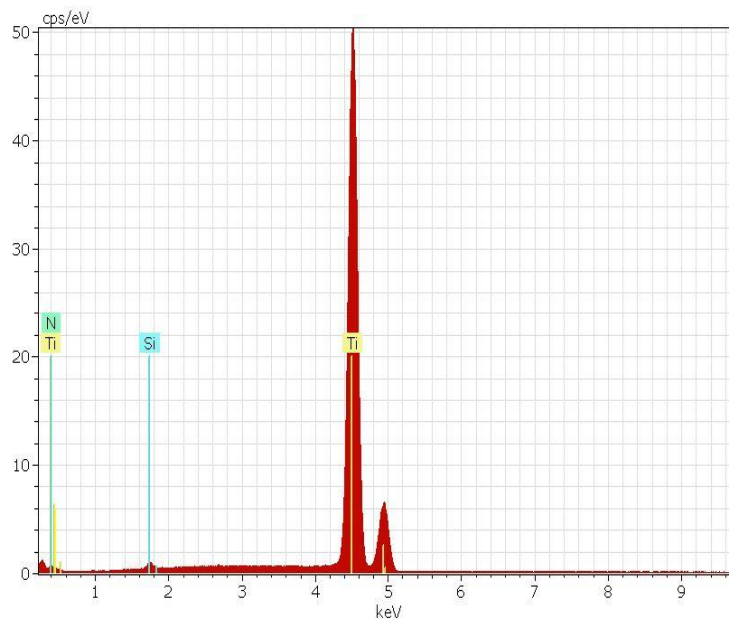
A resistência à corrosão das ligas foi testada em solução de NaCl 3,5% (em massa), com pH = 6. Os testes foram realizados através da utilização do equipamento Autolab

PGSTAT302N. Foi utilizada uma célula eletrolítica convencional com três eletrodos, um eletrodo de referência de Ag/AgCl, e um fio de platina como contra-eletrodo. A tensão variou de -1,0 a 1,5 V com taxa de varredura de 1,0 mV/s. Ensaios de desgaste foram realizados em um tribômetro do tipo *pin-on-disc*.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

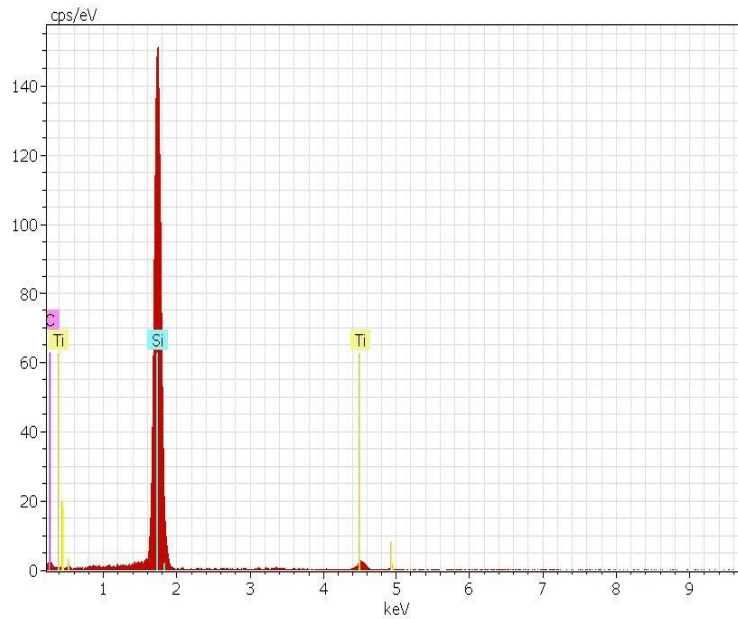
#### 3.1 – Ti-Si-B

Utilizando espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS), foi possível quantificar os elementos químicos das ligas de Ti-18Si-6B. Através das imagens é possível observar que em áreas mais rugosas, há a presença majoritária de titânio e nas regiões de grãos soltos destaca-se a presença de silício. A presença de nitrogênio ainda não tem explicação plausível, visto que a sinterização em plasma foi realizada com argônio.



(a)

Figura 3.1.1 – Análise de EDS da liga Ti-18Si-6B não tratada (a) área rugosa e (b) área de grãos soltos.



(b)

Figura 3.1.1 – Análise de EDS da liga Ti-18Si-6B não tratada (a) área rugosa e (b) área de grãos soltos.

A superfície das ligas apresenta grande porosidade, visto que o processo de sinterização por plasma foi realizada em temperatura e tempo de moagem diferentes das testadas desde então no presente estudo. Imagens obtidas por MEV demonstram as regiões de interesse para a análise de EDS:

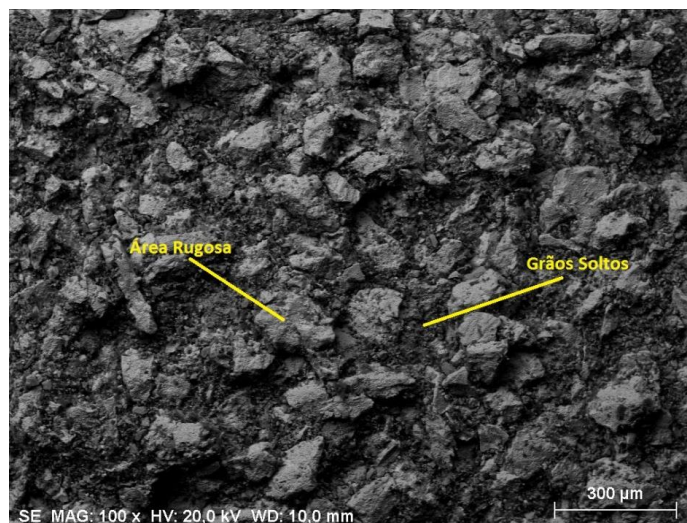


Figura 3.1.2 – Fratografia da amostra de Ti-18Si-6B e suas regiões de interesse, com ampliação à 100x.

Em estudos anteriores, comprovou-se que as ligas de Ti-Si-B possuem menor penetração dos íons de nitrogênio, provenientes da implantação superficial, quando comparadas com as ligas de Ti-6Al-4V, devido à maior quantidade da fase TiB presente na liga [9]. No entanto, é interessante observar que através de MEV, utilizando elétrons secundários, ainda há um aumento nítido na rugosidade da superfície das ligas de Ti-Si-B, após o tratamento.

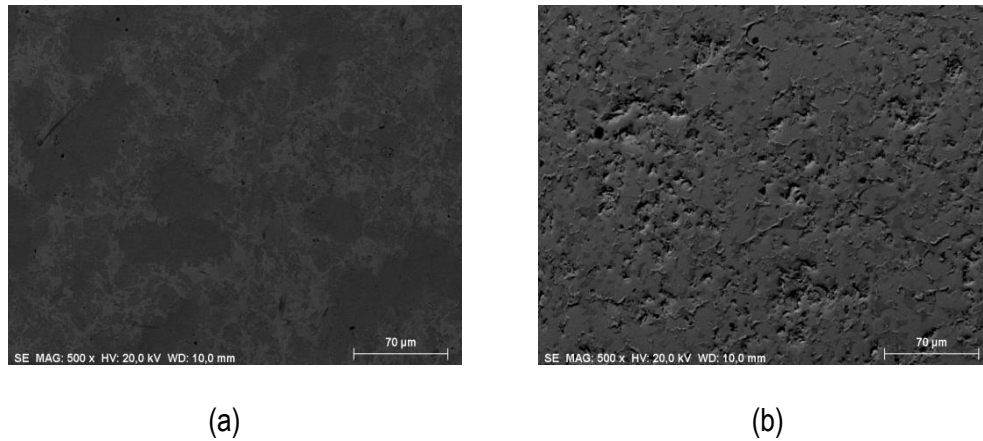


Figura 3.1.3 – Análise superficial das amostras de Ti-5,5Si-20,5B (a) antes do tratamento por 3IP e (b) após o tratamento.

### 3.2 – Ti-6Al-4V

O tratamento por 3IP garantiu às ligas de Ti-6Al-4V significativa redução no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste. As amostras apresentaram diferentes valores nos ensaios de tribologia, devido à distância de cada amostra a partir do emissor de elétrons durante a implantação.

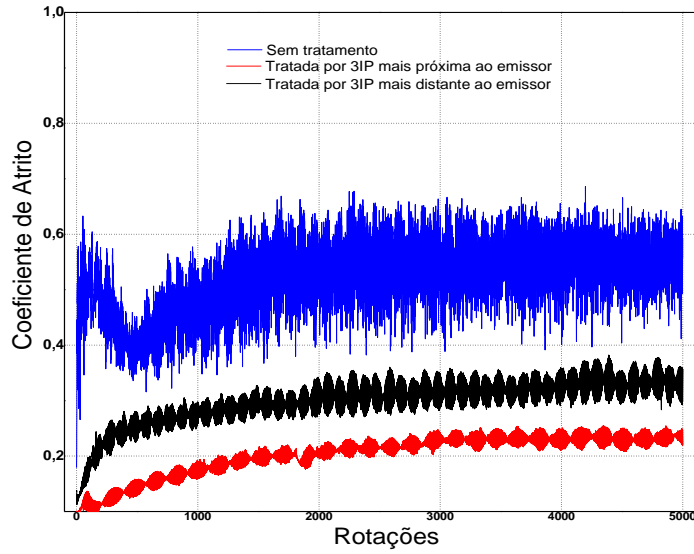


Figura 3.2.1 - Ensaio de tribologia das ligas Ti-6Al-4V.

Submetidas a testes de corrosão, as ligas Ti-6Al-4V tratadas por 3IP, demonstraram um deslocamento de potencial para valores mais positivos e diminuição em grande parte da região anódica, indicando que a camada de nitreto, proveniente do tratamento, garantiu maior resistência a corrosão, de acordo com as curvas potenciodinâmicas abaixo:

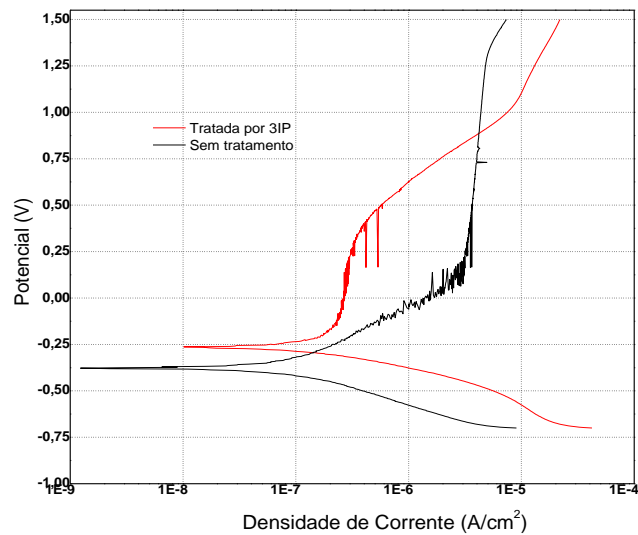


Figura 3.2.2 - Curvas Potenciodinâmicas das ligas de Ti-6Al-4V.



### 3.3 – AL7075

As amostras de alumínio AL7075 também foram submetidas a testes de corrosão, apresentando melhorias na resistência à corrosão após o tratamento por 3IP, tendo deslocamento de potencial para valores mais positivos com menores diferenças quando comparadas com as ligas de Ti-6Al-4V.

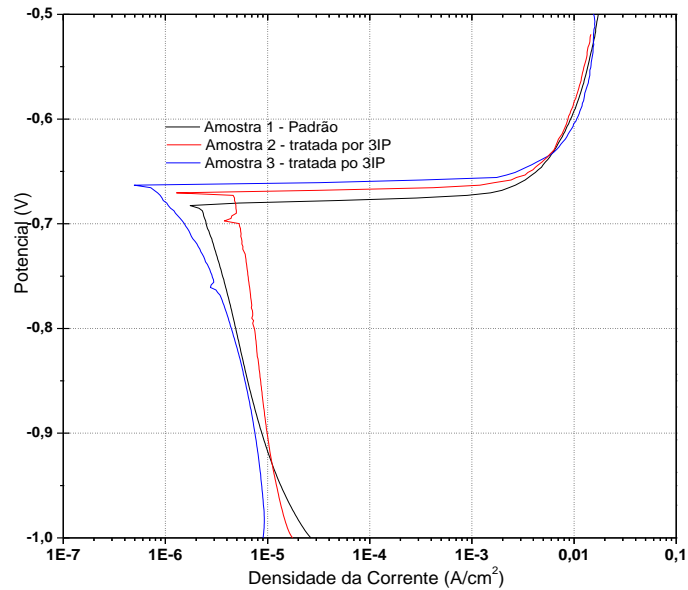


Figura 3.3.1 - Curvas Potenciodinâmicas das ligas de AL7075.

As mesmas ligas foram também submetidas a testes de tração, demonstrando que o tratamento por 3IP não melhora de fato a resistência mecânica das amostras (assim como foi observado em ligas de Ti-6Al-4V como descrito no relatório parcial [7]). No entanto, é interessante observar que após o tratamento de uma das ligas (AL2PIII), a tenacidade da mesma é maior, mesmo que tenha resistido à tensões menores.

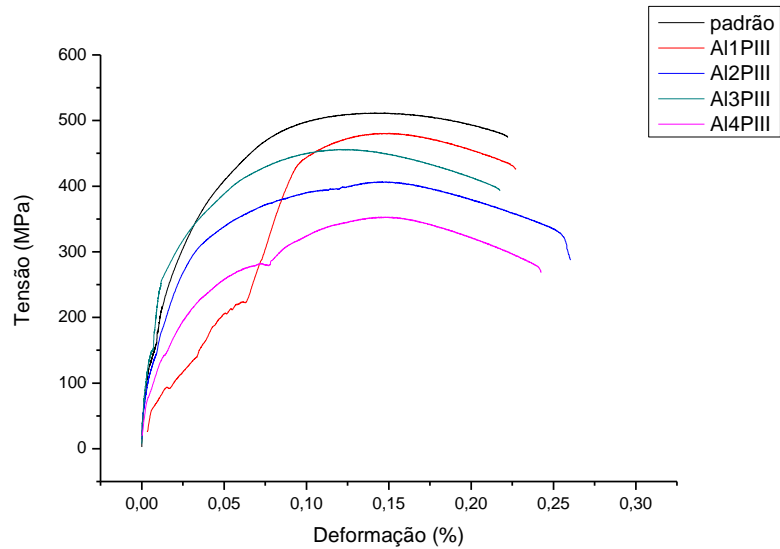


Figura 3.3.2 – Testes de tração realizados em ligas de AL7075.

Análises obtidas por MEV demonstram que o tratamento por 3IP nas ligas de alumínio influencia na mudança de comportamento à tração, mesmo que isso não corresponda a melhores resultados, vindo que ao longo da superfície rompida das ligas, com e sem tratamento, é observado que a ruptura segue um padrão diferente. Na liga sem tratamento, a superfície indica menor resistência ao cisalhamento, rompendo de forma agressiva, enquanto na liga com tratamento, indica maior escoamento, conseqüentemente, maior deformação. A compreensão dos detalhes relacionados à tração é um aspecto que necessita ser explorado com mais detalhes posteriormente.

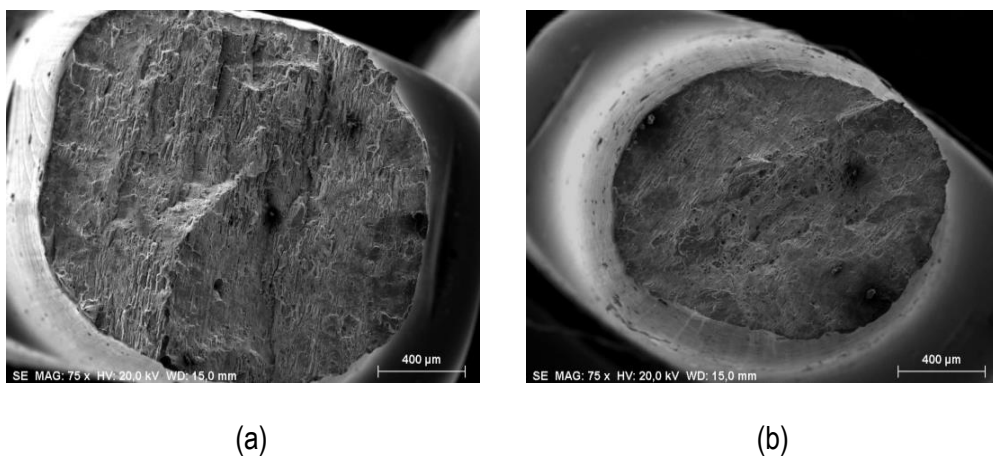


Figura 3.3.3 – Fratografias das amostras de AL7075 fraturadas obtidas com ampliações à 75x (a) não tratada e (b) tratada por 3IP.

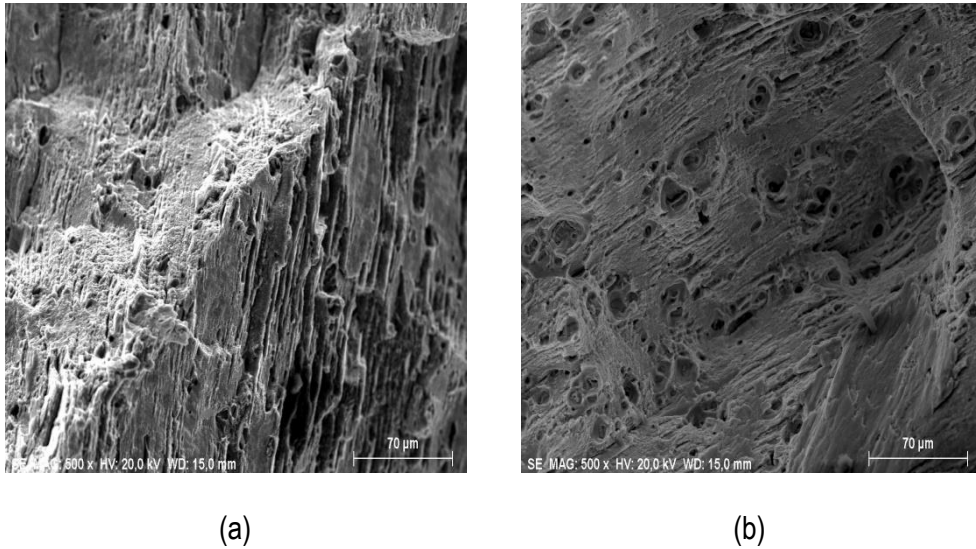


Figura 3.3.4 – Fratografias das amostras de AL7075 fraturadas obtidas com ampliações à 500x (a) não tratada e (b) tratada por 3IP.

Após serem submetidas à testes de tração, as ligas de alumínio (AL7075) foram analisadas por um difratograma de raios X(DRX), demonstrando que não há relação exata que comprove a modificação superficial das fases presentes nas ligas após o tratamento por 3IP.

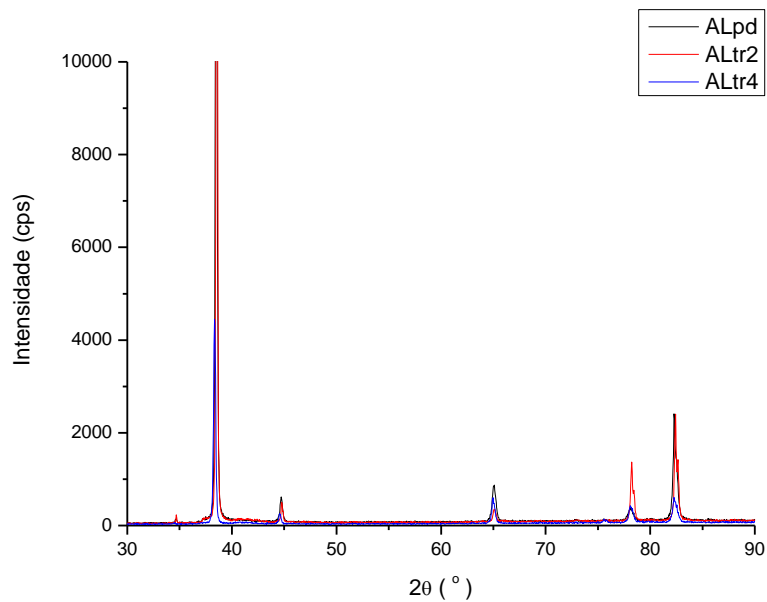


Figura 3.3.5 – Difratograma de raios X (DRX) para as amostras de AL7075.

## 4 - CONCLUSÃO

De acordo com as análises e testes obtidos no presente estudo, após o tratamento por 3IP, há um aumento na espessura das camadas de nitretos, que influencia diretamente na mudança do coeficiente de atrito e no aumento da resistência ao desgaste e corrosão em todas as ligas submetidas à testes e análises até o momento. Entretanto, o 3IP evidencia-se ser mais eficiente para as ligas de titânio, quando comparadas com as ligas de alumínio. Através de DRX para as ligas de alumínio 7075, a intensidade dos picos não indica relações exatas que comprovem a mudança de orientações cristalográficas após o tratamento. Os testes de tração para as ligas de alumínio revelaram que as ligas tratadas por 3IP possuem resistência à ruptura semelhante mesmo após o tratamento, mas é comprovada que o tratamento indica a mudança no comportamento mecânico, tais como a tenacidade e o aspecto superficial na ruptura.

Através da análise de EDS, é possível notar que a sinterização por plasma garante uma à liga uma composição química bem heterogênea, todavia, ainda não foi possível comprovar de fato se esta forma de processamento é mais eficiente que as conhecidas desde então, necessitando de estudos mais detalhados que serão realizados posteriormente. Ligas de Ti-5,5Si-22,5B, tratadas por 3IP, indicam, através de imagens obtidas por MEV, que a implantação de íons de nitrogênio nas camadas superficiais garante grande aumento de rugosidade, mesmo que estas possuam menores camadas de nitretos, quando comparadas com as ligas de Ti-6Al-4V. Grande parte do conteúdo abordado no presente relatório consta no trabalho aprovado a ser apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQIC) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ainda neste mês.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GORYNIN, I.V. Titanium alloys for marine application. Mater. Sci. Eng., v. 263, p.112–116,

1999.

[2] ZHECHEVA, A.; SHA, W.; MALINOV, S.; LONG, A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surface Coatings Technologies, v. 200, p. 2192– 2207, 2005.

- [3] BULANOVA, M.; PODREZOV, Y.; FARTUSHNA; Y. Phase composition, structure and mechanical properties of Ti–Dy–Si–Sn alloys. *Intermetallics*, vol. 14, no. 4, p. 435–443, Apr. 2006.
- [4] LI, S.; HAO, Y.; YANG, R.; CUI, Y.; NIINOMI, M. Effect of Nb on Microstructural Characteristics of Ti-Nb-Ta-Zr Alloy for Biomedical Applications. *Materials Transactions*, vol. 43; no. 12, p. 2964-2969, 2002.
- [5] SILVA, M.M., Modificação de Propriedades Superficiais da Liga Ti-6Al-4V por Processos Assistidos a Plasma, em Baixas e Altas Temperaturas. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos (SP).
- [6] MEIRELES, V.M.; FERNANDES, B.B.; UEDA, M.; RAMOS, A.S. Análise de propriedades físico-químicas em ligas à base de titânio tratadas pelo método de implantação iônica por imersão em plasma. Trabalho à ser apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQIC), UNICAMP, Julho de 2015.
- [7] MEIRELES, M.M.; FERNANDES, B.B.; OLIVEIRA, R.M.; UEDA, M.; RAMOS, A.S. Relatório Parcial de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/ INPE), 2015.
- [8] FERNANDES, B.B.; OLIVEIRA, R.M.; UEDA, M.; MARIANO, S.F.M.; et al. Effects of high temperature plasma immersion ion implantation on wear resistance of Ti-Si-B sintered alloys.
- [9] SILVA, C.; FERNANDES, B.B.; OLIVEIRA, R.M.; UEDA, M.; NETO, C.M.; RAMOS, A.S. Relatório Anual de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/ INPE), 2012.
- [10] DE SOUZA, G.B. Estudo de propriedades mecânicas e tribológicas de titânio nitretado por plasma. 2001. Tese de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Setor de Tecnologia e Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná.
- [11] FREITAS, F.E.; SILVA, M.M.; SUGAHARA, T.; REIS, D.A.P.; NETO, C. M.; UEDA, M. Efeito do tratamento de implantação iônica por imersão em plasma nas propriedades da liga Ti-6Al-4V à altas temperaturas.
- [12] GURRAPPA, I. Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. *Mater. Charact.*, v. 51, p. 131– 139, 2003.

[13] FERNANDES, B.B.; UEDA, M.; SAVONOV, G.S.; NETO, C.M.; RAMOS, A.S. Surface Corrosion of Ti-16Si-4B Powder Alloy Implanted With Nitrogen by Plasma-Based Technique. IEEE Transactions on Plasma Science, vol 39, no. 11, p. 3061-3066, 2011.

[14] FERNANDES, B.B.; MÄNDL, S.; OLIVEIRA, R.M.; UEDA, R.M. Mechanical properties of nitrogen-rich surface layers on SS304 treated by plasma immersion ion implantation.