



# DISPOSITIVO (CONCEITUAL) PARA TRATAMENTOS DE MATERIAIS USANDO PLASMA

**Palavras-Chave:** PLASMA NÃO TÉRMICO, TRATAMENTOS SUPERFICIAIS, IMPLANTAÇÃO IÔNICA.

**Autores:**

**Victor Roberto Neri Veltmeyer, FEM – UNICAMP**

**Prof. Dr. Francisco das Chagas Marques (orientador), DFA/IFGW – UNICAMP**

**Dr. Carlos Salles Lambert (coorientador), DFA/IFGW – UNICAMP**

**Dr. Munemasa Machida (colaborador), ex-professor DEQ/IFGW - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Esse projeto de iniciação científica voluntária (ICV) do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) tem como objetivo a criação de um projeto especificado de um dispositivo capaz de realizar os processos de implantação iônica à plasma<sup>[1],[7],[11],[14]</sup>, deposição física de vapor (PVD)<sup>[3],[4],[12]</sup> e adicionalmente limpeza por *plasma sputtering*<sup>[15],[16],[17],[20]</sup> de forma a melhorar os dois processos citados<sup>[17],[19],[20],[21]</sup>. O objetivo do projeto é a averiguação dos conceitos físicos por trás dos três processos para gerar uma estimativa inicial dos parâmetros de operação, seguido de um projeto preliminar em que se decidiu quais componentes genéricos seriam utilizados e por fim um projeto especificado em que se escolheram as peças e processos de fabricação comercialmente disponíveis para a confecção do equipamento, além da criação de um manual de montagem, manutenção e operação.

O processo de implantação iônica<sup>[1],[7],[11],[14]</sup> é normalmente um efeito indesejado, pois modifica a estrutura cristalina adicionando um elemento do plasma na mesma, e consiste na aceleração de íons seguida de impacto em uma superfície sólida com posterior neutralização dos mesmos<sup>[1],[7]</sup> pela própria matriz. Quando controlada, esse efeito pode gerar uma estrutura cristalina benéfica ao material, como é na nitretação de aços<sup>[1],[11]</sup>, onde plasma de nitrogênio causa inclusões de martensita na superfície com uma dureza muito maior que a matriz original<sup>[2],[11]</sup>, melhorando a dureza superficial, mas mantendo a ductilidade da matriz base<sup>[11]</sup>.

Outro fenômeno de interesse é a deposição física de vapor<sup>[3],[4],[12]</sup>, onde um material sólido é primeiramente vaporizado, depois ionizado para que se possa acelerá-lo, mas é neutralizado pouco antes do contato com a matriz, que combinado com a velocidade iônica menor pela falta da aceleração final próximo do alvo faz com que o reagente a ser adicionado não infiltre, mas sim deposite-se na superfície<sup>[3],[4],[20]</sup>. Esse processo tem utilizações similares à nitretação para a formação de camadas finas com propriedades diferentes da matriz<sup>[12]</sup>, mas pode formar camadas de elementos completamente diferentes da matriz<sup>[12]</sup> como por exemplo eletrodos biocompatíveis, visto que consegue fazer contatos impressos resistentes, mas finos o suficiente para reduzir as chances de rejeição<sup>[5],[20]</sup>, desde que a câmara não esteja contaminada<sup>[27]</sup>.

Mas, tanto para os métodos de deposição física de vapor, quanto para nitretação à plasma, é necessário primeiramente limpar a superfície<sup>[17],[19],[20],[21]</sup>. Esse processo necessita de uma pequena alteração no design do reator, em que se admitirá um gás de baixa difusividade nos substratos, geralmente Argônio<sup>[15],[16],[17],[20]</sup>. Será mantida a temperatura dos materiais a serem limpos o quanto baixa for possível para minimizar a possibilidade

de um íon implantar-se<sup>[28]</sup> na superfície à ser limpa pelo impacto das partículas do plasma, num subprocesso da PVD denominado *plasma sputtering*<sup>[29]</sup>.

#### METODOLOGIA:

Foi inicialmente estudado o processo por trás da geração do plasma, a descarga reluzente por avalanche de fotoelétrons gerado por radiação de fundo com o coorientador Munemasa Machida<sup>[8]</sup> e Carlos Salles Lambert<sup>[10]</sup>. O plasma gerado por tal descarga é por muitas vezes denominado plasma não térmico pois sua geração não depende do aquecimento do gás à ser transformado, permitindo a geração de plasma com temperaturas muito mais baixas que se costuma observar na literatura<sup>[8, p.15 e 17] [18],[21]</sup>.

Pela temperatura do plasma ser acoplada a diversos outros parâmetros<sup>[6],[13],[14],[23]</sup>, tal análise é complexa demais para o escopo desse projeto. Entretanto, por experiência com reatores, conforme o colaborador Carlos Lambert<sup>[10]</sup>, quanto menor é a pressão, maior é a diferença de potencial necessária para a abertura do plasma, implicando numa maior energia para menos íons, e assim maior temperatura do plasma. Esse padrão pode também ser visto na referência<sup>[24]</sup>, na tabela extraída abaixo, das páginas 268 e 269:

*Tabela 1 - Voltagens, Temperaturas e Pressões para diferentes processos de nitretação à baixa pressão e temperatura ( $T < 440^{\circ}\text{C}$ ) de aços autênticos incluindo alguns experimentos importantes feitos com feixe de elétrons. Extraída das páginas 268 e 269 da ref. [24].*

Material	Process negative bias (V)	Treatment time (h) or dose temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Process parameters	Nitride layer characteristics
AISI 316	d.c. diode	60 400	400–600 Pa $\text{N}_2$ -75% $\text{H}_2$	Duplex layer $\gamma + \gamma'$ free of CrN 20 $\mu\text{m}$
AISI 304	d.c. diode	4 400	607 Pa $\text{N}_2$ -25% $\text{H}_2$	S phase, $\text{M}_4\text{N}$ , $\gamma'$ 5 $\mu\text{m}$
AISI 304	d.c. diode	0.25–24	5 Pa	$\gamma$ expanded, $\alpha$ and $\text{MN}_{1-x}$ for
AISI 316	2000	350	$\text{N}_2$ -20% $\text{H}_2$	long time 9 $\mu\text{m}$ for 25 h
AISI 310	d.c. diode 400–500	60 350	300 Pa $\text{N}_2$ -80% $\text{H}_2$	$\gamma_N^S$ , CrN near the surface 4–5 $\mu\text{m}$
AISI 304	$\text{Pt}^3$ 28 000	$1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 230–340		Expanded austenite 1 $\mu\text{m}$ 340°C
AISI 304	TAT 2000	5 300	4.7 Pa $\text{N}_2$ -20% $\text{H}_2$	2 hcp phases 60–70 $\mu\text{m}$
AISI 304	TAD 250	? $400 < T < 450$	0.5 Pa $\text{N}_2$ -60%Ar	$\gamma_N$ or $\gamma'$ , $(\text{Cr,Fe})_2\text{N}$ hexagonal phase near the surface
AISI 316	TAT 500	30 420	1 Pa $\text{N}_2$ -75% $\text{H}_2$	Expanded austenite 40–60 $\mu\text{m}$
AISI 316L	Pulsed d.c.	4 420	300 Pa $\text{N}_2$ -90% $\text{H}_2$	$\gamma_N^S$ 10 $\mu\text{m}$
AISI 316	$\text{Pt}^3$ 45 000	$8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 150 and 300	0.2 Pa pulse length 50 $\mu\text{s}$	Expanded austenite 0.15 $\mu\text{m}$ (150°C) 1 $\mu\text{m}$ (300°C)
1Cr18Ni8Ti	ECR PSH 2000	4 230–430	$5-10 \cdot 10^{-2}$	$\gamma'-(\text{Fe,Cr,Ni})_4\text{N} + \gamma_N$ for $230 < T < 280^{\circ}\text{C}$ $\gamma_N$ for $330 < T < 430^{\circ}\text{C}$ $\alpha + \text{CrN} + \gamma_N$ for $T > 430^{\circ}\text{C}$ 5 $\mu\text{m}$ (380°C)
AISI 304L	Pulsed d.c. 410	5 400	400 Pa $\text{N}_2$ -20% $\text{H}_2$	S phase 5 $\mu\text{m}$ (400°C)
AISI 316	Ion beam 100 eV	0.3 370		Expanded austenite 4 $\mu\text{m}$
AISI 316L	Pulsed d.c. 800 Hz	0.016–4 420	300 Pa $\text{N}_2$ -5% $\text{H}_2$	Double-expanded austenite layer
X6CrNiTi1810	$\text{Pt}^3$ 40 000	3 400		Expanded austenite 4–7 $\mu\text{m}$

AISI 316	TAD Floating	0.08–9 310–410	0.8 Pa N <sub>2</sub> -50%Ar	Expanded austenite
Different ASS	Ion beam 700 eV	0.25 400		Double-layer structure γ <sub>N1</sub> (20–26 at.% N) and γ <sub>N2</sub> (4–10 at.% N) 2.5–3.5 μm
AISI 316 Ti	PIII 40000	0.67–6 380		γ' expanded austenite CrN near the surface 10 μm (4 h)
AISI 304	ECR Floating	0.67 350	0.05 Pa N <sub>2</sub> -90%H <sub>2</sub>	8 μm
X8CrNiTi1810	Pulsed d.c.	16 350	N <sub>2</sub> -30%Ar- 30%H <sub>2</sub>	Expanded austenite 9 μm

Essa análise de processos de nitretação fornece os limites de pressão, temperatura e voltagem do processo mais exigente, sendo que a câmara de outro professor da Unicamp, Fernando Alvarez<sup>[23]</sup>, têm dimensões similares à que se está sendo planejada a construção, 30 cm de diâmetro por 50 cm de comprimento, pelas limitações de espaço do laboratório que poderá receber a câmara. Entretanto, ressalva-se que para conhecer exatamente qual camada superficial está sendo gerada, utiliza-se um processo empírico denominado caracterização<sup>[33],[34]</sup>, no qual se realiza o processo nos parâmetros da literatura, retira-se a amostra para testes pertinentes às propriedades desejadas, modificam-se os parâmetros e repetem-se os testes para determinar a correlação das entradas com os resultados esperados. Pode-se também realizar a averiguação das energias/temperaturas dos íons no plasma via espectroscopia óptica de emissão, conforme a referência [34] fez.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Essa análise de processos de nitretação e PVD fornece os limites de pressão, temperatura e voltagem do processo mais exigente, mas mantendo a capacidade de regulação para processos menos exigentes. O processo mais rigoroso foi a implantação iônica por imersão em plasma (PI<sup>3</sup>), cuja câmara de outro professor da Unicamp, Fernando Alvarez, realiza e têm dimensões similares<sup>[23]</sup> à que se está sendo planejada a construção, 30 cm de diâmetro por 50 cm de comprimento, pelas limitações de espaço do laboratório que poderá receber a câmara. Os valores limites, incluindo também os inferiores e as peças genéricas estão na tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros limites, junto dos equipamentos genéricos a serem usados pelo dispositivo.

Sistema	Parâmetro	Limite Mínimo	Limite Máximo	Equipamento Genéricos
Vácuo	Pressão	2,38 mPa	2400 Pa	Bomba Difusora + Mecânica de Palhetas c/ armadilhas de LN <sub>2</sub> .
Admissão de Gás	Pressão	30 mPa	2400 Pa	Cilindros com conectores + válvulas reguladoras de agulha.
Elétrica	Voltagem	50 V	40 kV	Séries de Autotransformadores 1- 10:1 com rating de 50 kV. Carça aterrada.
	Amperagem	Abertura do plasma - empírica	Quanto mais alta sem arco, melhor	Trimmers. Estabilizadores de Corrente.
	Frequência	0 Hz (DC)	15 MHz	Fonte de RF Retificada. Fonte DC Pulsada. Osciloscópio no alcance.
Térmica	Temperatura	Ambiente – 20 °C	420 °C	Sistema de refrigeração

	Potência	0 W	11 kW	por água deionizada
Estrutura	Dimensões	Diâmetro 30 cm	Compr. 50 cm	Câmara de aço inox 304 usinada e eletro polida.
	Nº Janelas	Uma	Duas	Janela de quartzo fundido.
	Nº de Passadores	Quatro	Oito	Passadores de cabos coaxiais de alta tensão com isolante PEEK.

Com os parâmetros em mão, foi possível realizar uma análise estrutural no software CREO Parametric<sup>[30]</sup> sob a teoria de falha por fadiga de Von Misses presente na literatura<sup>[31],[32]</sup> para o dimensionamento da câmara de vácuo, a escolha de uma fonte AC até 200 kHz, de RF de 500 kHz à 15 MHz, uma DC pulsada e o projeto de um estabilizador de corrente que converta-a para DC contínua, atendendo assim a maior parte dos processos das referências [7], [13], [14], [20], [24] e [25]. Por dificuldade de construção, optou-se por não estudar a construção um canhão de elétrons<sup>[26]</sup> descrito na referência [24].

O sistema de pressurização será escolhido do catálogo da empresa Agilent Vacuum Technologies, por recomendação dos três orientadores desse projeto, e por ter sido utilizado amplamente no Sincrotron Sírius. O projeto das junções desmontáveis e das soldas seguiu a literatura do professor Sérgio Gama, ref. [22], que serviu de base para o desenvolvimento dos materiais de montagem e manutenção, o vácuo sendo o componente mais sensível. O sistema de controle térmico será de refrigeração à base de água deionizada similar aos utilizados em sistemas de computação pela liberação de calor, e pela recomendação dos três doutores orientando o projeto.

## CONCLUSÕES:

Embora a construção do sistema em si não é englobada nesse projeto de Iniciação Científica, pelos custos associados aos sistemas descritos, esse projeto deverá ser passível de ser usado para a aprovação de financiamento futuro para construção seguindo todos os procedimentos descritos nos manuais. O objetivo desse equipamento será propiciar à engenharia mecânica, especificamente o docente Noé Cheung<sup>[9]</sup> que instigou o desenvolvimento do mesmo e seus laboratórios, um projeto de um dispositivo capaz de realizar experimentos e testes envolvendo os três processos: Implantação lônica, PVD e *Sputtering*, tomando os devidos cuidados para evitar a contaminação excessiva da câmara<sup>[27]</sup>.

Uma imagem real de como deverá aparentar o interior da câmara do equipamento em questão é a figura 1 ao lado, retirada da ref. [35]:

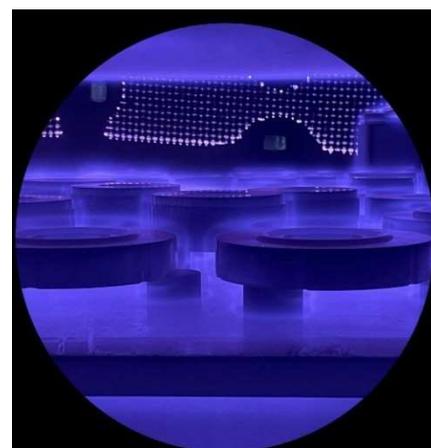


Figura 1 - Interior de uma câmara de nitretação à plasma com a geometria do equipamento projetado. Extraído da ref. [35]

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - WOOD, J.; MAJUMDAR, G.; "ENCYCLOPEDIA OF MATERIALS: Science and Technology". 1ª ed.. Berkeley: Elsevier, 2001. Páginas 4284-4286.
- [2] - A. L. COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R.; "AÇOS E LIGAS ESPECIAIS". 4ª ed. rev. -- São Paulo: Editora Blücher 2022. Páginas 151 - 192.
- [3] - "PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION - an overview". Science Direct Topics, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/physical-vapour-deposition>>. Acesso em: 2 de Maio de 2022.
- [4] - BHAGYARAJ, S.; OLUWAFEMI, O.; KALARJIKAL, N.; SABU, T.; "SYNTHESIS OF INORGANIC NANOMATERIALS – Advances and Key Technologies", 1ª ed., Elsevier, 2018. Seção 5.3.2.6.
- [5] - WANG, M.; GUO, L.; SUN, H.; "MANUFACTURE OF BIOMATERIALS", parte do Volume 1 da "ENCYCLOPEDIA OF BIOMECHANICAL ENGINEERING", 1ª ed., Elsevier, 2021. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012801238311027X>> Acesso em: 2 de Maio de 2022.
- [6] - FITZPATRICK, R. "AN INTRODUCTION TO PLASMA PHYSICS: A graduate level course"; ed. única, editora CRC Press, Taylor & Francis Group, AUSTIN, 2014. 242 pgs. ISBN: 978-1-4665-9426-5.
- [7] - KRAFT, P.; "PROJETO E CONSTRUÇÃO DE REATOR PARA TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE SUPERFÍCIE DE NITRETAÇÃO POR PLASMA", Tese (Tecnologia em Fabricação Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de SC, 2016.
- [8] - "CURRICULO LATTES – Munemasa Machida". Biblioteca Virtual da FAPESP, 2022. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/pesquisador/7046/munemasa-machida/>>. Acesso em: 03 de Abril de 2022.
- [9] - "CURRICULO LATTES – Noé Cheung". Biblioteca Virtual da FAPESP, 2022. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/pesquisador/34721/noe-cheung/>>. Acesso em: 04 de Abril de 2022.

- [10] - "CURRICULO LATTES – Carlos Salles Lambert". Biblioteca Virtual da FAPESP, 2022. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/8510708294517980>>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2022.
- [11] – PINEDO, C.; "TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS DOS AÇOS". São Paulo: Editora Blücher, 2021. Páginas 130-146.
- [12] – PINEDO, C.; "TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS DOS AÇOS". São Paulo: Editora Blücher, 2021. Páginas 163-166.
- [13] – HASSOUNI, K.; CAVADIAS, S.; UTKU, E. AMOUROUX, J.; "USE OF NAVIER-STOKES EQUATIONS FOR TWO DIMENSIONAL MODELLING OF A LOW PRESSURE PLASMA CHEMICAL REACTOR" Computers & Chemical Engineering - Elsevier, Toulouse, Volume 17, Suplemento 1, Páginas S505-S510, Outubro, 1993.
- [14] – PILLACA, E.; "ESTUDO DO PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA COM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO USANDO TÉCNICAS NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS", Tese (Doutorado em Física), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.
- [15] - H. S. UHM, Y. C. HONG, "VARIOUS MICROPLASMA JETS AND THEIR STERILIZATION OF MICROBES", vol. 519, pp. 6974-6980, 2011.
- [16] - O'KANE, D. F.; MITTAL, K. L.; "PLASMA CLEANING OF METAL SURFACES", Journal of Vacuum Science and Technology 11, p. 567-569, 1974. Disponível em <https://doi.org/10.1116/1.1318069>, acesso no dia 15/12/2022.
- [17] - AGOSTINO, R. d'; "PLASMA DEPOSITION, TREATMENT, AND ETCHING OF POLYMERS". Boston: Academic Press, BOSTON, 1990. 529 pgs.
- [18] - NETO, E.R.N.; LAMBERT, C.S.; BITTENCOURT, E.; et al. "ESTUDO DA REMOÇÃO DE ÓLEO DA SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO UTILIZANDO PLASMA FRIO". Revista Ciência e Tecnologia, v. 9, n. 15, 2010.
- [19] - X. CHEN, X. -M. HE AND B. PU, "METAL CONTAMINATION CONTROL AND REDUCTION IN PLASMA ETCHING," 2016 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 2016, pp. 1-4. [DOI: 10.1109/CSTIC.2016.7464006]. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7464006>>. Acesso no dia 20/12/2022.
- [20] - UZUMAKI, E.T.; LAMBERT, C.S.; SANTOS, A.R.; ZAVAGLIA, C.A.C.; "SURFACE PROPERTIES AND CELL BEHAVIOUR OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS PRODUCED BY PLASMA IMMERSION"; ed. ELSEVIER, Revista Thin Solid Films, vol. 515, pgs 293-300, AMSTERDAM, 2006. doi:10.1016/j.tsf.2005.12.081. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040609005024247?via%3Dihub>>, acesso no dia 20/02/2023.
- [21] - MAGALHÃES, W. L. E. "CONSTRUÇÃO DE UM REATOR A PLASMA FRIO PARA TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DE MATERIAIS." Comunicado Técnico 237 – EMBRAPA, CAMPINAS, 2009. 4 pgs.
- [22] – GAMA, S.; "F-640: Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo", Apostila do Curso de F-640 de mesmo nome do IFGW/Unicamp – Laboratório de Vácuo e Criogenia. CAMPINAS, 2002. 248 pgs. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>>. Acesso no dia 20/02/2023.
- [23] – FIGUEROA, C. A.; OCHOA, E.; ALVAREZ, F.; "INFLUENCE OF THE ION MEAN FREE PATH AND THE ROLE OF OXYGEN IN NITRIDING PROCESSES", ed. American Institute of Physics, Journal of Applied Physics, vol. 94, n°4, pgs. 2242-2247, COLLEGE PARK, 2003. [DOI: 10.1063/1.1591415]. Disponível em <[http://plasma-liits.com.br/wp-content/uploads/2017/04/2003.Mean\\_fre\\_path.carlos.pdf](http://plasma-liits.com.br/wp-content/uploads/2017/04/2003.Mean_fre_path.carlos.pdf)>, Acesso no dia 24/02/2023.
- [24] - CZERWIEC, T.; RENEVIER, N.; MICHEL, H.; "LOW-TEMPERATURE PLASMA-ASSISTED NITRIDING"; ed. Elsevier, Revista Surface and Coatings Technology, vol. 131, Issues 1–3, pgs 267-277, AMSTERDAM, 2000. ISSN 0257-8972. [DOI: 10.1016/S0257-8972(00)00792-1]. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897200007921>>. Acesso no dia 24/02/2023.
- [25] - KOSTOV, K. G.; BARROSO, J. J.; UEDA, M.; "EFFECT OF TARGET BIAS ON MAGNETIC FIELD ENHANCED PLASMA IMMERSION ION IMPLANTATION". Ed. ELSEVIER, Periódico Surface & Coatings Technology v. 201, n° 19-20, p. 8403-8407, LAUSANNE, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/9072>>. Acesso no dia 27/02/2023.
- [26] – CREWE, A. V.; EGGENBERGER, D. N.; WALL, J.; WELTER, L. M.; "ELECTRON GUN USING A FIELD EMISSION SOURCE", ed. American Institute of Physics, Journal Review of Scientific Instruments, vol. 39, n°4, pgs. 576-583, COLLEGE PARK, 1968. [DOI: 10.1063/1.1683435]. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1683435>>. Acesso no dia 28/02/2023.
- [27] - YASUDA, H.; YU, Q.; REDDY, C.; "EFFECTS OF WALL CONTAMINATION ON CONSECUTIVE PLASMA PROCESSES"; ed. AVS; Revista Journal of Vacuum Science & Technology A 19, p. 2074-2082, KANSAS CITY, 2001. [DOI:10.1116/1.1372902]. Disponível em: <<https://avs.scitation.org/doi/pdf/10.1116/1.1372902>>. Acesso no dia 07/03/2023.
- [28] - MAHBOUBI, F.; ABDOLVAHABI, K.; "THE EFFECT OF TEMPERATURE ON PLASMA NITRIDING BEHAVIOUR OF DIN 1.6959 LOW ALLOY STEEL"; ed. ELSEVIER, revista Vacuum, vol. 81, issue 3, p. 239-243, AMSTERDAM, 2006. ISSN 0042-207X, DOI: 10.1016/j.vacuum.2006.03.010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X06001321>>. Acesso no dia 08/03/2023.
- [29] - YEW, T.; REIF, R.; "LOW-TEMPERATURE IN SITU SURFACE CLEANING OF OXIDE-PATTERNED WAFERS BY AR/H2 PLASMA SPUTTER"; ed. AIP PUBLISHING, Journal of Applied Physics n° 68, p. 4681-4693, CAMBRIDGE, 1990. [DOI: 10.1063/1.346180]. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.346180>>. Acesso no dia 08/03/2023.
- [30] – SOFTWARE DE MODELAGEM 3D CREO PARAMETRIC. PTC.com; 2023. Disponível em: <<https://www.ptc.com/pt/products/creo/parametric>>, acesso no dia 19/07/2023.
- [31] - NORTON, R. L.; "MACHINE DESIGN An Integrated Approach"; ed. Upper Saddle River, Prentice-Hall, 4th edition, 2011. 1045 pgs.
- [32] – 304 Stainless Steel - MATWEB. MatWeb: Material Property Data; 2023. Disponível em: <<https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>>, acesso no dia 19/07/2023.
- [33] – SCHURINK, B.; BELD, W.T.E.; TIGGELAAR, R.M. ET AL.; "SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF BORON THIN FILMS USING CHEMICAL AND PHYSICAL VAPOR DEPOSITIONS"; ed. MDPI OPEN ACCESS JOURNALS, Revista Coatings, vol. 12, artigo n° 685, ENSCHEDE, 2022. [DOI: 10.1063/1.346180]. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/coatings12050685>>, acesso no dia 03/08/2023.
- [34] - Chiu, K.-F.; Barber, Z. H.; "CHARACTERIZATION OF INDUCTIVELY COUPLED PLASMA IN THE IONIZED PHYSICAL VAPOR DEPOSITION SYSTEM"; ed. AIP PUBLISHING, revista Journal of Applied Physics, vol. 91, issue 4, p. 1797–1803, 2002. [DOI: 10.1063/1.1430897]. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1430897>>, acesso no dia 03/08/2023.
- [35] - Página inicial do website da empresa Sun Treating Steel Inc. de tratamentos superficiais em aços, link: <<https://sunsteeltreating.com/services/ionitriding/#>>. Acesso no dia 10/03/2023.