

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**José Fernando Berthoud Junior**

**Estudo de tratamento superficial de Nitretação de  
aços por processo assistido a plasma.**

**Taubaté – SP  
2018**

**José Fernando Berthoud Junior**

**Estudo de tratamento superficial de nitretação de  
aços por processo assistido a plasma.**

Trabalho de Graduação apresentado para  
obtenção do Certificado de Graduação do  
curso de Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

**Taubaté – SP  
2018**

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

Ficha

B542e

Berthoud Junior, José Fernando Berthoud Junior  
Estudo de tratamento superficial de nitretação de aços por  
processo assistido a plasma / José Fernando Berthoud Junior. -  
-2018.  
29 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté,  
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara, Departamento  
de Engenharia Mecânica.

1. Aquisição do Plasma. 2. Controle de Pressão. 3.  
Nitretação. I. Título. II. Graduação em Engenharia  
Mecânica.

CDD – 547.26

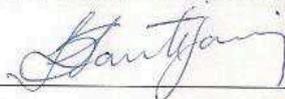
catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

José Fernando Berthoud Junior

Estudo de tratamento superficial de nitretação de aços por processo assistido a plasma.

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani  
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Evandro Luis Nohara  
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Me. Ivair Alves dos Santos  
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

07/12/2018

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados.

Ao meu orientador, *Prof.(Dr.) Evandro Luis Nohara* por todo o incentivo e motivação na orientação deste trabalho.

Aos meus pais *Irenice Fátima de Souza Berthoud e José Fernando Berthoud*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Ao Professore Ivair Alves dos Santos por aceitar compor a banca examinadora.

Às funcionárias da Secretaria pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

## **RESUMO**

Este trabalho teve por objetivo estudar a nitretação por processos assistidos a plasma, para obtenção de um aumento da resistência ao desgaste e corrosão, bem como um aumento da sua dureza superficial. O trabalho foi realizado nas dependências do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU, em uma câmara de processos assistidos a plasma, equipadas com bombas de vácuo mecânica, roots e difusora, instrumentação de monitoramento e controle de pressão e fontes de potência com capacidade de realizar tratamentos superficiais de nitretação. O estudo envolverá a determinação dos parâmetros de estabilização do plasma, a construção e o isolamento de um suporte para os materiais a serem nitretados, estabelecimento das condições de nitretação. Com o presente trabalho espera-se um aprendizado na área de tratamento superficiais por processo assistidos a plasma, bem como aprendizado no ajuste e construção de setup's para tratamentos superficiais.

**Palavras-chave:** Nitretação. Controle de pressão. Aquisição do plasma.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis was to study plasma assisted nitriding and obtain an increase in wear resistance and corrosion, as well as an increase in surface hardness. The work was developed in the laboratory of materials of the Department of mechanical engineering department of UNITAU, in a chamber of plasma assisted processes, equipped with mechanical vacuum pumps, roots and diffusers, instrumentation of monitoring and pressure control and power sources with capacity to perform surface nitriding treatments. The study will involve the determination of the plasma stabilization parameters, the construction and the isolation of a support for the materials to be nitride and the establishment of the nitriding conditions. With the present work, it is expected to learn about the area of surface treatment by processes assisted to plasma, as well as learning in the adjustment and construction of setups for surface treatment.

**KEYWORDS:** Nitriding. Pressure of control. Acquisition of plasma

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Nitretação a Gás .....	17
Figura 2 - Processo de Nitretação Líquida .....	18
Figura 3 - Processo de Nitretação a Plasma .....	20
Figura 4 - Visão geral da Câmara de Processos assistidos a Plasma .....	21
Figura 5 - Fio rígido para condução elétrica, tubo de vidro para isolamento e suporte para colocar o material a ser nitretado .....	23
Figura 6 - Estrutura metálica da câmara .....	23
Figura 7 - Visão do interior da câmara com o plasma localizado em torno do suporte de alumínio .....	26
Figura 8 - Interior da câmara, com suporte afim de controlar a saída de gás .....	27

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,050 Torr .....24
- Tabela 2 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,050 Torr .....25
- Tabela 3 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,2450 Torr .....25
- Tabela 4 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão 0,3551 Torr .....26
- Tabela 5 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,3650 Torr .....27

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

UNITAU      Universidade de Taubaté

DC      Corrente Contínua

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere (Corrente)
V	Volts (Tensão)
mm	Milímetros
mTorr	MiliTorr (Pressão)
m	Metros
°C	Graus Celsius (Temperatura)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO GERAL .....	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	VANTAGENS DO PROCESSO .....	16
2.2	APLICAÇÃO .....	16
2.3	PROCESSOS.....	17
2.3.1	Nitretação Gasosa ou Nitretação a Gás .....	17
2.3.2	Nitretação Líquida ou Nitretação a Banho de sal .....	18
2.3.3	Nitretação por Plasma .....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
3.1	EQUIPAMENTOS .....	21
3.2	MATERIAIS DE CONSUMO.....	22
3.3	METODOLOGIA.....	22
4	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	
	<b>2Error! Bookmark not defined.4</b>	
5	CONCLUSÃO.....	28
	REFERÊNCIAS.....	29

## 1. INTRODUÇÃO

A nitretação é um processo tecnológico de grande importância para a melhoria das propriedades físicas e/ou químicas inerentes do estado superficial de ligas metálicas, tais como, resistência ao desgaste, à corrosão e fadiga. Os progressos recentes no processo de nitretação, especialmente na nitretação a plasma, tem desenvolvido a faixa de aplicações para praticamente todos os tipos de ligas ferrosas, ligas de alumínio e ligas de titânio. A nitretação a plasma exhibe, ainda, uma série de benefícios em relação aos processos apresentados convencionais envolvendo (nitretação gasosa e líquida), tais como, o caráter não poluente, as baixas temperaturas necessárias (no caso de ligas ferrosas, tão baixas quanto 350°C) para o tratamento adequado de componentes de aço e a chance de maior controle sobre as qualidades físicas e químicas das camadas nitretadas concebidas (ALEXANDRE, 2000).

Um dos maiores mistérios nas indústrias, independente do ramo, concilia ser o desgaste de peças e equipamentos que ocorre devido ao movimento e atritos entre componentes, como por exemplo em eixos, engrenagens, válvulas, matrizes e pistões. Como consequência do desgaste de materiais, grandes custos com manutenção acontecem na indústria, tornando-se muitas vezes mais intrigante economicamente empregar em materiais especiais que disponham excelente resistência ao desgaste (VIVIANE, 2017).

O desgaste é dividido em três tipos:

1) Desgaste Metálico, podendo ser por deslizamento com lubrificação, como eixo em mancais, ou sem lubrificação, como parafusos e porcas. O desgaste pode ser por rolamento com lubrificação, como eixos em mancais de rolamento, e sem lubrificação como rodas sobre trilho.

2) Desgaste abrasivo, podendo acontecer em meio úmido ou seco, como por exemplo em ferramentas de manejos de terras (arado, pás carregadeiras e etc.), em alguns tipos de britadores de minério ou ainda em rotores de bombas de jatos de areia.

3) Desgaste por erosão, podendo ocorrer em turbinas, bombas e tubulações por onde circulam gases combustíveis ou não, líquidos e vapores.

O processo de nitretação é largamente utilizado para elevar a resistência a corrosão de superfícies metálicas. A corrosão pode ser estabelecida como um ataque gradual e contínuo de metal por parte do meio circunvizinho, com meio químico, líquido ou gasoso. Como consequências das reações químicas entre metais e elementos não metálicos presentes nesse meio, ocorre a mudança de forma gradual do metal em um ou em vários compostos que geralmente podem ser hidróxidos, óxidos ou sais (RODOLFO, 2010). A resistência à corrosão de superfícies nitretadas pode ser explícita pela constituição da camada de nitretos (compostos) na área da peça que atuam como uma barreira difusional, preservando contra a ação de meios corrosivos. (ALEXANDRE, 2000)

Outra aplicação de superfícies nitretadas abrange o aumento da resistência a fadiga. O motivo fundamental do aumento da resistência a fadiga dos aços nitretados deve-se ao fato de que o método introduz tensões residuais de compressão na superfície do aço, além da camada nitretada apresentar elevada resistência mecânica. Com a produção da camada de compostos, e precipitados na camada de difusão (distorção do reticulado) são concebidas tensões residuais compressivas nas camadas mais externas do material. Estas tensões compressivas reduzem a magnitude das tensões efetivas geradas na peça em trabalho, aumentando sua resistência à fadiga. As características de aços baixa liga nitretados a plasma em ensaios de fadiga de flexão rotativa foram investigados por Bell e Loh, Nestes estudos descobriu-se que o limite de fadiga eleva com o aumento da profundidade de camada, e que as tensões residuais compressivas na camada contribuíram para melhorias no comportamento em fadiga e, devido as tensões residuais atrativas no núcleo, as inclusões na interface camada/núcleo passam a exercer uma influência negativa pelo incentivo à nucleação das iniciações de trincas de fadiga (ALEXANDRE, 2000).

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de nitretação a plasma, para obtenção de camada nitretada no aço 1020.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o processo de nitretação por processos assistidos a plasma a frio.
- Adequar o Isolamento elétrico do porta-amostra na câmara de plasma, para proporcionar o processo de nitretação a plasma.

- Introduzir sistema de aquecimento no porta-amostra para o processo de nitretação a plasma.
- Operacionalizar a câmara de processos a plasma para atingir as condições da nitretação a plasma, abrangendo a pressão utilizada, densidade de corrente, voltagem e fluxo do gás nitrogênio.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No fim do século XIX, quando foi averiguado o aumento da dureza superficial de ferros e aços proporcionado por átomos de nitrogênio, foi quando sucedeu o desenvolvimento inicial do processo de nitretação. A partir da década de 1920, pesquisadores alcançaram a redução da fragilização da camada exterior com a redução das temperaturas de tratamento, o que transformou o processo aplicável em escala industrial.

Os parâmetros do processo de nitretação, assim como a seleção do tipo de processo realizado afetam a composição e a microestrutura da camada nitretada. Temperaturas mais elevadas formam nitretos maiores e mais grosseiramente distribuídos, enquanto temperaturas mais amenas produzem nitretos distribuídos de maneira mais ordenada. A profundidade da camada nitretada, pode ser aumentada com a elevação da temperatura ou com a ampliação da duração do processo. O aumento da quantidade de elementos formadores de nitretos na peça aumenta a dureza da camada branca e diminui a profundidade da camada nitretada.

### 2.1 VANTAGENS DO PROCESSO

Entre as vantagens da nitretação podem ser citados:

- Dureza elevada com alta resistência ao desgaste.
- Alta resistência à fadiga e baixa sensibilidade ao entalhe.
- Melhor resistência à corrosão.
- Alta estabilidade dimensional.

### 2.2 APLICAÇÃO

Os processos de nitretação são empregados, por ordem de importância, no tratamento de metais ferrosos, metais refratários e, mais recentemente, no alumínio. O processo de nitretação de superfícies utiliza-se, entre outras, à indústria mecânica,

automotiva, hidráulica, deformação de metais, forjaria; siderúrgica, biomédica e alimentação. O processo é aplicado no tratamento de moldes de injeção de plásticos, peças automotivas (válvulas, engrenagens, pistões, etc.), moldes de extrusão de alumínio, ferramentas de corte e usinagem de metais, punções de matrizes para corte em geral, tratamento de próteses, etc (FAGNER, 2010).

## 2.3 PROCESSOS

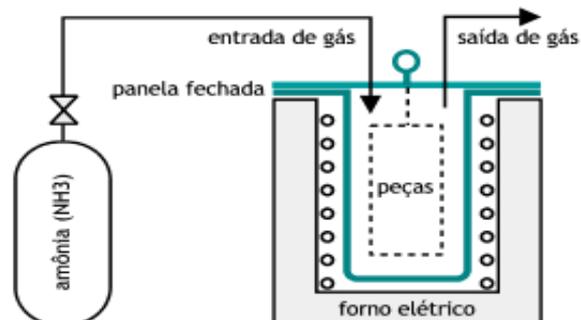
O processo de nitretação é desdobrado em variados tipos, como: nitretação gasosa ou a gás, nitretação a banho de sal ou nitretação líquida, nitretação por plasma ou iônica.

### 2.3.1 Nitretação Gasosa ou Nitretação a Gás

Na nitretação a gás, o nitrogênio ativo, que irá difundir no material a ser nitretado, é gerado pela decomposição da amônia em temperaturas da ordem de 500°C – 600°C. Quando a superfície chega a um certo nível de saturação de nitrogênio, nitretos são criados através do mecanismo de nucleação e crescimento, demandando um determinado tempo de incubação. O nitrogênio irá difundir para o interior do substrato devido ao gradiente de concentração química. A figura 1 demonstra um esquema básico do processo de nitretação gasosa

Os aços para nitretação a gás são, geralmente, aços-liga, envolvendo alumínio, cromo, vanádio e molibdênio. Aços carbono sem elementos liga não são utilizados na nitretação a gás porque a camada de compostos criada é muito frágil e desprende-se com facilidade. A temperatura de revenido deve ser suficientemente elevada para garantir equilíbrio estrutural à temperaturas de nitretação, sendo geralmente fixada pelo menos 25°C acima da temperatura máxima utilizada na nitretação.

**Figura 1 – Processo de Nitretação a Gás**



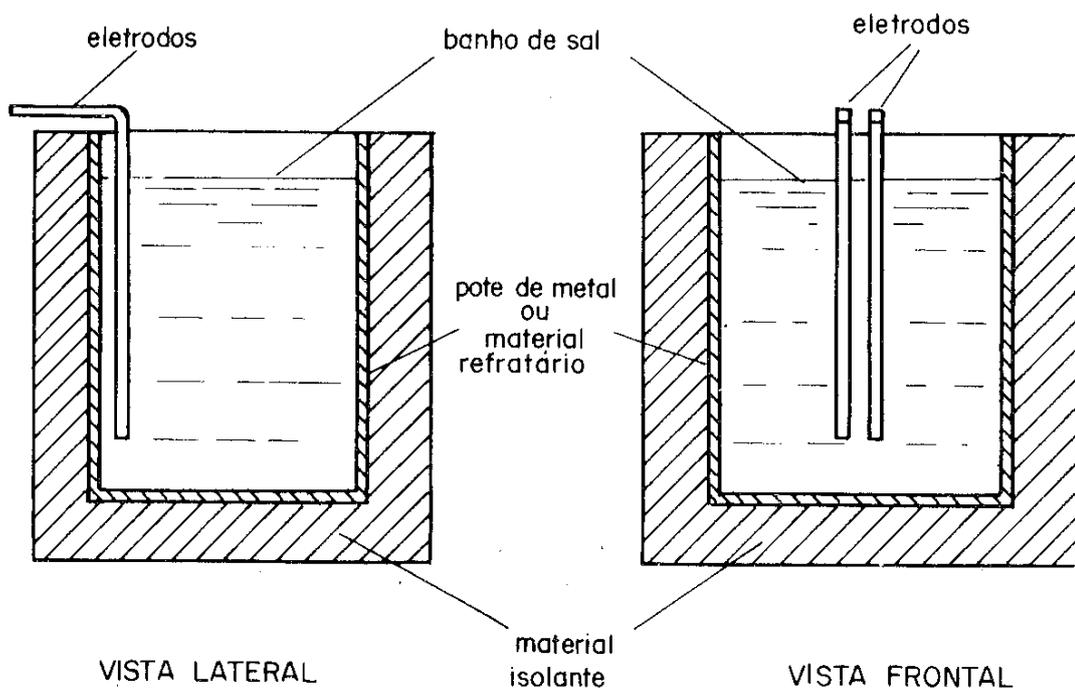
Fonte – Alan (2014)

### 2.3.2 Nitretação Líquida ou Nitretação a banho de sal

A nitretação líquida tem um progresso mais recente que a nitretação a gás, na figura 2 demonstra um esquema básico do equipamento utilizado no processo de nitretação líquida. Na cementação em banho de sais o meio líquido é constituído por cianetos fundidos, sendo um banho comercial típico constituído de uma mistura de sais de sódio e potássio, com sais de sódio com concentração de 60 a 70% em peso da mistura total, e os sais de potássio com concentração de 30 a 40%. A faixa de temperaturas é aproximadamente igual a usada na nitretação a gás, ou seja, de 500 a 575°C. Uma desvantagem deste processo é a necessidade de tratamento adequado dos resíduos gerados. Se não bem-disposto, os resíduos podem conceber uma poluição elevada no meio ambiente.

De um modo geral a nitretação líquida é mais eficiente que a gasosa e consente em obter, em tempos bem menores, camadas de espessura similares. Porém, quando pretende-se uma camada mais profunda, deve-se preferir a nitretação gasosa. Segundo Thelning, a duração do tratamento torna restrito na nitretação líquida devido a formação de poros que tendem a aumentar com o tempo de tratamento (ALEXANDRE, 2000).

Figura 2 – Processo de Nitretação Líquida



Fonte: Walter (2012)

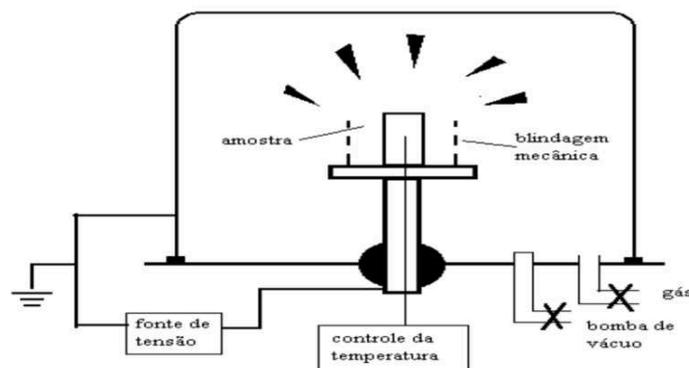
### 2.3.3 Nitretação por Plasma

O elemento a ser tratado fica conectado ao cátodo e a câmara do reator pode ser utilizada como ânodo. Desta forma é obtida e mantida uma descarga elétrica incandescente ("*glow discharge*"), através da qual íons são acelerados pelo campo elétrico e bombardeiam a peça (cátodo) com alta energia cinética, elevando a temperatura até valores propícios para a difusão do nitrogênio. Como mostrado na figura 3, um esquema básico do processo. Os íons gerados ao atingirem o cátodo envolvem, entre outros, dos seguintes eventos: pulverização da superfície, adsorção gasosa e difusão de nitrogênio no substrato. O plasma equivale de partículas eletricamente carregadas, isto é, íons e elétrons. O estado de plasma é obtido pela ionização dos átomos ou moléculas do gás. Num processo puramente térmico, este estado pode ser estabelecido somente pelo aquecimento até algumas centenas de milhares de graus Kelvin. Se, no entanto, a eletricidade é empregada, este estado pode ser facilmente alcançado, como na chamada descarga elétrica incandescente (ou descarga elétrica em baixa pressão) (ALEXANDRE, 2000). Com a aplicação da corrente elétrica no sistema, pode ser gerado arco elétrico. O arco elétrico é estabelecido como um feixe de descargas elétricas formadas entre dois eletrodos ou condutores de corrente elétrica, ao aproximar das laterais metálicas é o suficiente para que os elétrons vindos do eletrodo negativo (cátodo) colidam com as moléculas e átomos do gás, criando um condutor de corrente devido à ionização. Este arco elétrico ocorre devido à baixa pressão dentro da câmara e a proximidade da mesma.

A temperatura de uma determinada área da carga é estabelecida no equilíbrio entre a energia fornecida pelo bombardeamento de íons e átomos neutros rápidos e pela energia perdida por condução, convecção e radiação. A contribuição da convecção seria desprezível devido às baixas pressões utilizadas (1-10 Torr). A energia perdida depende de inúmeros fatores, tais como, a relação entre o volume das peças para volume da câmara, distribuição das peças no interior da câmara, distância cátodo/ânodo, isolação das paredes da câmara, etc. A eficiência da transformação da densidade de potência em energia térmica na superfície das peças também varia em função do gás de processo, pressão, material das peças e superfície. Além disso, a densidade de potência pode ter pequenas variações em diferentes regiões em função da geometria e distância cátodo/ânodo. Como o aquecimento é gerado na superfície das peças, quanto maior a relação área

superficial das peças por volume, temperaturas mais elevadas podem ser atingidas mais rapidamente. Para peças volumosas tempos muito longos para o aquecimento da carga de trabalho, no caso em que é usado somente o plasma como fonte geradora de calor, representam uma dificuldade do processo. Nestes casos e também para uniformizar a temperatura da carga de trabalho distribuída na câmara é recomendável a utilização de fontes auxiliares de geração de calor. É indicado, que para um tratamento eficiente e com excelente reprodutibilidade é necessária uma boa cobertura de todas as peças pelo plasma, com um cuidadoso controle da temperatura e uma densidade de corrente suficientemente alta. Com densidades de corrente muito baixas uma alta dispersão dos resultados pode ser esperada. A formação de arcos elétricos representa um inconveniente, pois torna o plasma instável e estes arcos mesmo que de curta duração podem causar danos às superfícies das peças devido a concentração da energia em uma pequena região (às vezes pontual) específica da peça. O uso do plasma pulsado pode reduzir este problema, além de apresentar benefícios na prevenção do cátodo. A possibilidade de que a descarga incandescente anômala se torne um arco estável existe devido ao fato que, quando trabalha-se na região próximo a altas densidades de corrente, um aumento localizado da densidade de corrente, mesmo que pequeno, levaria a formação de arcos. Quando a temperatura das peças é alta ou a pressão é baixa, o intervalo de densidade de corrente para a descarga anômala é maior, levando a uma melhor estabilidade do plasma. No entanto, a taxa de aquecimento é baixa e a penetração do plasma menor. Para facilitar a operação do processo é desejável ter-se esta situação durante o período de aquecimento (ALEXANDRE, 2000).

**Figura 3 – Processo de Nitretação a Plasma**



Fonte: Alves (2011)

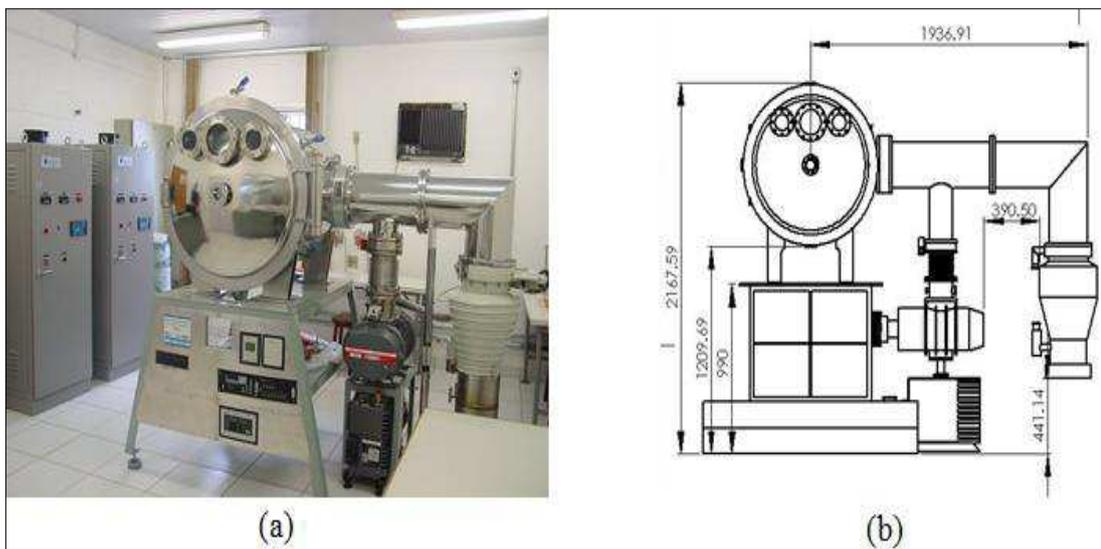
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 EQUIPAMENTOS

Na Figura 4 está mostrada uma visão geral da Câmara de Plasma, constituída de aço inox com diâmetro interno de 0,9 m e comprimento interno de 1,0 m, onde estão instalados os seguintes equipamentos:

- a) 1 Bomba de vácuo tipo Roots, marca Edwards Vacuum, modelo 1200IND
- b) 1 Bomba de vácuo tipo Mecânica, marca Edwards Vacuum, modelo E2M80
- c) 1 Bomba de vácuo tipo Difusora, marca Edwards Vacuum, modelo Diffstak 250/2000
- d) 1 Controlador de Pressão Edwards TIC conectado a 3 medidores de pressão Edwards Pirane
- e) 1 Controlador de Pressão MKS 600 series conectado a 1 medidor de pressão Edwards Baratron e a Throttle Valve.
- f) 1 Controlador de fluxo MKS Type 247 conectado a 4 Controladores de fluxo de massa MKS
- g) 1 Medidor de Espessura Edwards FTM7
- h) 1 Fonte de potencia pulsada Plasma Liits PS10
- i) 1 Fonte de potencia continua Plasma Liits S10

**Figura 4. (a) Visão geral da Câmara de Processos assistidos a Plasma instalada no Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU. (b) Dimensões da câmara.**



Fonte: Felipe (2013)

### 3.2 MATERIAIS DE CONSUMO

- a) Gás nitrogênio com 99,9% de pureza
- b) Substrato de aço 1020
- c) Acetona P.A.
- d) Luvas descartáveis
- e) Papel toalha

### 3.3 METODOLOGIA

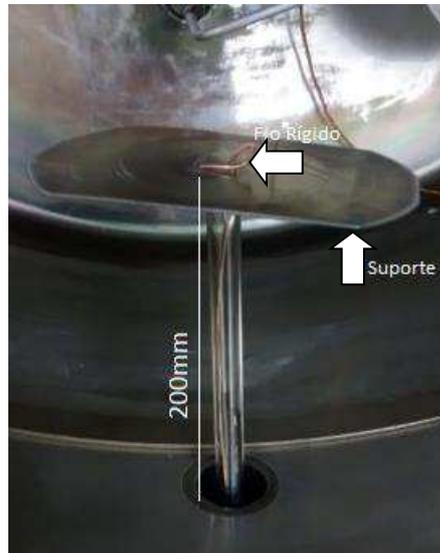
O processo de nitretação por processos assistidos a plasma será realizado pela determinação das seguintes variáveis envolvendo a estabilização do plasma:

- a) pressão de operação do plasma;
- b) fluxo de gás nitrogênio e hidrogênio no interior da câmara de deposição;
- c) voltagem e corrente;
- d) densidade de corrente.

Para realizar o estudo do processo de Nitretação a plasma foi realizado alguns testes envolvendo o controle dos parâmetros pressão, tensão e corrente no interior da câmara, com o objetivo de obter o quarto estado da matéria - plasma. Após a criação de vácuo na câmara foi injetado Argônio, e então foi aplicado uma corrente para que fosse gerado o plasma. Para evitar a formação de arcos elétricos, foi utilizada uma fonte de potência com corrente pulsada.

Na figura 5 pode-se observar que para aplicar corrente na câmara foi colocado um fio rígido, dentro do tubo de vidro, em uma das hastes condutoras de eletricidade, conectando ao suporte com diâmetro de 14mm para ser colocado o material a ser nitretado, como indicado pela seta. No interior da câmara, como não há material polimérico, foi introduzido um tubo de vidro, com uma dimensão de 200mm de altura, a qual isola as duas hastes de condução elétrica de toda parte estrutural da câmara, para evitar a formação de arco elétrico.

**Figura 5. Fio rígido para condução elétrica, tubo de vidro para isolamento e suporte para colocar o material a ser nitretado.**



Fonte: UNITAU (2018)

Na figura 6 mostra toda parte estrutural da câmara e seu interior.

**Figura 6. Estrutura metálica da câmara.**



Fonte: UNITAU (2018)

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os dados de corrente de entrada no modo DC, corrente lida e tensão registradas na fonte de potência, além da observação da presença ou não de plasma no interior da câmara, na pressão de 0,050 Torr. Pelos dados obtidos, pode-se observar que variando a corrente de entrada 0,5 a 0,9 A, a corrente lida permaneceu igual a zero e a tensão lida em 5 V. Quando foi aplicada uma corrente de entrada de 1,0 A, a tensão subiu até o valor máximo fornecido pela fonte de potência, e sem a presença de plasma. Como deve ser evitado operar a fonte de potência no seu valor máximo de voltagem, a pressão de trabalho deve ser alterada, para que se obtenha um valor de corrente elevado, por exemplo, de 2 a 7 A, bem como uma voltagem entre 200 a 700 V.

**Tabela 1 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,050 Torr**

<b>Corrente de entrada (A) no modo DC</b>	<b>Corrente lida (A)</b>	<b>Tensão lida (V)</b>	<b>Observação</b>
0,5	0,0	5	Sem Plasma
0,6	0,0	5	Sem Plasma
0,7	0,0	5	Sem Plasma
0,8	0,0	5	Sem Plasma
0,9	0,0	5	Sem Plasma
1,0	0,0	1011	Sem Plasma

**Fonte: Do Autor**

Como no experimento da Tabela 1 não foi obtido plasma, o passo seguinte foi trocar o modo da fonte de potência para corrente pulsada, com pulsos com duração de 100 microsegundos, com intervalo entre os pulsos de 100 microsegundos, para evitar a formação de arco elétrico no interior da câmara, uma vez que no experimento anterior a voltagem chegou a mais de 1000 V. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos com corrente pulsada variando entre 1,0 a 3,0 A, com o mesmo valor de pressão. corrente lida também aumentou chegando a uma corrente máxima de 3,32 A. A Tensão também aumentou, chegando a 80 V, porém, mesmo com tensões relativamente baixa, corrente e pressão controlada, não foi possível obter plasma, devido a baixa pressão dentro da câmara.

**Tabela 2 - Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,050 Torr**

<b>Corrente de entrada (A) no modo DC</b>	<b>Corrente Lida (A)</b>	<b>Tensão Lida (V)</b>	<b>Observação</b>
1,0	1,19	13	Sem Plasma
1,5	1,67	22	Sem Plasma
2,0	2,14	35	Sem Plasma
2,5	2,69	56	Sem Plasma
3,0	3,32	80	Sem Plasma

**Fonte: Do Autor**

Visto que na tabela 2 não foi possível obter plasma, foi necessário aumentar a pressão da câmara, controlando a 0,2450 Torr, com pressões baixas de 0,2 A, já foi possível obter plasma, então o segundo passo foi aumentar a corrente para que a tensão chegasse a um ponto desejável. Foi aplicado 0,4 A e a corrente lida chegou a 0,2 A, porém, a tensão subiu disparadamente a 935 V, e pouco menos de 2 minutos a tensão chegou ao máximo da máquina.

**Tabela 3 – Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,2450 Torr**

<b>Corrente de entrada (A) no modo DC</b>	<b>Corrente Lida (A)</b>	<b>Tensão Lida (V)</b>	<b>Observação</b>
0,2	0,00	5	Com Plasma
0,4	0,20	935	Com Plasma
Após 2 minutos'			
0,4	0,13	1000	Com Plasma

**Fonte: Do Autor**

Na Tabela 4 mostra que foi decidido aumentar mais a pressão, para conseguir um controle da pressão e tensão, mas não foi possível aumentar mais que 0,3551 Torr, porque as aletas, controladoras do fluxo de gás, não conseguia fechar por completo. Realizando o teste com a máxima pressão, foi aplicado correntes maiores e com 0,9 A, a tensão já atingiu o máximo requerido da máquina.

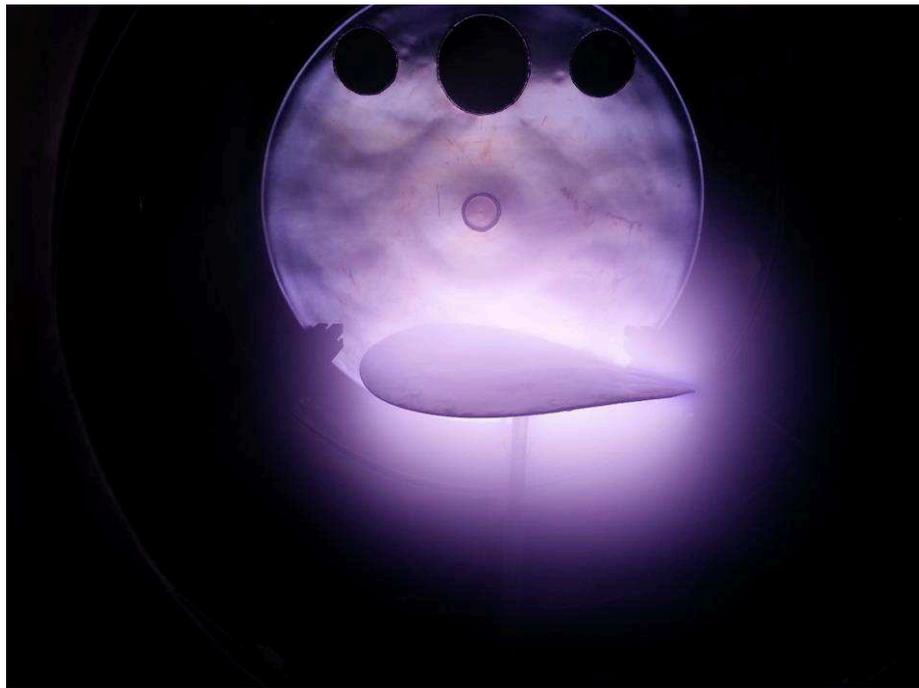
**Tabela 4 – Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão 0,3551 Torr**

<b>Corrente de entrada (A) no modo DC</b>	<b>Corrente Lida (A)</b>	<b>Tensão Lida (V)</b>	<b>Observação</b>
0,5	0,0	5	Com Plasma
0,7	0,61	653	Com Plasma
0,9	0,46	1000	Com Plasma

**Fonte: Do Autor**

Com o aumento da pressão, foi possível gerar plasma, na imagem 7 é possível ver o plasma ao redor do suporte de alumínio, para que quando a peça desejada seja colocada sobre este suporte, toda a amostra seja bombardeado pelo plasma.

**Figura 7 - Visão do interior da câmara com o plasma localizado em torno do suporte de alumínio.**



**Fonte: Do Autor**

Devido a potência da bomba de vácuo no sistema, não foi possível estabilizar a pressão em valores superiores, foi necessário aumentar o fluxo de gás para o valor máximo fornecido pelo controlador de fluxo. A Tabela 5 mostra que a pressão não subiu o suficiente, com 0,3650 Torr foi aplicado correntes baixas, no valor de 0,2 A, e foi possível gerar plasma, porém a tensão era de 4 V. Aplicando 0,4 A, a tensão foi

para 753 V, foi visto que com o passar do tempo a tensão foi aumentando devagar, e em 10 minutos a tensão atingiu o máximo requerido pela Fonte.

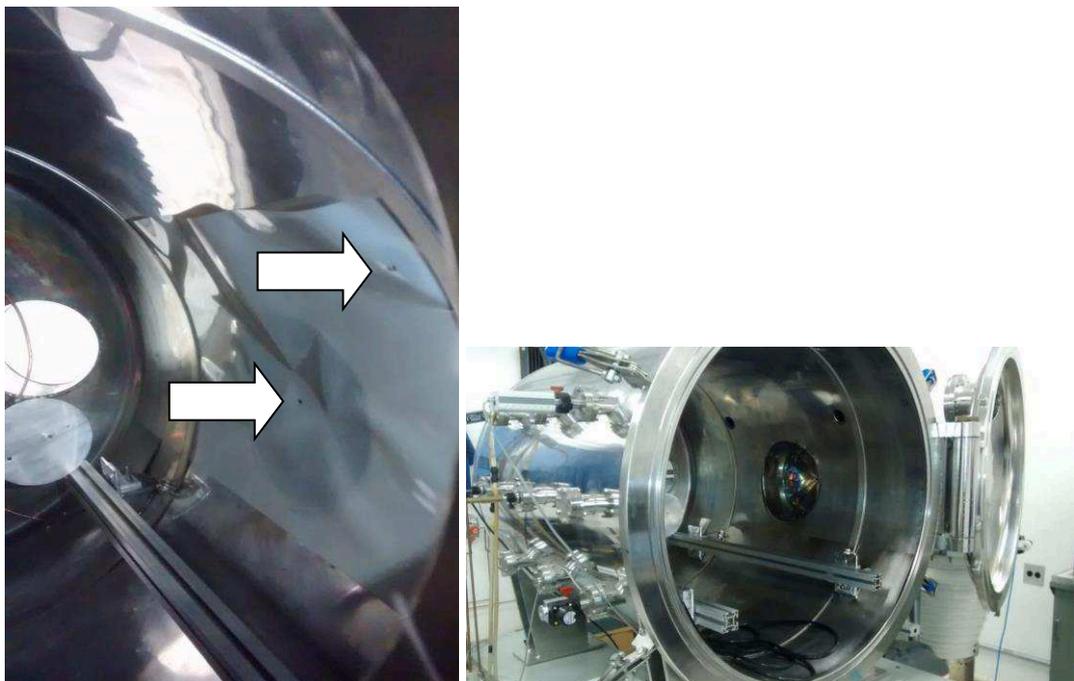
**Tabela 5 – Dados de pressão, corrente de entrada, corrente lida, tensão e presença ou não de plasma (observação). Pressão de 0,3650 Torr**

<b>Corrente de entrada (A) no modo DC</b>	<b>Corrente Lida (A)</b>	<b>Tensão Lida (V)</b>	<b>Observação</b>
0,2	1,19	4	Com Plasma
Após 30 segundos			
0,2	0,09	596	Com Plasma
0,4	0,28	753	Com Plasma
Após 10 minutos			
0,4	0,14	988	Com Plasma

**Fonte: Do Autor**

Outra medida tomada foi colocar um suporte para tentar tampar/controlar a saída de gás, e então adquirir maior pressão dentro da câmara, na figura 8 pode-se verificar que devido à alta pressão foi necessário colocar um suporte maleável com pequenos furos para a passagem do gás (seta indicando os furos), o mesmo ficou deformado permitindo que passasse gás pelas laterais, impedindo a diminuição da pressão.

**Figura 8 - Interior da câmara, com suporte afim de controlar a saída de gás.**



**Fonte: Do Autor**

## 5. CONCLUSÃO

Um dos pontos críticos na nitretação via processos assistidos a plasma é evitar a formação de arcos elétricos no interior da câmara, uma vez que os arcos podem provocar a degradação/fusão do material a ser nitretado, bem como degradação/fusão das paredes da câmara. O suporte projetado e executado permitiu que não ocorresse arcos elétricos no interior da câmara. Após essa fase, o trabalho envolveu um longo trabalho no estudo, projeto e execução no controle de pressão da câmara.

Não foi possível controlar a pressão acima de 1Torr, devido a alta potência da bomba, mesmo utilizando apenas uma das três bombas (mecânica) e adaptando novos recursos para fechar e impedir que o fluxo de gás saísse do mesmo. O plasma gerado, mesmo com pressões abaixo de 1Torr, se manteve estável em uma faixa de tensão de 1000 a 1040 V em todas as diferentes pressões utilizadas, enquanto a corrente mínima necessária para gerar e estabilizar o plasma variou de 0,2 a 0,9 A nas condições de pressão de 245 e 365 mTorr, ou seja, tensão muito alta para uma corrente tão baixa.

## REFERÊNCIAS

- CORREIA, F. **Nitreção**. 2010. Disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABbMoAJ/nitretacao>>. Acesso em: 15 de Setembro de 2018
- JUNIOR, C. A. **Nitreção a plasma - Fundamentos e Aplicações**. Editora UFRN, 2001
- KETTERMANN, V. **Resistencia a Desgaste**. 2017. Disponível em:  
<<http://engenhariademateriais.com.br/2017/04/20/acos-com-elevada-resistencia-ao-desgaste/>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2018
- MOREIRA, R. **Resistência do Aço**. 2010. Disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABESUAB/trabalho-desgaste>>. Acesso em: 18 de Maio de 2018
- SILVA, A. **Nitreção a Plasma**. 2000. Disponível em:  
<<file:///C:/Users/jfbj9/Downloads/000284488.pdf>>. Acesso em: 5 de Julho de 2018
- UNISANTA. Universidade Santa Cecília. **Mecânica**. Capítulo 4. Disponível em:  
<<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT4.pdf>>. Acesso em: 14 de Outubro de 2018.