

**VITOR SIQUEIRA RIUL**

**INFLUÊNCIA DA IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA  
(3IP) NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL 15-5PH E  
AÇO ABNT 4340**

**Guaratinguetá**  
**2015**

VITOR SIQUEIRA RIUL

INFLUÊNCIA DA IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA (3IP)  
NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL 15-5PH E AÇO  
ABNT 4340

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Rafael Gustavo Bonora

Guaratinguetá  
2015

R615i

Riul, Vitor Siqueira

Influência da implantação iônica por imersão em plasma (3ip) na resistência ao desgaste do aço inoxidável 15-5ph e aço ABNT 4340 / Vitor Siqueira Riul – Guaratinguetá, 2016.

56 f. : il.

Bibliografia: f. 55-56

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Gustavo Bonora

1. Plasma (Gases ionizados). 2. Implantação iônica 3. Aço inoxidável.  
4. Desgaste mecânico. I.Título

CDU 533.9

Vitor Siqueira Riul


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

  
Prof. Dr. MIGUEL RAMIREZ ANGEL  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Eng. Rafael Gustavo Bonora  
Orientador/UNESP-FEG

  
Eng. Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini  
Membro Externo

  
Eng. Thiago Alexandre Minto  
Membro Externo

**Dezembro de 2015**

## **DADOS CURRICULARES**

**Vitor Siqueira Riul**

NASCIMENTO	22.06.1992 – Ribeirão Preto / SP
FILIAÇÃO	Helio Ricardo Riul Rita de Cássia Siqueira Riul
2012/2015	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, minha família e por tudo que sou e consegui até hoje;

Aos meus pais Helio Ricardo Riul e Rita de Cassia Siqueira Riul, que me deram a base para eu ser quem sou hoje e também por ensinar a importância das palavras: respeito, carinho amor e dedicação;

Ao meu irmão Felipe Siqueira Riul, que sempre me apoiou em cada passo e também me mostrou a importância de se dedicar e ter com quem contar a todo o momento.

À minha namorada Marcela Gagheggi Maciel, que é meu motivo de querer ir para frente a cada dia.

Para a República TOA-TOA, que é minha segunda família, onde pude passar a melhor fase da minha vida com amizades,, diversão aprendizados e companheirismo.

Aos meus professores, pelos ensinamentos que me passaram, sempre ajudando com dúvidas e sendo pacientes em qualquer situação;

Ao meu orientador Rafael Gustavo Bonora, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho e também por passar ensinamentos de forma clara e dar suporte no auxílio dos ensaios e confecção do trabalho.

À professora Maria Odila Cioffi por toda dedicação no auxílio das atividades da universidade e também no auxílio com o desenvolvimento da pesquisa CNPq.

Ao professor Herman Jacobus Cornelis Voorwald, pela orientação na pesquisa de iniciação científica CNPq.

“A dúvida é o preço da pureza, é inútil ter certeza”.

Jean-Paul Sartre

RIUL, V. S. **Influência da implantação iônica por imersão em plasma (3ip) na resistência ao desgaste do aço inoxidável 15-5ph e aço ABNT 4340**. 2014. 55 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

Quando se estudam materiais para aplicação em componentes estruturais de trens de pouso de aeronaves aeronáuticos deve-se considerar que os mesmos irão sofrer perdas progressivas decorrentes do contato relativo entre dois ou mais corpos móveis nas áreas de amortecimento, sendo um parâmetro importante o estudo da resistência ao desgaste dos materiais aplicados. Considerando trem de pouso em operação, o estudo da resistência ao desgaste é fundamental, principalmente quando se pretende utilizar novas técnicas de tratamentos superficiais, pois estes influenciam diretamente a tribologia do material, gerando assim diferentes mecanismos de perda mássica gerado pelo contato de duas superfícies com velocidade relativa entre elas. O objetivo é estudar a influência do tratamento superficial de implantação iônica por imersão a plasma de nitrogênio, na resistência ao desgaste do aço inoxidável 15-5 PH e do aço ABNT 4340. Ambos os aços foram ensaiados em com o ensaio pino-disco em contato relativo com pino de bronze-alumínio 630. Também foram realizados ensaios de nanoindentação, microscopia de força atômica e microscopia eletrônica de varredura para análise das superfícies desgastadas. Foi possível observar que o 3IP não teve influencia na espessura do material, e ainda assim, proporcionou aumentos significativos na resistência ao desgaste dos materiais.

**PALAVRAS CHAVE:** Desgaste. 3IP. ABNT 4340. 15-5 PH.

RIUL, V. S. **Wear resistance of 15-5 PH stainless steel and ABNT 4340 steel treated by plasma immersion ion implantation.** 2014. 55 f. Graduate Work (Graduate in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

When materials for application in landing gear aircraft structural components are studied, it must be considered that they will be they will suffer progressive loss caused by contact between two or more moving bodies in damping areas, being an important parameter to study the wear resistance of the materials applied. Whereas, for example, a landing gear operation, the study of wear resistance in the materials used in it is essential, especially when you want to use new techniques for surface treatments, as they directly influence the tribology of the material, thus generating different mass loss mechanisms generated by contact of two surfaces with relative speed enters them. The objective is to study the influence of surface treatment of immersion ion implantation nitrogen plasma, in wear resistance of Stainless steel 15-5 PH and ABNT 4340 steel. Both steels were tested with the pin-disk test in contact relative with aluminum bronze 630 pin. Also nanoindentation tests were performed, atomic force microscopy and scanning electron microscopy for analysis of worn surfaces. It was observed that the 3IP had no effect on the thickness of the material, and still provided a significant increase in wear resistance of the material.

**PALAVRAS CHAVE:** Wear. 3IP. ABNT 4340. 15-5 PH.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>OBJETIVO</b>	11
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
2.1.	Aço inoxidável.....	12
2.3.	Desgaste.....	14
<b>2.3.1.</b>	<b>Definição de desgaste</b> .....	14
2.3.2.	Processos de desgaste.....	15
2.3.2.1.	Desgaste adesivo.....	15
2.3.2.2.	Desgaste abrasivo.....	16
2.3.2.3.	Desgaste corrosivo.....	18
2.3.2.4.	Fadiga de superfície.....	18
2.4.	Implantação iônica por imersão em plasma (3IP).....	19
2.5.	Microindentação.....	22
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	24
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	25
4.1.	Materiais utilizados.....	25
<b>4.1.1.</b>	<b>Metal base</b> .....	25
4.1.1.1.	15-5 PH.....	25
4.1.1.2.	ABNT 4340.....	26
<b>4.1.2.</b>	<b>Pino para ensaio</b> .....	26
4.2.	Métodos.....	27
<b>4.2.1.</b>	<b>Implantação iônica por imersão em plasma (3IP)</b> .....	27
<b>4.2.2.</b>	<b>Ensaio de desgaste</b> .....	28
<b>4.2.3.</b>	<b>Ensaio força atômica</b> .....	30
<b>4.2.4.</b>	<b>Nanoindentação</b> .....	30
<b>4.2.5.</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	31
5.1.	15-5 PH.....	31
<b>5.1.1.</b>	<b>Ensaio de desgaste</b> .....	31
<b>5.1.2.</b>	<b>Ensaio força atômica</b> .....	32
<b>5.1.3.</b>	<b>Nanoindentação</b> .....	35

5.2.	ABNT 4340.....	43
5.2.1.	Ensaio de desgaste .....	43
5.2.2.	Ensaio força atômica .....	44
5.2.3.	Nanoindentação .....	46
6	<b>CONCLUSÃO</b>	56
	<b>REFERÊNCIAS</b>	55

## **1 OBJETIVO**

O objetivo do presente trabalho é a o estudo da influência do tratamento de implantação iônica por imersão em plasma (3IP) de Nitrogênio em relação à resistência ao desgaste dos aços ABNT 43-40 e o aço inoxidável 15-5 PH.

No projeto será estudado o comportamento de desgaste pino disco dos materiais ABNT 43-40 e o aço inoxidável 15-5 PH tratados e não tratados com 3IP, onde este tratamento, onde o desgaste será gerado por um pino de bronze - alumínio 630.

## 2 INTRODUÇÃO

### 2.1. Aço inoxidável

Aços inoxidáveis são materiais nos quais sua estrutura é formada basicamente por ferro e cromo, onde no mínimo 10,50% é cromo na sua composição. (TUSSOLINI, 2010)

Os aços inoxidáveis apresentam características físico-químicas superiores a outros aços e são altamente resistentes à corrosão em vários ambientes. Tem como elemento predominante o cromo (Cr) sendo necessária uma concentração de pelo menos 11% de cromo na liga para ser considerado um aço inoxidável. A resistência à corrosão também pode ser melhorada com o acréscimo de níquel e molibdênio. (CALLISTER, 2000)

Aços inoxidáveis recebem este nome devido a sua grande resistência a corrosão, mas esta afirmação não está totalmente correta, pois estes na realidade já sofreram oxidação, e esta camada superficial já oxidada que o protege de se oxidar novamente e assim se degradar, esta camada de material oxidado é denominado de camada passiva.

O processo que faz com que o aço seja inoxidável é a passivação, este é um processo de oxidação do material, no qual o material se oxida na superfície formando uma fina camada, denominada camada passiva, que é resultado da reação do cromo juntamente com o oxigênio da atmosfera que gera uma fina e aderente camada de óxido de cromo, o qual faz uma barreira contra novas oxidações que degradariam o material. (TUSSOLINI, 2010)

Os aços inoxidáveis são divididos em três diferentes grupos, onde estes são devido a sua estrutura, sendo estes:

- Ferrítico;
- Martensítico;
- Austenítico;
- Duplex;
- PH.

Aços inoxidáveis **ferríticos** são aços que não podem ser endurecidos significativamente por tratamentos térmicos, pois estes são aços que contêm grande concentração de cromo em sua composição, sendo aproximadamente 17%, e baixo teor de carbono. Sendo assim se matam em estrutura cúbica de corpo centrado (ccc) em qualquer temperatura. (TUSSOLINI, 2010)

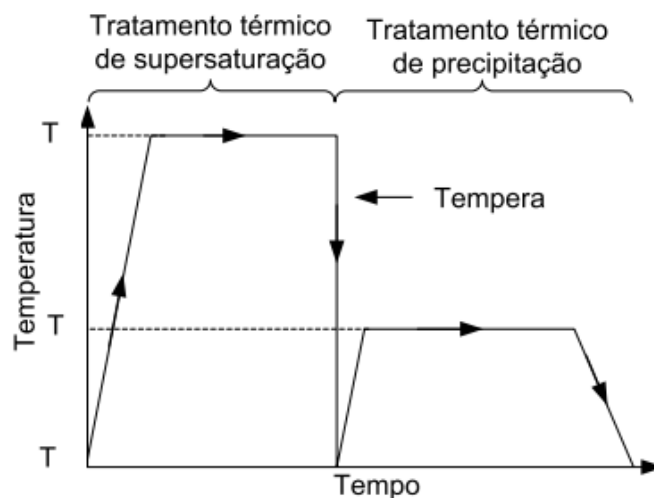
Os aços inoxidáveis **martensíticos** são formados por estruturas semelhantes aos aços ferros carbono, onde estes podem ser tratados termicamente, sendo assim na maioria dos casos para melhores propriedades mecânicas estes são submetidos a têmperas e também são revenidos, tem alta concentração de carbono, possuem estrutura tetragonal de corpo centrado (tcc). (ALLENSTEIN, 2007)

Por sua vez os aços inoxidáveis **austeníticos** são formados principalmente por cromo e níquel, estes possuem estrutura cúbica de face centrada (cfc), e não podem ser endurecidos por tratamento térmico. (TUSSOLINI,2010)

Aços inoxidáveis **Duplex** são aços com estrutura muito refinada a qual faz com que ele apresente uma característica de superplasticidade, a estrutura refinada é proveniente da transformação ocorrida onde a partir de tratamentos este tenha uma estrutura combinada austenítica/ferrítica. Uma das grandes vantagens deste tipo de aço é a sua resistência a corrosão sob tensão. (SILVA, 2011)

Finalmente os aços inoxidáveis da classe **PH** são submetidos ao tratamento térmico conhecido como envelhecimento, este processo nada mais é que o endurecimento por precipitação, no qual um material é submetido primeiramente a um processo de têmpera, o qual faz com que se obtenha uma solução sólida supersaturada, posteriormente o mesmo é aquecido novamente a uma temperatura intermediária, que fará com que haja a precipitação de uma segunda fase finamente dispersa pela fase original do material, esta precipitação irá endurecer o material.

Figura 1: Esquema do tratamento térmico de supersaturação e envelhecimento.



Fonte: (SILVA, 2011)

Nos aços da classe PH além do refinamento que este processo causa nos grãos, este também tem como vantagem a eliminação da segregação de alguns elementos, o que faz o material se tornar mais homogêneo. Esta classe de aços tem muitas propriedades interessantes, dentre elas a resistência à tração muito elevada, resultado do tratamento térmico, e também apresenta uma grande resistência a corrosão quando comparado aos aços inoxidáveis austeníticos. (SILVA, 2011)

### 2.3.Desgaste

#### 2.3.1. Definição de desgaste

Desgaste de um modo geral pode ser definido como a perda progressiva de massa de um material devido ao movimento relativo com outra superfície, onde este contato pode ser devido a outro sólido um líquido ou um gás. (BERNARDELLI, 2007)

Este tipo de degradação é um problema ao qual se deve dar muita atenção, pois este é responsável por várias falhas em matérias na atualidade, sendo os equipamentos móveis afetados pelo desgaste, sendo estes equipamentos: bombas, rodas, engrenagens, entre outros.

Desgaste é a perda progressiva de substância de uma superfície de um corpo em decorrência do movimento relativo com outra superfície.

Desgaste é o dano gerado a uma superfície sólida, envolvendo perda de material devido ao movimento relativo entre aquela superfície e uma outra substância em contato. (CORRÊA, 2005)

Tribologia é a ciência a qual estuda a interação entre superfícies com movimento relativo e das partículas que as relacionam. (PASCOALI, 2004)

Tribologia envolve a ciência de todos os tipos de fricção, lubrificação e desgaste e aplicações de técnicas do conhecimento tribológico.

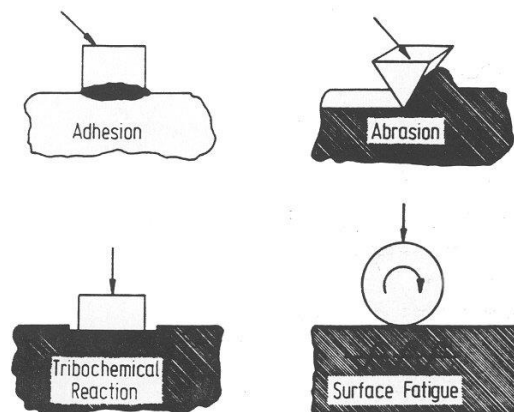
O estudo tribológico dos materiais utilizados é de primordial importância tendo em vista que o desgaste é responsável por grandes perdas econômicas, essa degradação também é devido a processos de engenharia (tribosistema), que nada mais é que as condições de trabalho e de preparação na qual o sistema será utilizado.

### 2.3.2. Processos de desgaste

Na nomenclatura de processos de desgaste, estes são divididos em 4 tipos:

- Desgaste adesivo;
- Desgaste abrasivo;
- Desgaste corrosivo;
- Fadiga de superfície.

Figura 2: Processos de desgaste em materiais.



Fonte: (GAHR, 1987)

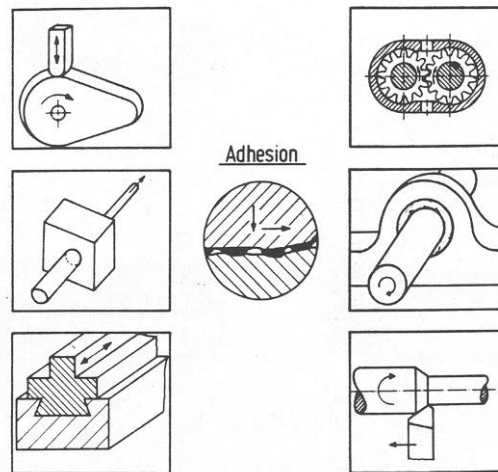
#### 2.3.2.1. Desgaste adesivo

O desgaste adesivo ocorre em decorrência do deslizamento de um material contra o outro, a pressão entre as áreas ásperas das superfícies faz com que haja junções localizadas, que nada mais é que o desgaste adesivo. (CAMARGO, 2007)

Este desgaste geralmente é estudado de acordo com o tipo de contato entre as superfícies e as partículas responsáveis pela abrasão, assim como o ambiente de contato, como sendo desgaste abrasivo a dois ou a três corpos. (NUNES, 2008)

A tendência de formação de juntas aderidas são dependentes das propriedades físicas e químicas dos materiais. Normalmente contatos entre metais são de não-metálicos tendo em vista que as superfícies são recobertas por filmes de óxidos. A adesão de um metal em um não-metal é primeiramente causada por forças fracas de Wan der Waals. Filmes de óxidos podem se quebrar devido a deformações elásticas e plásticas das asperezas. Neste caso a adesão é causada por ligações covalentes ou metálicas(que são mais fortes que a de Wan der Waals).(CAMARGO, 2007)

Figura 3: Sistemas tribológicos envolvidos no desgaste adesivo.



Fonte: (GAHR, 1987)

### 2.3.2.2.Desgaste abrasivo

Desgaste abrasivo é a retirada de material superficial causada pela presença de partículas duras. As partículas duras podem estar presas na interface entre as duas superfícies em movimento relativo, ou serem as protuberâncias que fazem parte da rugosidade da superfície do material. (CAMARGO, 2007)

O desgaste abrasivo é dividido em dois tipos, sendo eles, desgaste abrasivo de altas tensões e desgaste abrasivo de baixas tensões.

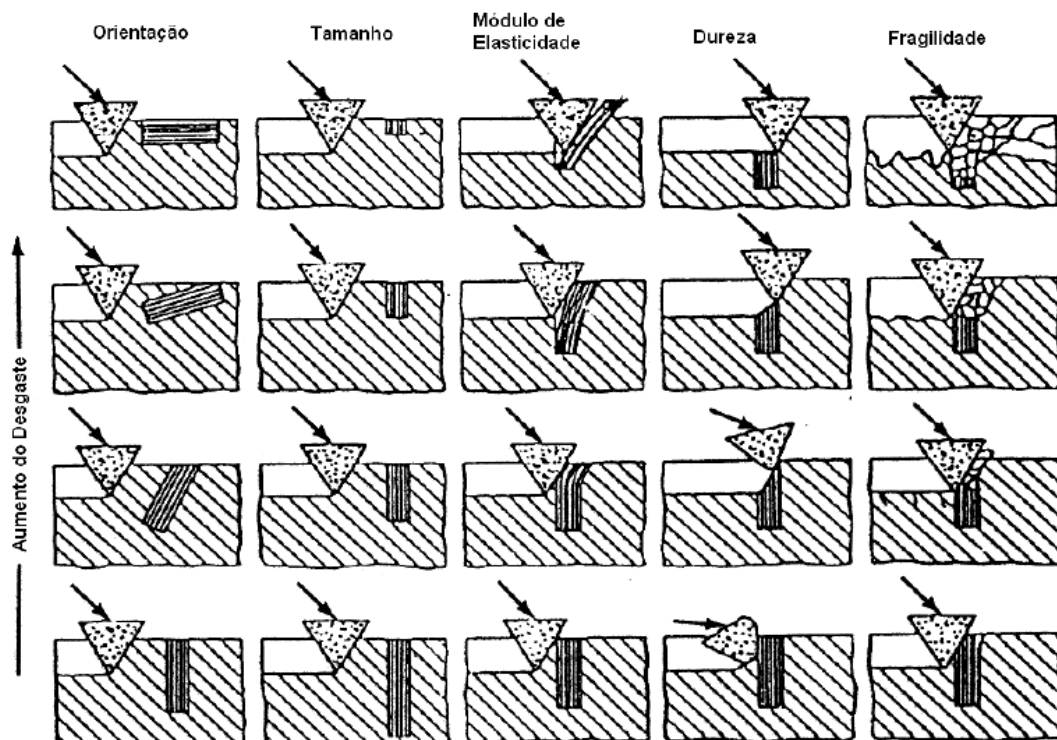
O desgaste abrasivo de altas tensões devido a deformações plásticas, onde os danos no material são severos e produz ranhuras profundas na direção do desgaste. (CAMARGO, 2007)

Desgaste abrasivo de baixas tensões é formado por partículas duras e agudas que aram a superfície do material, fazendo um desgaste profundo no material desgastado. (SCZANCOSKI, 2005)

Existem vários fatores que interferem na proporção de desgaste abrasivo que o material irá sofrer, tendo em vista que o desgaste abrasivo quase sempre é gerado quando um material duro e rugoso desliza em contato com outro de dureza relativamente mais baixa, sendo assim a orientação dos grãos, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade são as propriedades que mais afetam diretamente na abrasão do material que sofrerá o esforço. (SCZANCOSKI, 2005)

Também podemos ter materiais com mais de uma fase, no qual a figura 6 está demonstrando como as propriedades desta fase pode afetar a magnitude desta abrasão.

Figura 4: Efeito de diferentes propriedades da segunda fase em relação ao desgaste abrasivo.



Fonte: (GAHR, 1987)

### 2.3.2.3.Desgaste corrosivo

Este processo de desgaste caracterizado pela formação de produtos de reação químico como resultado de interações entre os elementos do sistema tribológico iniciada por uma ação tribológica. (TEDESCO, 2010)

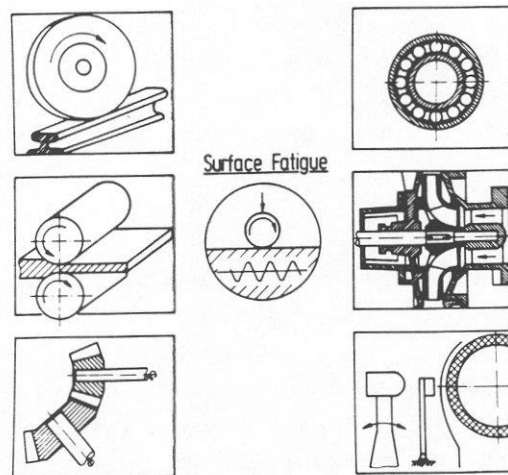
A interação entre agente tribológicos é devida a criações entre as superfícies que estão em contato e o meio em que elas estão (líquido ou gasoso), esta forma um filme na superfície que é denominado de tribo filme, o desgaste neste caso é devido ao destacamento destas camadas. (TEDESCO, 2010)

### 2.3.2.4.Fadiga de superfície

O desgaste devido à fadiga de superfície tem como característica a formação de trincas e/ou descamação do material que são resultados de ciclos de carga na superfície do material. (TEDESCO, 2010)

O desgaste de fadiga superficial tem os mesmos mecanismos de degradação do material que a fadiga, sendo assim, quando há um sistema o qual gera tensões cíclicas na superfície do material este gera, por deslocamento de discordâncias, nucleações de trincas, as quais se propagam assim gerando a descamação, que é a retirada do material superficial causada pelo desgaste gerado pela fadiga.

Figura 5: sistemas tribológicos que envolvem desgaste por fadiga de superfície.



Fonte: (GAHR, 1987)

#### 2.4. Implantação iônica por imersão em plasma (3IP)

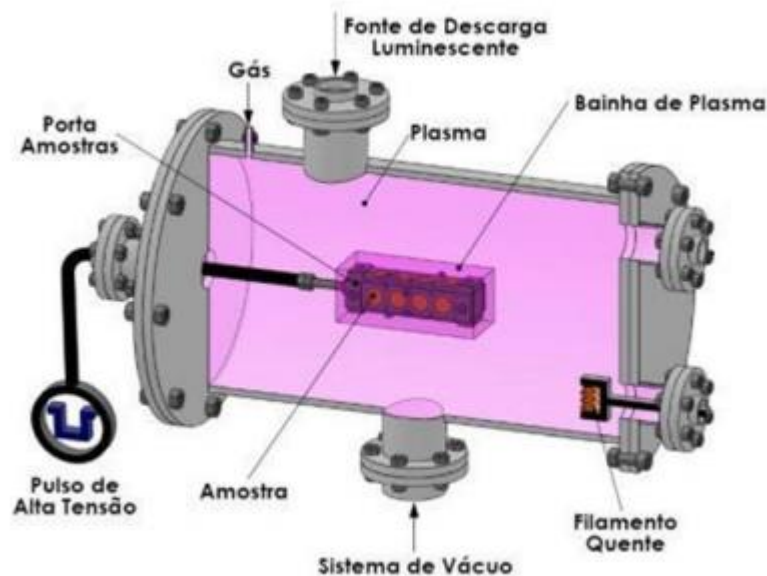
O processo de implantação iônica 3IP, é o processo de tratamento da superfície do material, que consiste na implantação de íons na superfície do material tratado. Este processo foi criado e desenvolvido na Universidade de Wisconsin (EUA) por John Conrad, onde inicialmente era feita a implantação de nitrogênio na superfície do material. (VIEIRA, 2010)

O plasma é também conhecido como o quarto estado da matéria. Um material quando em estado sólido, este está com as moléculas muito aglomeradas, com pouca movimentação, com o aquecimento, o material irá mudar de estado por causa do aumento de movimentação entre as partículas geradas pelo calor, sendo assim este irá passar pelo estado líquido e consequentemente pelo estado gasoso, analogamente as transformações que ocorrem entre sólido e líquido e líquido gás, o gás se transformará no plasma, que nada mais é que partículas livres carregadas, tanto positivamente quanto negativamente. (ZAIKA, 2007)

A implantação de íons é feita com o substrato imerso em um plasma de baixa pressão, e dentro deste substrato o material ao qual se deseja modificar a superfície é submetido a pulsos elétricos, tendo em vista que a diferença de potencial gerada entre os pulsos de alta

tensão aplicados no material alvo e os íons dispersos ao redor deste, farão com que estes íons sejam atraídos contra a superfície do material que sofrerá a implantação. (ZAIKA, 2007)

Figura 6: Esquema do processo de implantação iônica por imersão em plasma (3IP)



Fonte: (ZAIKA, 2007)

A diferença de potencial aplicada ao material tem que ser em pulsos, pois estes farão com que os íons dispersos sejam acelerados para o material alvo com direção normal à superfície do mesmo, fazendo com que esta implantação seja mais profunda, e mais homogêneo por toda superfície. No caso desta tensão ser aplicada constantemente no material, isso formaria campos magnéticos, que poderiam diferenciar a trajetória dos íons, e estes então não mais terem uma trajetória normal à superfície do material, que acarretaria em uma penetração menos efetiva dos íons. (ZAIKA, 2007)

A intensidade da tensão aplicado na peça é um fator ao qual tem uma ligação direta com os resultados finais do processo 3IP, tendo em vista que este dará a aceleração que os íon irão sofrer quando o pulso for aplicado, pois quanto maior a tensão aplicada na peça maior a diferença de potencial gerada entra peça e íon, com o aumento da aceleração dos elétrons consequentemente irá aumentar a profundidade de implantação dos íons.

Os pulsos de alta voltagem, os quais a peça irá sofrer, faz com que os íons do plasma sejam acelerados contra a superfície, fazendo com que haja uma implantação simultânea em

toda a superfície do alvo. Com o ajuste do tempo de repetição dos pulsos e a duração deles, possibilita a obtenção da temperatura do tratamento. (ZAIKA, 2007)

Na implantação iônica, os íons penetram na superfície do material colidindo com outros átomos, o íon traça uma trajetória dependendo de suas colisões até estas fazerem com que a energia cinética do íon acabe. Como a energia dos íons são muito altas inicialmente, estes podem deslocar átomos do substrato que está sofrendo a implantação, sendo assim podendo causar a erosão do material, este fenômeno se nomeia *sputtering*, ou decapagem. Este fenômeno é prejudicial, pois além de fazer com que os átomos ejetem, podem fazer com que os íons implantados também saiam do substrato. (MELLO, 2007)

Os átomos de ferro que são movimentados pelo processo de decapagem, reagem com os íons de nitrogênio do plasma, assim gerando nitreto de ferro, estes tem característica muito instável, mas ao se combinarem se estabilizam. Durante o processo de recombinação, os nitrogênios presente nestes são difundidos, uns para o interior da superfície, e outro de volta ao plasma, formando-se assim duas camadas, a camada de difusão, que é a mais interna, gerada pela difusão dos íons de nitrogênio, e a zona mais próxima à superfície, chamada zona de compostos, onde estão presentes as ligações que geram os nitretos combinados.

Esta grande quantidade de choques entre o substrato e os íons que incidem neste podem acarretar em diferentes mudanças na tribologia do material, uma vez que todo tratamento superficial gera mudanças ou químicas ou físicas na superfície do material, que podem acarretar em mudança nas propriedades de desgaste do mesmo.

O processo 3IP com altas temperaturas (acima de 450°C) em aços inoxidáveis pode acarretar a formação de nitretos de cromo, estes ficam depositados nos contornos de grão, o que gera uma redução na resistência à corrosão. (ZAIKA, 2007)

Na implantação a plasma é muito importante que seja feita em pulsos, principalmente por quatro motivos:

- Evitar formação de arcos elétricos, sendo eles entre o plasma e o substrato e também entre o plasma e as paredes do equipamento de implantação;

- Pra limitação do tamanho da bainha (camada criada pela implantação do plasma no substrato), onde quando a operação é feita com voltagens muito altas esta não extrapole o esperado;

- Para a “reciclagem” da bainha com os íons implantados;

- Para ter parâmetros de liberdades adicionais, sendo este comprimento de pulso e o ciclo de trabalho do experimento. (SILVA JUNIOR, 2010)

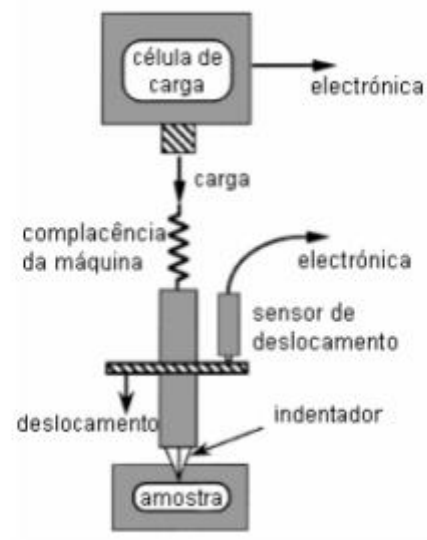
Um aspecto muito interessante no processo de implantação dos íons 3IP é a formação de uma camada fina de material, muito próxima à superfície, homogênea. Mesmo este processo criando uma camada bem mais fina que nos outros processos, os resultados deste são muito satisfatórios em relação a propriedades mecânicas e físicas dos mais diferentes tipos de materiais. (MELLO, 2007)

## 2.5. Microindentação

Dureza é a propriedade de um sólido decorrente da combinação de propriedades elásticas e plásticas e pode ser entendida como uma medida de resistência à penetração no material. Desde que as propriedades de superfície e de volume podem diferir, a dureza depende da profundidade de penetração e do tipo de penetrador utilizado. A dureza de um material pode ser determinada a partir da força de contato nominal aplicada sobre um penetrador de geometria específica na superfície de um sólido (MACHADO, 2005).

O ensaio de penetração em escala nanométrica, ou nanoindentação, é uma técnica utilizada para caracterização de propriedades mecânicas de filmes finos, de materiais com superfícies modificadas e de revestimentos. O penetrador de ponta de diamante é o mais utilizado na nanoindentação, tipo Berkovich, que possui a geometria de uma pirâmide regular de base triangular, de tal forma que tem a mesma relação profundidade-área apresentada pelo tipo Vickers (LEPIENSKI, 1998).

Figura 7 – Diagrama de funcionamento de um nanoindentador



Fonte: (TAVARES, 2003)

### **3 JUSTIFICATIVA**

A redução para futuramente eliminar o uso do cromo duro e do cádmio ( aplicado em revestimentos de aços usados em aeronaves), para assim reduzir os riscos de saúde dos trabalhadores e os problemas ambientais associados aos mesmos.

A legislação nacional atualmente vem exigindo a substituição do cádmio e cromo que é utilizado para deposição no aço ABNT 4340, os quais causam vários agravantes ambientais, seguindo também a legislação europeia que restringiu o uso do cromo para estes fins, tendo em vista os problemas ambientais que este gera.

O novo processo de tratamento também acarreta em um grande investimento em um desenvolvimento tecnológico para o mesmo, que gera uma maior aplicação para este processo que é muito interessante no ponto de vista ecológico.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais utilizados

#### 4.1.1. Metal base

##### 4.1.1.1. 15-5 PH

O aço inox 15-5 PH, conforme a especificações AMS5659M, é um aço inoxidável martensítico que combina alta resistência mecânica com boa resistência à corrosão. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inox 15-5 PH.

Tabela 1 - Composição química específica do aço inox 15-5PH

Elementos	Mínimo (%)	Máximo (%)
C	0	0,07
Mn	0	1
P	0	0,03
S	0	0,015
Si	0	1
Cr	14	15,5
Ni	3,5	5,5
Mo	0	0,5
Nb	0	0,45
Cu	2,5	4,5

Fonte: (Própria)

Este material pertence a classe PH (Precipitation Hardening), que é obtida pelo tratamento térmico de endurecimento por precipitação. O tratamento foi realizado na condição H1025 à 552°C por 4 horas. São especificadas as seguintes propriedades mecânicas: Resistência Mecânica: 1100 MPa. Dureza: 39,5 – 42,1 HRC.

#### 4.1.1.2. ABNT 4340

O aço ABNT 4340 conforme a especificações AMS 6414, de uso aeronáutico, é um aço de baixa liga com elevadas propriedades mecânicas e boas características em fadiga. A composição química do aço pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química específica do aço inox 15-5PH

Elementos	Mínimo (%)	Máximo (%)
C	0,38	0,43
Mn	0,65	0,9
P	0	0,01
S	0	0,01
Si	0,15	0,35
Cr	0,7	0,9
Ni	1,65	2
Mn	0,2	0,3
Cu	0	0,35

Fonte: (Própria)

Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento (temperatura de revenimento igual a 520°C), o material apresentou as seguintes propriedades mecânicas: resistência mecânica: 1177 MPa e dureza entre 36-39 HRC.

#### 4.1.2. Pino para ensaio

O pino utilizado para realização do ensaio de desgaste foi de bronze- alumínio 630.

## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Implantação iônica por imersão em plasma (3IP)

O sistema 3IP consiste, basicamente, de uma câmara de vácuo com porta amostra, fonte de plasma e um modulador de pulsos de alta tensão. No processo as amostras são presas por um suporte de aço inox, este é preso dentro da câmara e fica imerso no plasma durante o tratamento. Posteriormente é gerado vácuo na câmara até atingir uma pressão de base de 10-5 Mbar, utilizando bombas de vácuo mecânica e difusora. O gás do qual se deseja criar os íons que formaram o plasma são adicionados na câmara. O filamento quente é ligado, a tensão da fonte de descarga luminescente é aplicada e o plasma é formado.

O filamento quente é utilizado basicamente para aumento do número de elétrons no gás antes da formação do plasma.

Quando é aplicada a tensão entre a haste (que fica isolada) e a câmara, a descarga é facilitada pelo excesso de elétrons presente no gás. Isso facilita o início do plasma. Quando o plasma é formado, os elétrons livres são absorvidos pelo metal da câmara e fluem para terra, empobrecendo o plasma em termos de carga negativa e causando um aumento no potencial de plasma e no potencial flutuante. O chuveiro de elétrons vindo do filamento realimenta o plasma com elétrons e faz o potencial baixar. A diminuição do potencial é necessária porque um alto potencial flutuante aumenta a taxa de *sputtering* dos materiais inseridos no plasma.

É no porta-amostra que são aplicados pulsos de alta tensão negativa em relação ao potencial de plasma. A tensão negativa aplicada acelera os elétrons do plasma para longe do porta-amostra enquanto acelera os íons positivos do plasma em direção às amostras, criando uma bainha de plasma ao redor do porta-amostra e assim implantando os íons.

Esse processo é repetido a cada pulso e o tratamento pode durar desde alguns minutos até várias horas, dependendo do material a ser tratado e do objetivo do tratamento.

Foram feitas três amostras, sendo de uma até 3 horas de tratamento 3IP.

#### 4.2.2. Ensaio de desgaste

Os ensaios de desgaste por deslizamento serão realizados no Laboratório de Desgastes do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP Tribômetro de configuração tipo pino-disco, com a metodologia direcionada pela norma ASTM G 99.

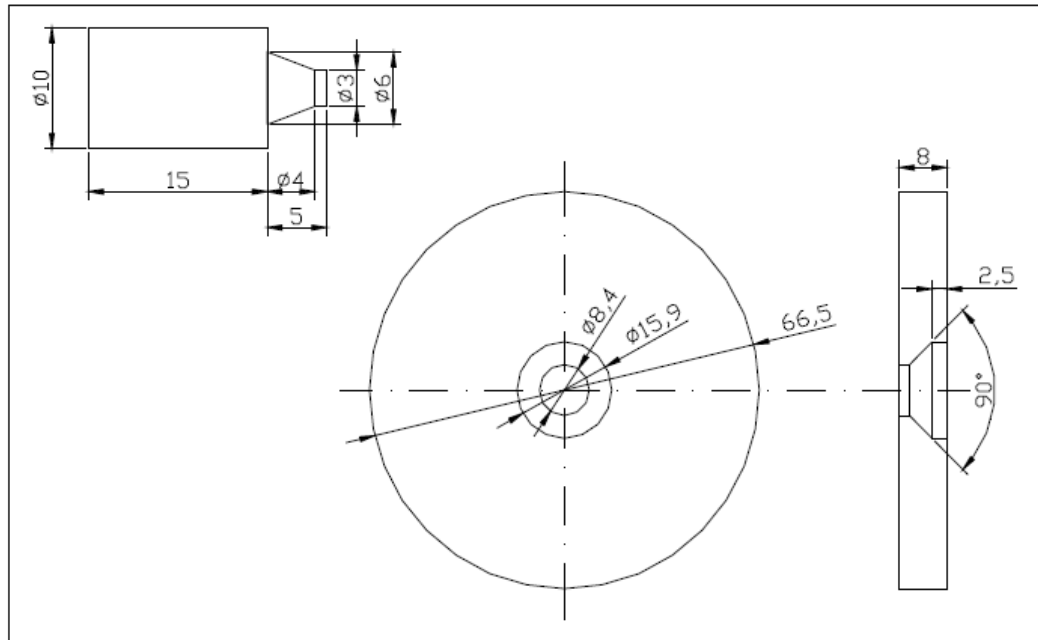
Figura 8: Equipamento ensaio pino-disco.



Fonte: (Própria)

O pino metálico será usinado a partir da liga bronze-alumínio 630 e os discos obtidos do aço 4340 nas 12 condições material base e revestidos (cromo duro, WC-CrC-Ni, WC-10Ni, Ni-20Cr, Ni-Cr-B-Si-Fe e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>- NiCr). A Figura 9 ilustra o croqui do par pino-disco utilizado para os ensaios de desgaste.

Figura 9: Corpo de prova para ensaio pino-disco.



Fonte: (GAHR, 1987)

A velocidade de deslizamento ( $v$ ) do par tribológico será de 0,5 m/s. Será aplicada sobre o pino uma força normal de 5 N, correspondente ao peso da haste de fixação do pino sem pesos adicionais. Os ensaios serão realizados à temperatura ambiente, sem lubrificação e sem controle de umidade.

Os parâmetros levantados nos ensaios serão:

- Medição da perda de massa do pino metálico e do disco utilizando uma balança analítica;
- Medição indireta do coeficiente de atrito, através de uma célula de carga incorporada à fixação do pino.

A cada 400m de percurso, os corpos-de-prova foram limpos em banho ultrassônico e, em seguida, foram pesados. O percurso total para cada par tribológico foi de 2000m.

#### **4.2.3. Ensaio força atômica**

Foi realizado o ensaio de força atômica para avaliação da rugosidade superficial, sendo assim todos os corpos de provas nas quatro condições citadas (metal base, 1 hora de 3IP, 2 horas de 3IP e 3 horas de 3IP) foram submetidos ao ensaio de força atômica que ocorre com uma ponteira que varre o material fazendo assim uma análise da rugosidade da superfície do material ensaiado.

#### **4.2.4. Nanoindentação**

Os testes de nanoindentação foram realizados no Laboratório de Propriedades Nanomecânicas do Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná (Labnano/Defis/UFPR), utilizando um NanoIndenter XP, fabricado pela MTS Systems.

A carga máxima durante os ensaios foi de 400 mN, com 12 ciclos de carregamento. A ponta utilizada foi a Berkovich (piramidal de base triangular). As indentações foram distribuídas em uma matriz 5x5, e separadas por uma distância de 50  $\mu\text{m}$  entre cada indentação para assim evitar a influência do campo de uma indentação na outra subsequente.

#### **4.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As trilhas de desgaste formadas durante o ensaio de desgaste pino-disco também foram analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura ZEISS, disponível na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG/UNESP, com objetivo de caracterizar o mecanismo de desgaste sobre o par tribológico.

## 5 RESULTADOS

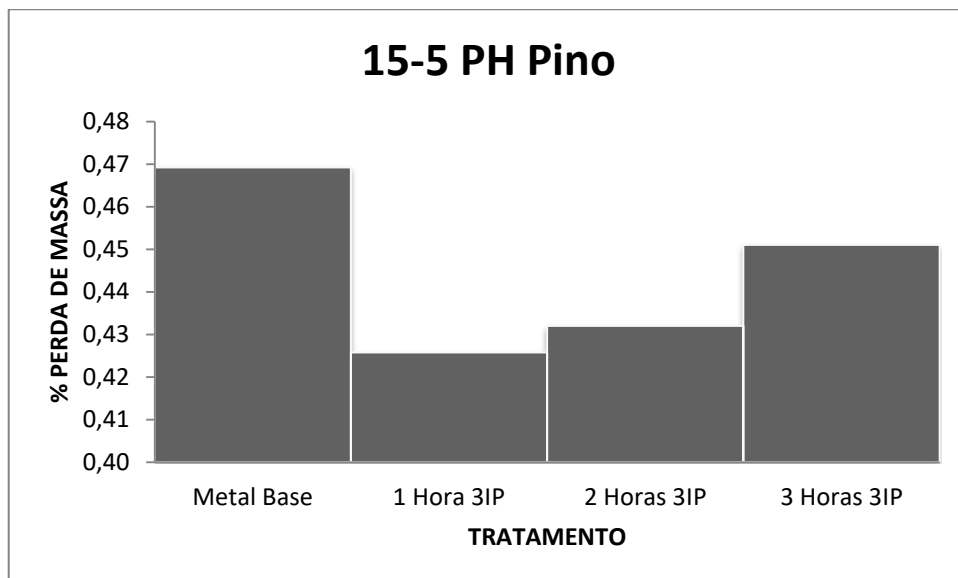
### 5.1. 15-5 PH

#### 5.1.1. Ensaio de desgaste

Para os ensaios foram gerados quatro condições diferentes de material do disco, sendo elas: Metal Base, 3IP 1hora, 2horas e 3horas.

Sendo assim foram feitos ensaios de desgaste para as quatro situações citadas, que geraram os seguintes resultados:

Figura 10: Perda mássica pino, 15-5 PH



Fonte: (Própria)

Observando o gráfico de perda mássica do pino, podemos observar que a condição de tratamento que minimiza o desgaste no pino é o de 3IP por uma hora, tendo como resultado a redução de danos causados pelo movimento relativo entre as duas superfícies, que nada mais é que a definição de desgaste.

Tendo em vista que do metal base para situação mais satisfatória (2 horas 3IP) houve uma diminuição de cerca de 0,05% de desgaste do material, o que é um resultado muito satisfatório para a viabilização de aplicação deste tratamento em cenário real.

### 5.1.2. Ensaio força atômica

No ensaio de força atômica foram avaliadas as superfícies dos materiais, conforme apresentado nas figuras (11 à 14) mostradas à seguir:

Figura 11: Resultado força atômica 15-5 PH metal base

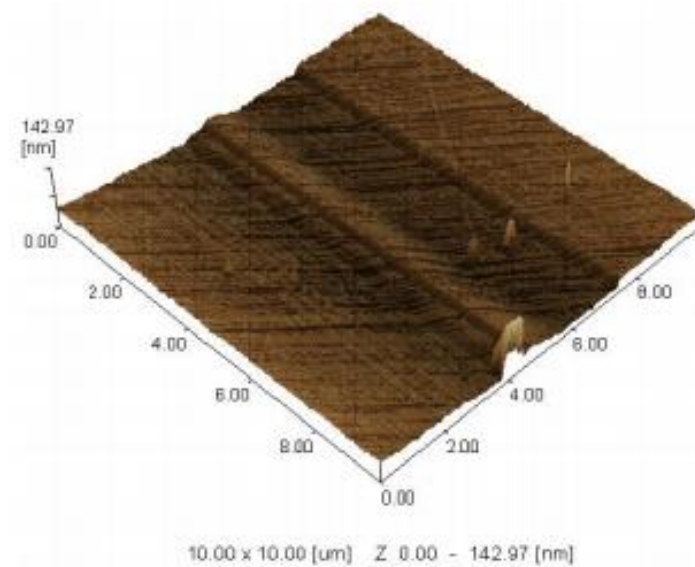
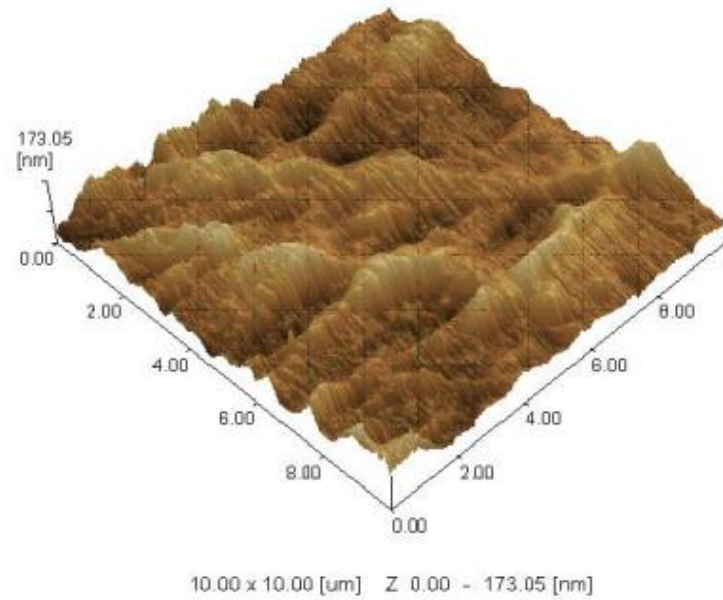
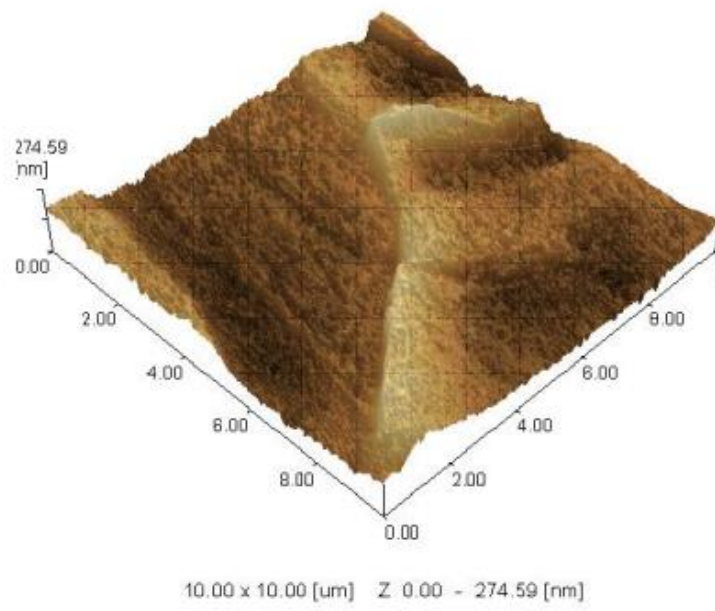


Figura 12: Resultado força atômica 15-5 PH 1 hora 3IP



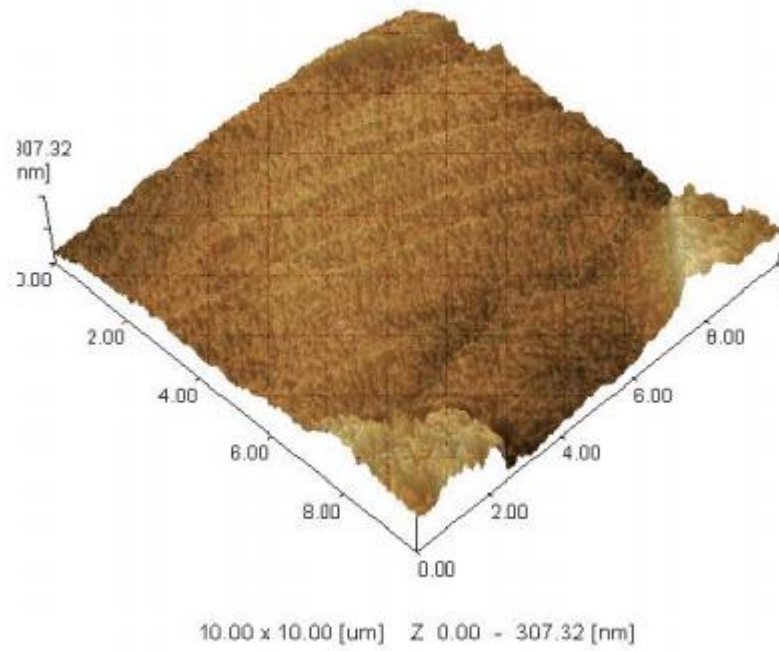
Fonte: (Própria)

Figura 13: Resultado força atômica 15-5 PH 2 horas 3IP



Fonte: (Própria)

Figura 14: Resultado força atômica 15-5 PH 3 horas 3IP



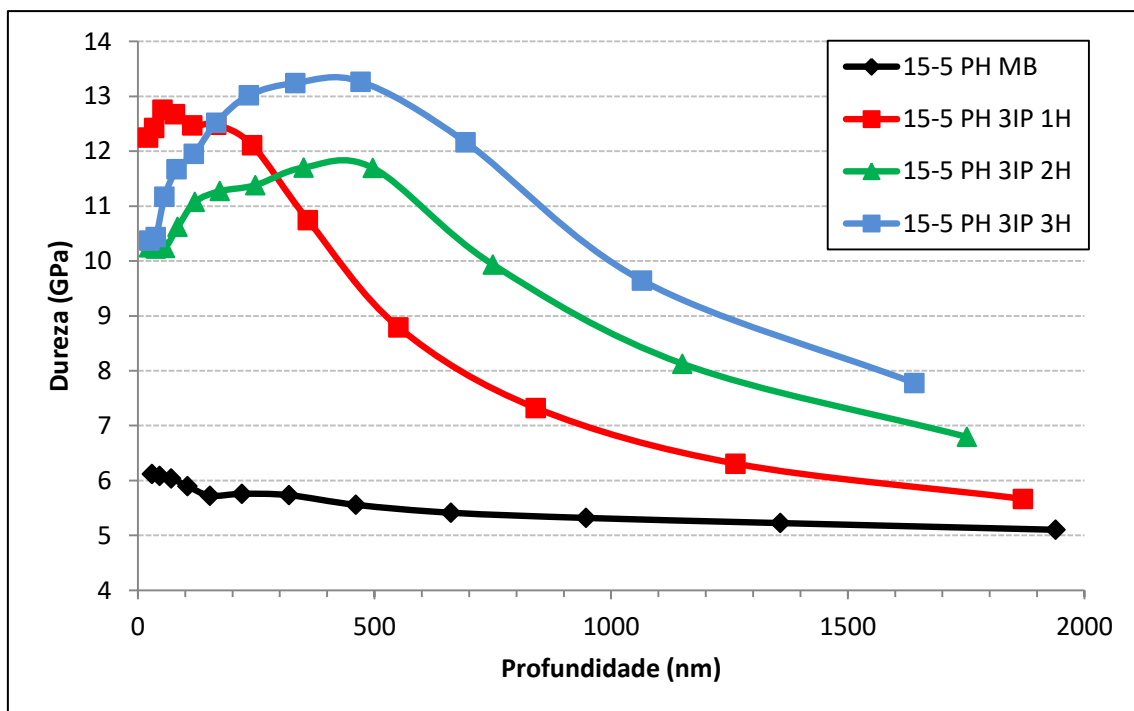
Fonte: (Própria)

Analisando os resultados de rugosidade obtidos pelo ensaio de força atômica, podemos observar que o com tratamento de 3 IP de três horas foi o que obteve maior rugosidade, sendo esta de 307,32 nm.

### 5.1.3. Nanoindentação

Na Figura 15, podemos analisar que a nanodureza é maior em profundidades menores de nanoindentação, esta característica pode ser atribuída as deformações plásticas causadas pelo lixamento e polimento do material.

Figura 15 - Gráfico Dureza vs Profundidade para o aço inoxidável 15-5 PH



Fonte: (Própria)

Analisando no gráfico os materiais tratados com o tratamento 3IP, fica claro que a implantação foi bem sucedida, próximo à superfície do material a nanodureza foi afetada diretamente, fazendo um comparativo entre o material sem tratamento e com tratamento, fica claro a disparidade na diferença de dureza superficial do material, onde nas regiões mais superficiais do material, o ensaio de duas horas de 3IP foi o que obteve o maior valor de dureza.

#### 5.1.4. Microscopia eletrônica de varredura

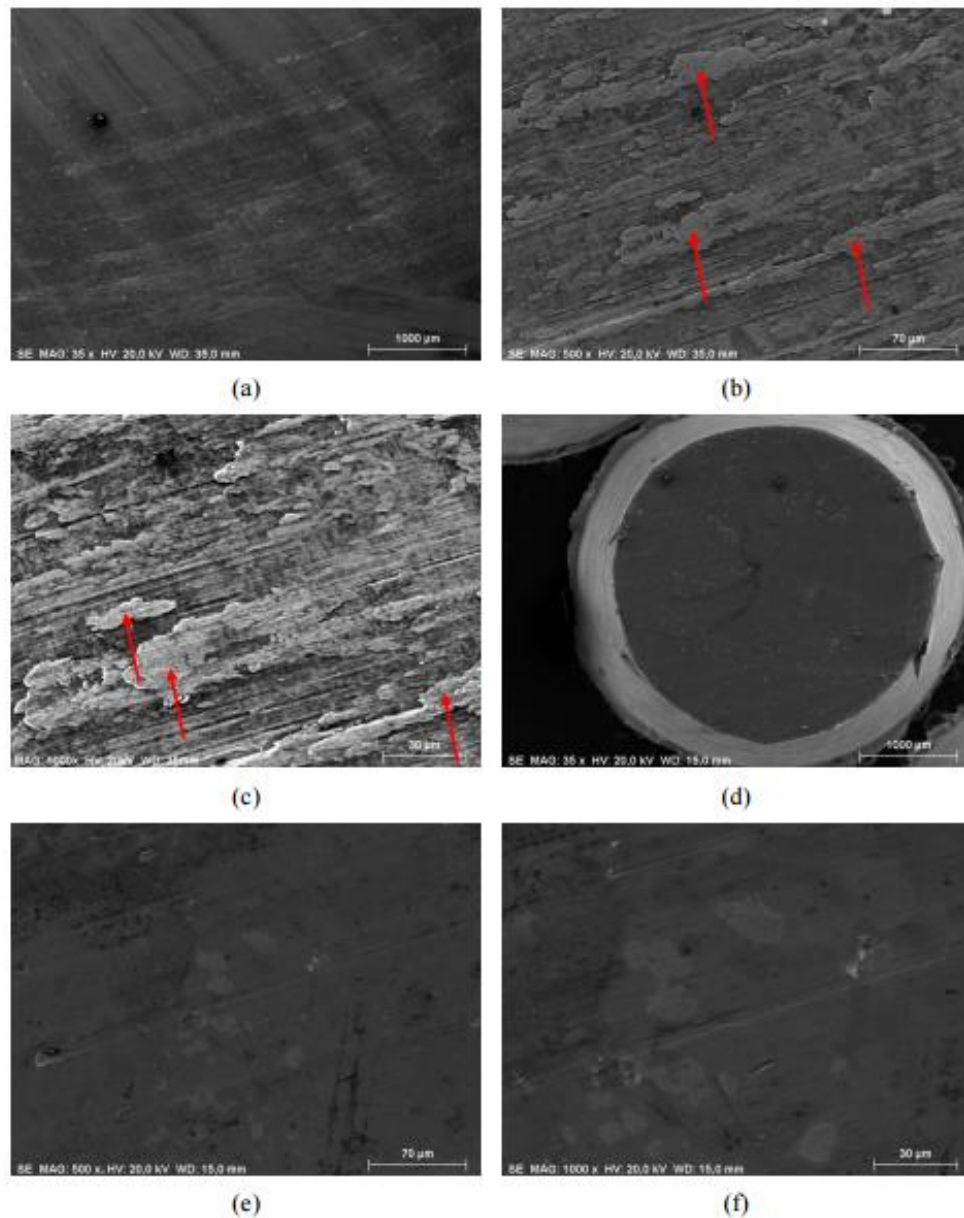
Nas figuras 16, 17, 18 e 19 podemos observar a morfologia do pino e do disco ensaiados nas quatro condições de tratamento respectivamente: metal base, uma hora de 3IP, duas horas de 3IP e três horas de 3IP.

Analisando a figura 16 (a), podemos observar a trilha de desgaste formada no metal base, já nas figura 16 (b) e (c), fica evidente a grande transferência de material que ocorreu do pino no disco (indica pelas setas vermelhas), que fica evidente na análise de EDS feita no pino e no disco:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica; • EDS do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio: 49,09%Fe, 24,69%Cu, 10,30%Cr, 6,19%Zn, 2,73%Ni, 5,65%Al e 1,36%Mn, em % atômica.

Nas figura 16 (d), (e) e (f), podemos analisar a superfície do pino bronze-alumínio 630, o qual tem uma boa homogeneidade na superfície de desgaste, o que evidencia o desgaste adesivo que ocorreu do pino no disco, isto pela diferença de dureza dos dois.

Figura 16 - Morfologia na trilha do disco de aço inoxidável 15-5PH metal base e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Pino: 35x – SE; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

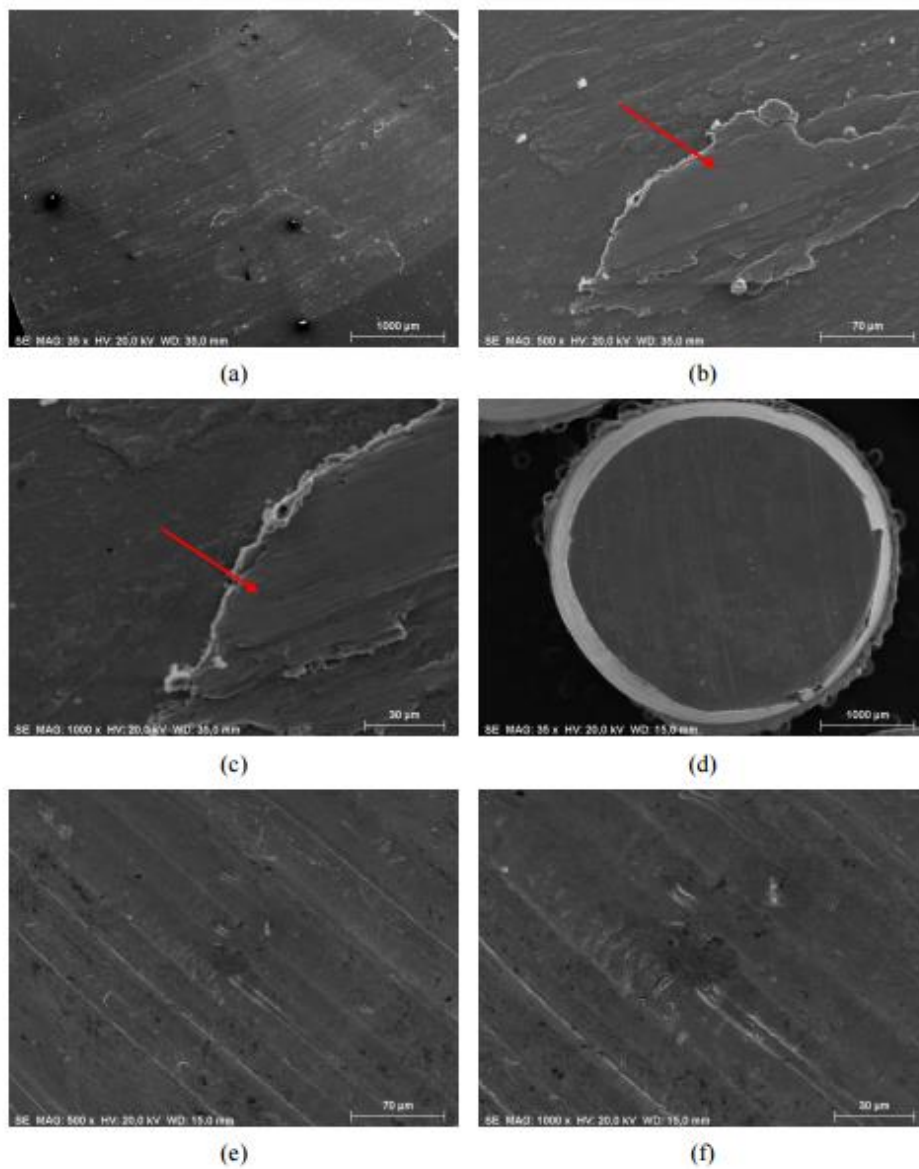
A Figura 17 (a) mostra a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço inoxidável 15-5PH com 3IP 1H. Analisando as Figuras 17 (b) e (c) é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (indicados pelas setas vermelhas). As análises de EDS do pino bronze-alumínio 630 e do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio, são:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

EDS do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio: 7,90%Fe, 59,34%Cu, 1,16%Cr, 16,15%Zn, 0,78%Ni, 12,49%Al e 2,17%Mn, em % atômica.

Nas Figuras 17 (d), (e) e (f), podemos observar que houveram mais ranhuras na superfície do pino que no ensaio com o 15-5 PH metal base, pois com o ensaio de 3IP, a superfície do metal do disco irá modificar-se em relação à dureza e rugosidade, propiciando assim o mecanismo de desgaste abrasivo no material que irá fazer contato com este, sendo assim houveram dois mecanismos principais de desgaste ocorrendo, sendo estes o adesivo e abrasivo.

Figura 17 - Morfologia na trilha do disco de aço inoxidável 15-5PH com 3IP 1H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Pino: 35x – SE; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

Na Figura 17 (a) podemos observar a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço 15-5PH com 3IP 2H.

Através das Figuras 17 (b) e (c) é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (identificados pela seta vermelha). As análises de EDS do pino bronze-alumínio 630 e do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio, são:

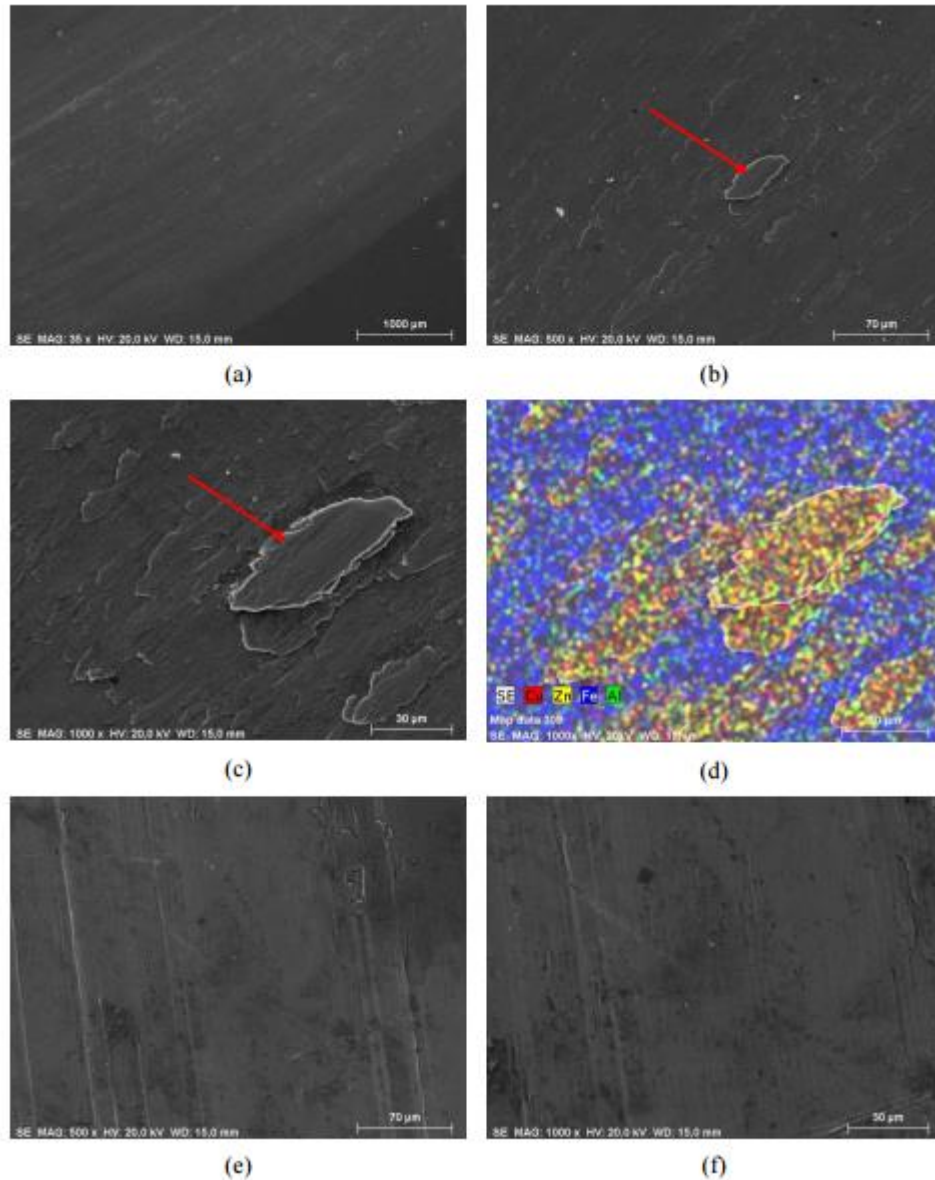
EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

EDS do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio: 61,15%Fe, 14,02%Cu, 13,03%Cr, 3,14%Zn, 3,65%Ni, 4,41%Al e 0,60%Mn, em % atômica.

Na análise de superfície de desgaste foi utilizada a ferramenta chamada MAPPING, esta ferramenta faz um mapeamento de elementos em uma determinada região do material, sendo assim é possível analisar a presença do material constituinte do metal bronze-alumínio 630 na trilha de desgaste do disco, na Figura 17 (d), toda a área azul representa a matriz do aço inoxidável 15-5PH, cuja composição química é basicamente ferro, e a região em relevo, que é o material aderido do pino no disco, apresenta a combinação das cores vermelho (Cu), verde (Al) e amarelo (Zn).

Já nas Figuras 17 (e) e (f), podemos observar à superfície do pino de bronze-alumínio 630 após o ensaio, a superfície deste é bem semelhante da tratada com 3IP por uma hora ranhuras, o que é devido à superfície formada após o ensaio 3IP, porém nesta fica evidente a menor presença de duas horas, entretanto os mecanismos de desgaste atuantes no pino foram os mesmos, adesivo e abrasivo.

Figura 17 - Morfologia na trilha do disco de aço inoxidável 15-5PH com 3IP 2H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Disco: 1000x – MAPPING; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

A Figura 18 (a) mostra a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço inoxidável 15-5PH com 3IP 3H. Através das Figuras 18 (b) e (c) é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (identificados pela seta vermelha), que neste caso, apresenta uma região de aderência bem maior comparado com os parâmetros de implantação de 1 e 2 horas.

As análises de EDS do pino bronze-alumínio 630 e do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio, são:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

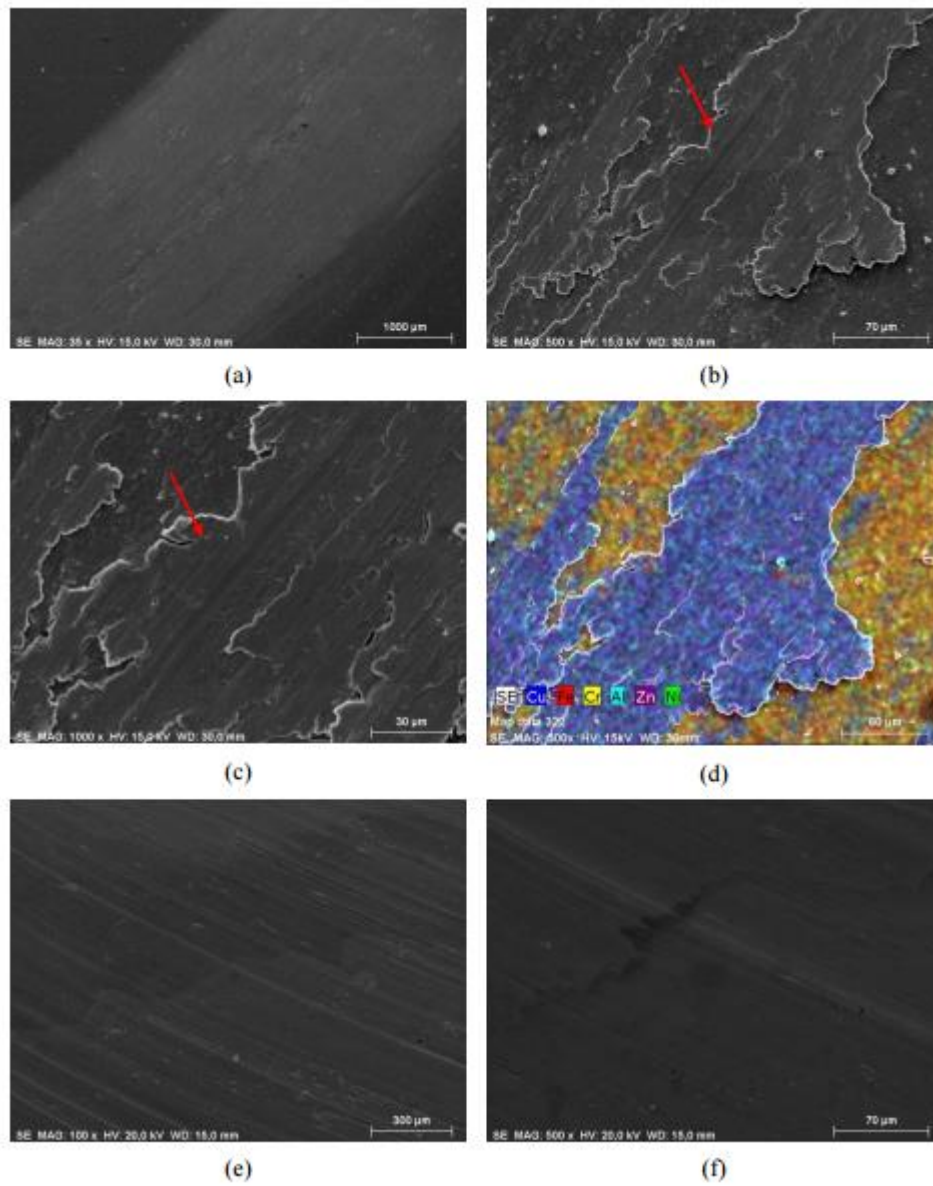
EDS do disco de aço inoxidável 15-5PH na trilha de ensaio: 6,11%Fe, 64,90%Cu, 0,69%Cr, 21,53%Zn, 1,13%Ni, 3,43%Al e 2,21%Mn, em % atômica.

Nesta figura também foi utilizado o MAPPING para caracterizar a adesão do material do pino de bronze-alumínio no aço inoxidável 15-5PH, visualizado na Figura 18 (d). Toda a área laranja representa a matriz do aço inoxidável 15-5PH, cuja composição química é basicamente ferro, níquel e cromo, e a região em relevo, que é o material aderido do pino no disco, apresenta a combinação das cores azul (Cu e Al) e roxa (Zn).

As Figuras 18 (e) e (f) representam a superfície do pino bronze-alumínio 630 após o ensaio de desgaste.

O parâmetro de 3 horas de ensaio foi o que apresentou o resultado menos satisfatório em relação ao desgaste no pino, neste a superfície do pino ensaiado foi bem semelhante a do material ensaiado com o 15-5 PH metal base, onde o mecanismo de desgaste foi predominantemente o de adesão, formando uma camada sem muitas ranhuras na superfície.

Figura 18 - Morfologia na trilha do disco de aço inoxidável 15-5PH com 3IP 3H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Disco: 1000x – MAPPING; (e) Pino: 100x – SE; (f) Pino: 500x – SE.



Fonte: (Própria)

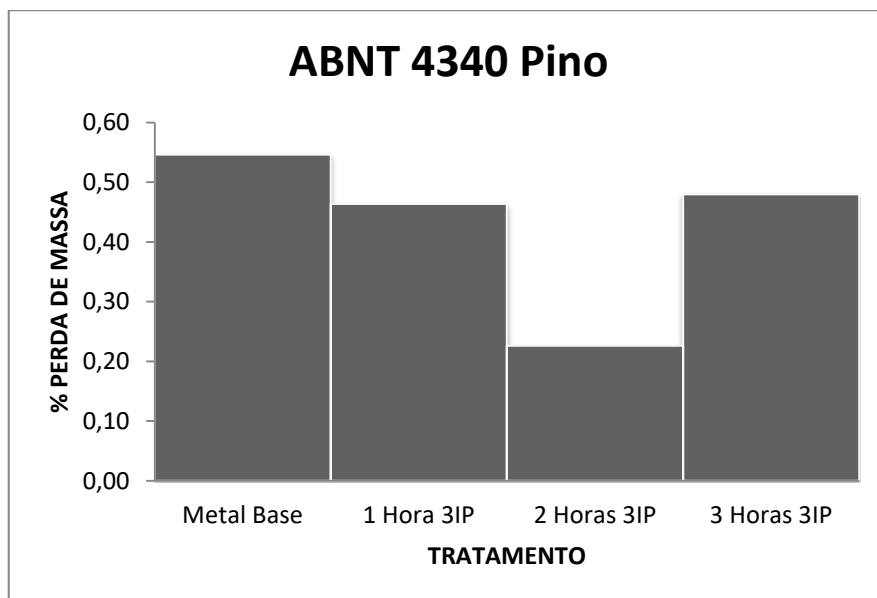
## 5.2. ABNT 4340

### 5.2.1. Ensaio de desgaste

Os ensaios de desgaste foram feitos para 4 diferentes condições do material, sendo estes: metal base, 1, 2 e 3 horas de tratamento de implantação iônica por imersão em plasma, no disco que foi ensaiado.

Analisando a figura 19, podemos observar a perda mássica do pino ensaiado com as quatro diferentes condições do disco.

Figura 19: Perda mássica pino, ABNT 4340



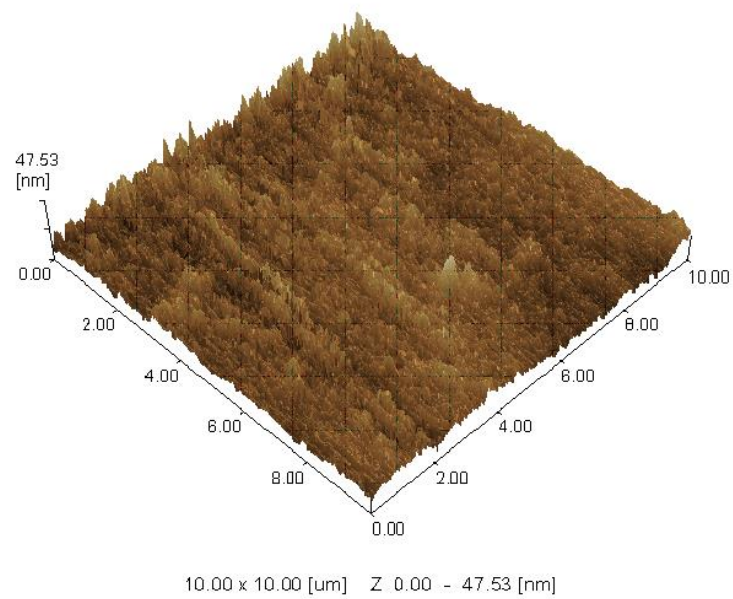
Observando o gráfico de perda mássica do pino, nota-se que a condição mais favorável para minimização do desgaste do material é a de duas horas de tratamento 3IP.

Analisando comparativamente os resultados do ensaio no metal base e com tratamento de duas horas, temos a diminuição de cerca de 0,3% de desgaste do material, que em um cenário de aplicação real, faz com que a vida do material aumente, minimizando uma falha precoce no componente ao qual o material será aplicado.

### 5.2.2. Ensaio força atômica

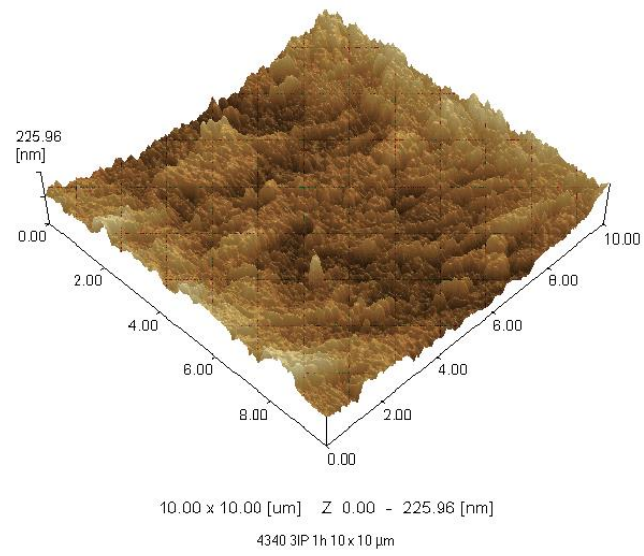
As figuras 20 à 23, mostra as superfícies e rugosidades avaliadas pelo ensaio de força atômica no metal ABNT 4340 em diferentes condições de tratamento superficial.

Figura 20: Resultado força atômica ABNT 4340 metal base



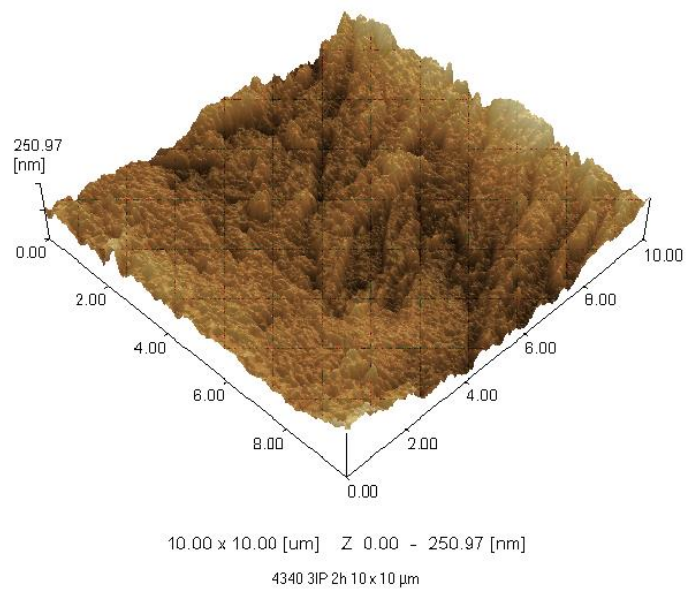
Fonte: (Própria)

Figura 21: Resultado força atômica ABNT 4340 1 hora 3IP



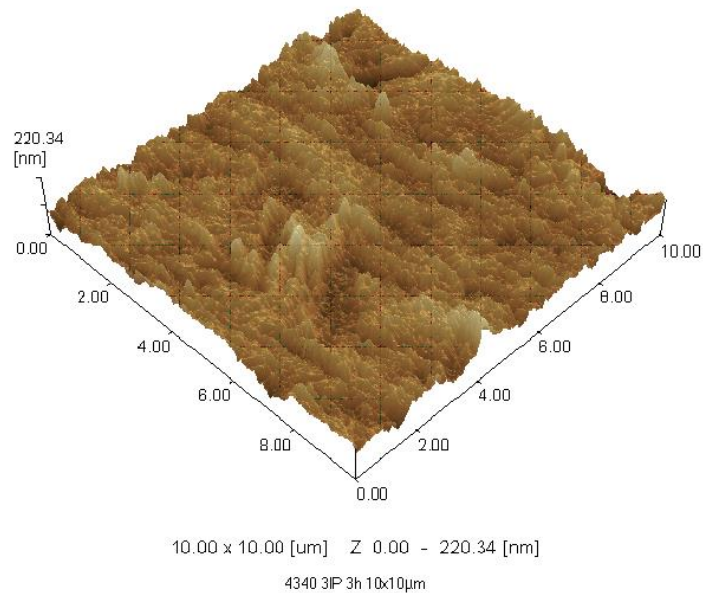
Fonte: (Própria)

Figura 22: Resultado força atômica ABNT 4340 2 horas 3IP



Fonte: (Própria)

Figura 23: Resultado força atômica ABNT 4340 3 horas 3IP



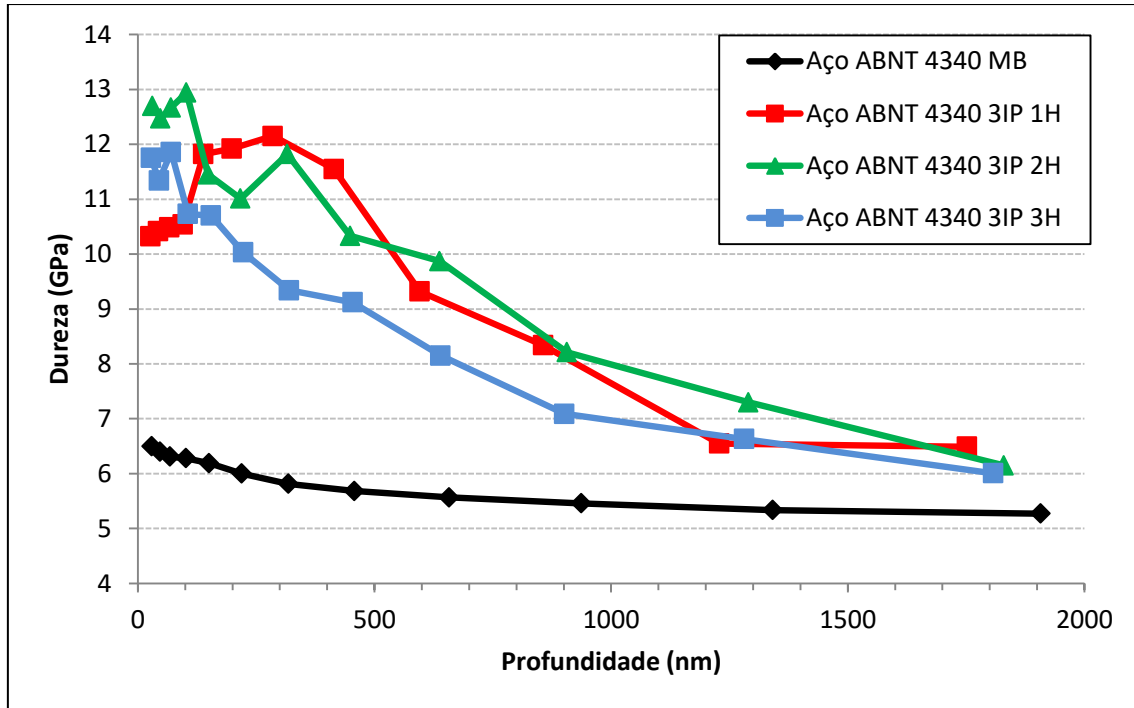
Fonte: (Própria)

Analisando os resultados do ensaio de força atômica temos que a condição com maior rugosidade é a com 2 horas de tratamento 3IP, e como pelo ensaio de desgaste temos que o resultado mais satisfatório para diminuição da perda progressiva de material do pino é também a condição de 2 horas de tratamento, podemos observar que devido à maior rugosidade, menor a área de contato do material do disco com o do pino, gerando assim um melhor desempenho em relação ao desgaste.

### 5.2.3. Nanoindentação

Na Figura 24, podemos analisar que a nanodureza é maior em profundidades menores de nanoindentação, quando esta análise é feita para o metal base.

Figura 24 - Gráfico Dureza vs Profundidade para o aço ABNT 4340



Fonte: (Própria)

Analisando no gráfico os materiais tratados com o tratamento 3IP, fica evidente a implantação de material na superfície do material, pois houve um acréscimo significativo na dureza próximo à superfície do material, onde nas penetrações menores do ensaio de nanoindentação, o ensaio de 3IP com duas horas de duração foi o que obteve maior dureza.

#### 5.2.4. Microscopia eletrônica de varredura

Nas figuras 25, 26, 27 e 28 podemos observar a morfologia do pino e do disco ensaiados nas quatro condições de tratamento respectivamente: metal base, uma hora de 3IP, duas horas de 3IP e três horas de 3IP.

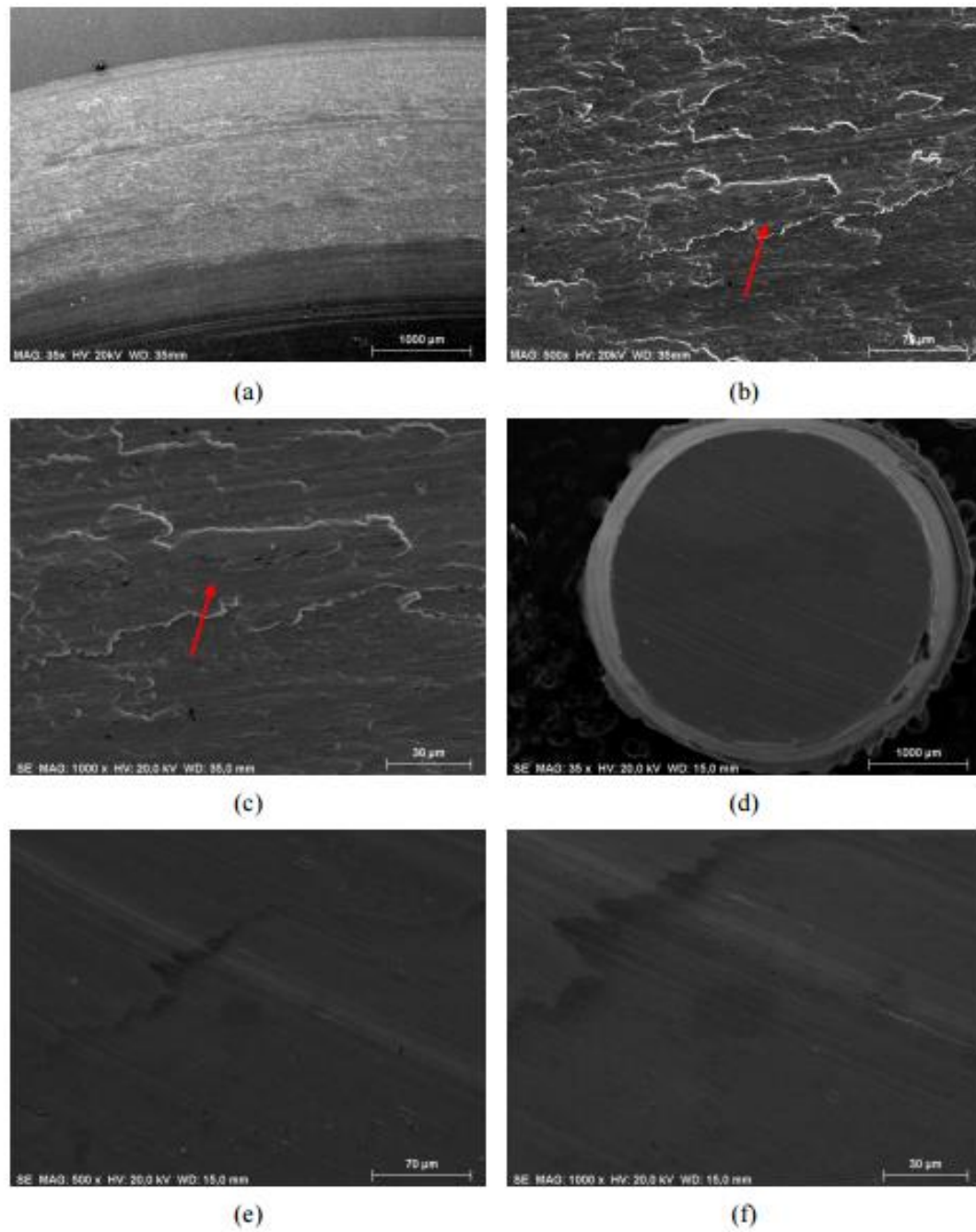
Analisando a figura 25 (a), podemos observar a trilha de desgaste formada no metal base, já nas figuras 25 (b) e (c), fica evidente a grande transferência de material que ocorreu do pino no disco (indicado pelas setas vermelhas), que fica evidente na análise de EDS feita no pino e no disco:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

EDS do disco de aço ABNT 4340 na trilha de ensaio: 1,23%Ni, 58,18%Fe, 1,99%Mn, 6,33%Al, 25,20%Cu e 7,07%Zn, em % atômica.

Nas figuras 25 (d), (e) e (f), podemos analisar a superfície do pino bronze-alumínio 630, o qual tem uma boa homogeneidade na superfície de desgaste, o que evidencia o desgaste adesivo que ocorreu do pino no disco, isto pela diferença de dureza dos dois ser muito alta.

Figura 25 - Morfologia na trilha do disco de aço ABNT 4340 metal base e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Pino: 35x – SE; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

A Figura 26 (a) mostra a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço ABNT 4340 com 3IP 1H. Através das Figuras 26 (b) e (c) é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (identificados pela seta vermelha). As análises de EDS comprovam a adesão do material do pino no disco de aço:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

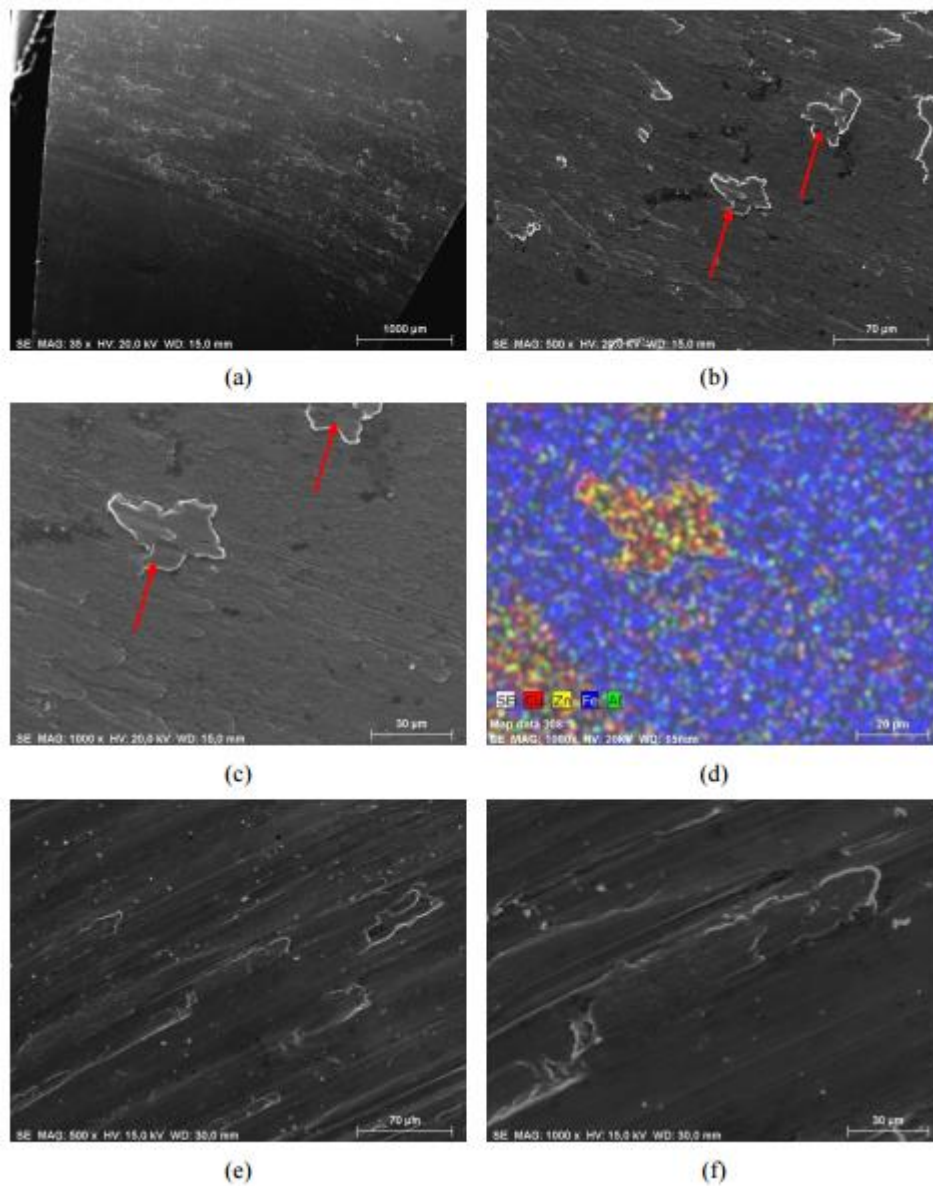
EDS do disco de aço ABNT 4340 na trilha de ensaio: 1,20%Ni, 64,81%Fe, 1,95%Mn, 5,84%Al, 20,02%Cu, 0,67%Cr e 5,50%Zn, em % atômica.

Assim como nas análises do ensaio de desgaste realizado no com o aço inoxidável 15-5 PH, a técnica utilizada para caracterizar a adesão do material do pino de bronze alumínio no aço ABNT 4340 foi a ferramenta MAPPING, como pode ser visto na Figura 26 (d), onde nesta análise, toda a área azul representa a matriz do aço ABNT 4340 cuja composição química é basicamente ferro, e a região em relevo, que é o material aderido do pino no disco, apresenta a combinação das cores vermelho (Cu), amarelo (Zn) e verde (Al).

Fazendo uma comparação da trilha de desgaste do disco de aço ABNT 4340 metal base com o disco de aço ABNT 4340 com 3IP por uma hora, temos que no disco tratado com 3IP 1H houve menos adesão de material do pino. Isto está relacionado com a modificação superficial provocada pelo tratamento 3IP, diminuindo a área de contato entre o pino e o disco.

As Figuras 26 (e) e (f) representam a superfície do pino bronze-alumínio 630, onde ficou evidente que este está com ranhuras profundas, diferente do ensaio feito com o metal base do aço ABNT 4340, este comportamento ocorre por causa das mudanças superficiais de dureza e rugosidade causadas pelo tratamento 3IP. Sendo assim nesta condição houve a atuação do mecanismo de desgaste abrasivo ocorrendo simultaneamente com o desgaste adesivo.

Figura 26 - Morfologia na trilha do disco de aço ABNT 4340 tratado com 3IP 1H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Disco MAPPING: 1000x; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

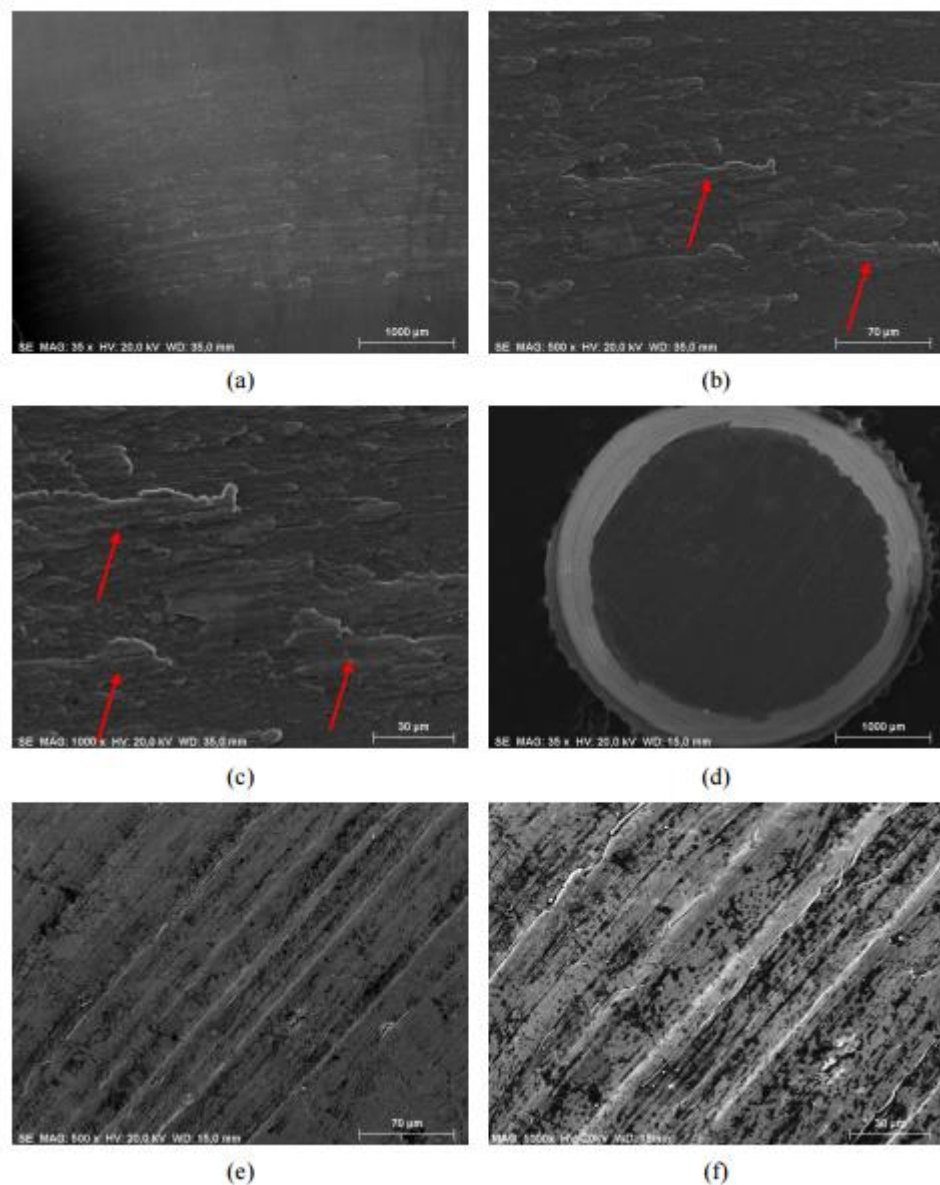
A Figura 27 (a) mostra a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço ABNT 4340 com 3IP 2H. Através das Figuras 27 (b) e (c) também é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (identificados pela seta vermelha). As análises de EDS comprovam a adesão do material do pino no disco de aço:

EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

EDS do disco de aço ABNT 4340 na trilha de ensaio: 1,18%Ni, 67,12%Fe, 1,80%Mn, 4,28%Al, 18,61%Cu e 7,01%Zn, em % atômica.

As Figuras 27 (d), (e) e (f) representam a superfície do pino bronze-alumínio 630 após o ensaio de desgaste. O ensaio de 3IP no aço ABNT 4340 que mais reduziu a perda mássica no pino foi o com duas horas de tratamento, analisando as imagens de microscopia eletrônica de varredura, há claramente uma presença maior de ranhuras no pino bronze-alumínio 630, o que é causado pela presença mais significativa do mecanismo de desgaste abrasivo do que nas duas condições anteriores, sendo assim os mecanismos presentes neste ensaio foram os de abrasão e adesão.

Figura 27 - Morfologia na trilha do disco de aço ABNT 4340 tratado com 3IP 2H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Pino: 35x – SE; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

A Figura 28 (a) mostra a trilha formada pelo pino após o ensaio de desgaste, onde o disco é o aço ABNT 4340 com 3IP 3H. Através das Figuras 28 (b) e (c) é possível visualizar a transferência de material do pino para o disco (identificados pela seta vermelha), que neste caso, apresenta uma região de aderência bem maior comparado com os parâmetros de implantação de 1 e 2 horas. As análises de EDS comprovam a adesão do material do pino no disco de aço:

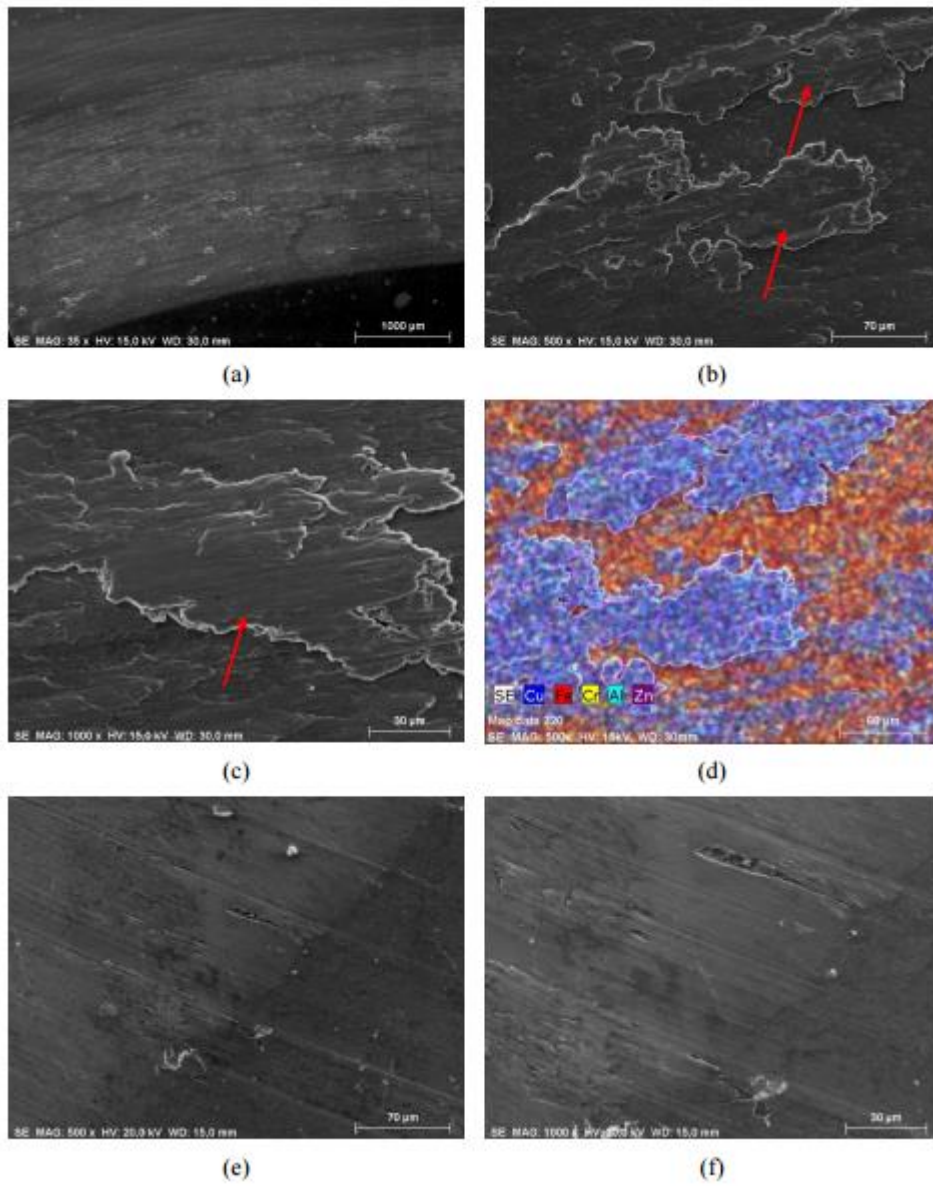
EDS padrão do pino bronze-alumínio 630: 5,10%Al, 2,98%Fe, 2,27%Mn, 67,33%Cu e 22,29%Zn, em % atômica;

EDS do disco de aço ABNT 4340 na trilha de ensaio: 5,77%Fe, 2,16%Mn, 4,00%Al, 66,57%Cu, 0,24%Cr e 21,26%Zn, em % atômica.

A técnica de MAPPING foi utilizada para caracterizar a adesão do material do pino de bronze-alumínio no aço ABNT 4340, visualizado na Figura 28 (d). Toda a área vermelha representa a matriz do aço ABNT 4340 cuja composição química é basicamente ferro, e a região em relevo, que é o material aderido do pino no disco, apresenta a combinação das cores azul (Cu e Al) e roxa (Zn).

As Figuras 28 (e) e (f) representam a superfície do pino bronze-alumínio 630 após o ensaio de desgaste. Fica evidente nestas figuras que as ranhuras foram menores quando comparadas às com ensaio de duas e três horas de 3IP, sendo assim a modificação de rugosidade e dureza no material não foi tão grande quanto nos ensaios apresentados anteriormente nas figuras 26 e 27, mostrando que a adesão foi o mecanismo mais presente neste ensaio, gerando uma maior perda mássica no pino.

Figura 28 - Morfologia na trilha do disco de aço ABNT 4340 tratado com 3IP 3H e no pino bronze-alumínio 630 após ensaio de desgaste. (a) Disco: 35x – SE; (b) Disco: 500x – SE; (c) Disco: 1000x – SE; (d) Disco MAPPING: 1000x; (e) Pino: 500x – SE; (f) Pino: 1000x – SE.



Fonte: (Própria)

## 6 CONCLUSÃO

O tratamento de 3IP é satisfatório para redução de desgaste para estes materiais e confrontando os resultados obtidos nos dois ensaios, podemos afirmar que devido à redução da área de contato entre o pino e o disco, gerado pelo tratamento que traz mudanças na dureza e na rugosidade da superfície do material gerando um resultado muito satisfatório na redução do desgaste do pino de bronze-alumínio.

Em relação à melhor condição para esta aplicação os resultados mostram que no caso de um tratamento de duas horas seria o mais viável para aplicação em relação à perda progressiva de material por contato relativo no aço ABNT 4340, já no aço inoxidável 15-5 PH, o ensaio de 3IP por uma hora foi o que mais reduziu a perda progressiva do pino.

A aplicação deste tipo de tratamento é totalmente recomendável para casos de trens de pouso de avião, com relação ao desgaste, por este ser um processo que não é prejudicial ao meio ambiente, e também tem como resultado uma camada homogênea e bem distribuída, entretanto o alto custo do processo pode ser fator decisivo para aplicação, pois com a tecnologia atual o 3IP é um tratamento muito caro se tornando muitas vezes inviável para algumas aplicações.

## REFERENCIAS

ALLENSTEIN, A. N. **Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável martensítico CA6-mNM nitretado por plasma**. 2007. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BERNARDELLI, E. A. **Tratamento concomitante de nitretação e envelhecimento a plasma do aço inoxidável 15-5 PH**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007

CAMARGO, J. A. M. **A Influência do shot peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 70-50 – T 7451 de uso Aeronáutico**. 2007. 218 f. Tese (Doutorado em Curso de Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá da UNESP, Guaratinguetá, 2007.

CORRÊA, E. O. **Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas**. 2005. 171 f. Tese (Doutorado em Curso de Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

GAHR, K. H. Z. Microestructure and wear of materials. **Tribology series**, v.10, Amsterdam, 1987. 559 f.

LEPIENSKI C. M., ODO G. Y., KUROMOTO N. K. **Introdução às modernas técnicas de medida de propriedades mecânicas de superfícies**. 1998. 120 f. Apostila de curso proferido no 13º CBECIMAT – VI SEMEL, Curitiba, 1998.

MACHADO, R. R. **Padronização da micro e nanodureza por penetração instrumentada**. 2005. 180 f. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2005.

MELLO, C. B. **Modificação das propriedades superficiais de materiais através da implantação de cromo por recoil por meio de implantação iônica por imersão em plasma de nitrogênio**. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, São José dos Campos, 2007.

NUNES, R. A. X. **Abrasão, desgaste e atrito sob deslizamento de recobrimentos preparados por aspersão térmica a partir de PET pós-consumo.** 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Curso de Engenharia de Materiais), Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2008.

PASCOALI, S. **Introdução ao desgaste abrasivo.** 2004. 142 f. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2004.

SCZANCOSKI, J. C. **Propriedades mecânicas e tribológicas de al submetido a nitrocementação por implantação iônica.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

SILVA, J. RIBEIRO, A. **Tratamento de materiais metálicos via implantação iônica por imersão em plasma de nitrogênio em ambiente com baixa concentração de oxigênio.** 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, São José dos Campos, 2010.

TEDESCO, N. R. **Caracterização do comportamento de desgaste de cerâmicas de alumina densa: efeitos de parâmetros do ensaio do tipo pino no disco.** 2010. 231 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

TUSSOLINI, M. **Estudo da aplicação de azóis na inibição da corrosão do aço inoxidável abnt 430 em meio ácido.** 2010. 160 f. Tese (Doutorado em Curso de Química Aplicada), Universidade Estadual do Centro-oeste, Guarapuava, 2010.

VIEIRA, M. S. **Deposição de filmes de ZnO sobre substrato de si via implantação iônica por imersão em plasma e deposição.** 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, São José dos Campos, 2010.

ZAIKA, A. C. **Propriedades mecânicas e tribológicas de aço austenítico 304 submetido à nitretação por: implantação iônica e implantação iônica por imersão em plasma.** 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Ciências com área de Concentração em Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007.