

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

DENNER TRAIANO

**CONSTRUÇÃO DE UM REATOR A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE
FILMES FINOS COM A TÉCNICA DE MAGNETRON SPUTTERING**

GUARAPUAVA

2019

DENNER TRAIANO

**CONSTRUÇÃO DE UM REATOR A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE
FILMES FINOS COM A TÉCNICA DE MAGNETRON SPUTTERING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em manutenção Industrial, da coordenação de manutenção industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Marlon Mazur

GUARAPUAVA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional- DIRGRAD
Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial
Tecnologia em Manutenção Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

CONSTRUÇÃO DE UM REATOR A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS COM A TÉCNICA DE MAGNETRON SPUTTERING

por

DENNER TRAIANO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de novembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr Maurício Marlon Mazur
Prof.(a) Orientador(a)

MsC Ricardo Vinícius Bubna Biscaia
Membro titular

Dr^a Viviane Teleginski Mazur
Membro titular

MsC Ricardo Vinícius Bubna Biscaia
Coordenador de Curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha
mãe Eridan Lopes Traiano e
pai Delcio Traiano por toda a
educação proporcionada por
eles.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e a oportunidade de realizar e concretizar esse trabalho.

Agradeço aos meus pais Delcio Traiano e Eridan Lopes Traiano por toda a educação, honestidade e honra que vocês sempre tiveram como prioridade ensinar.

Agradeço ao professor e orientador Dr Mauricio Marlon Mazur pela orientação, parceria, conselhos e a oportunidade de participar desse projeto.

Agradeço ao meu irmão Diego Traiano por todas as conversas e descontrações durante o projeto.

Agradeço a minha namorada Bruna de Souza por todos os conselhos, apoio e compreensão durante essa etapa.

Agradeço aos meus amigos de curso Allan de Oliveira, Alisson Miranda, Nestor Ribeiro, João Carlos, Luciano Oride por toda a parceria e boas risada que foram dadas durante a graduação.

Agradeço aos docentes do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial por todo conhecimento repassado durante essa caminhada.

Agradeço a UTFPR por toda infraestrutura proporcionada para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos Renan Hilgemberg, Tiago Alves, Felipe Giacomini por toda a amizade proporcionada.

Agradeço ao suporte financeiro do Edital 01/2019 – PROGRAD / PROREC Apoio à Execução de Trabalhos de Conclusão de Curso – TCC.

Agradeço a todos aqueles que de alguma maneira influenciaram nesse projeto, sendo com palpites, dicas ou conselhos.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. (Ayrton Senna de Silva).

RESUMO

A técnica de plasma *magnetron sputtering* é utilizada para a deposição de revestimentos e filmes finos, sendo empregada em diversos setores industriais como automotivo, alimentício, embalagens, na microeletrônica e etc. Com esta técnica é possível depositar diferentes materiais em superfícies de substratos poliméricos, cerâmicos e metálicos. As características dos filmes podem ser voltadas para aplicações em óptica, elétrica, esterilização entre outras, dependendo da finalidade para qual são destinadas. O equipamento necessário para a aplicação e geração de filmes finos é o reator, composto por três conjuntos: sistema de vácuo, sistema de alimentação e o *magnetron*. O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um reator e do sistema de *magnetron*, incluindo o projeto mecânico e a fabricação dos componentes com a utilização da manufatura subtrativa. Para a abertura do plasma foi utilizada uma fonte elétrica de corrente alternada de tensão máxima de 1000 V e uma bomba mecânica para geração de vácuo com máxima pressão de 10^{-2} mbar. Os testes de abertura do plasma e vácuo da câmara, mostram que o sistema trabalhou de forma eficiente e sem vazamentos significativos, permitindo atingir pressões de $4,5 \cdot 10^{-2}$ mbar. Realizou-se a deposição de filmes de cobre com corrente de 100 mA com o gás residual do reator, em substrato de lamínulas para microscopia, em diferentes distâncias do *magnetron*, indicando que a distância influencia diretamente na taxa de deposição do filme metálico, além de afetar questões como uniformidade e espessura do filme depositado.

Palavras chave: **Palavras chave:** Projeto de reator, Fabricação de reator, Montagem de reator.

ABSTRACT

The magnetron sputtering plasma technique is used for the deposition of coatings and thin films and is used in various industrial sectors such as automotive, food, packaging, microelectronics and etc. With this technique it is possible to deposit different materials on surfaces of polymeric, ceramic and metallic substrates. The characteristics of the films can be geared to applications in optics, electrical, sterilization and others, depending on the purpose for which they are intended. The equipment required for the application and generation of thin films is the reactor, composed of three sets: vacuum system, feed system and magnetron. This paper describes the development of a reactor and the magnetron system, including mechanical design and component manufacturing using subtractive manufacturing. For the plasma opening, a 1000 V maximum voltage AC electric source and a 10^{-2} mbar maximum vacuum generator mechanical pump were used. Plasma opening and chamber vacuum tests show that the system worked efficiently and without significant leaks, allowing it to reach pressures of $4.5 \cdot 10^{-2}$ mbar. The deposition of 100 mA current copper films with the reactor residual gas was carried out on a coverslip substrate for microscopy at different distances from the magnetron, indicating that the distance directly influences the deposition rate of the metallic film. affect issues such as uniformity and thickness of the deposited film.

Keywords: Reactor Design, Reactor Manufacturing, Reactor assembly.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração das interações dos átomos e elétrons no processo de geração do plasma.....	15
Figura 2 - Modelo esquemático de um reator que realiza nitretação iônica.	21
Figura 3 - Modelo esquemático de reator do tipo barril	22
Figura 4 - Modelo de reator constituído de placas paralelas	23
Figura 5 - Reator de plasma remoto.....	24
Figura 6 - Fluxograma contendo a ordem dos processos utilizados no projeto do reator.....	28
Figura 7 - Vista explodida do <i>magnetron</i> com as indicações das peças constituintes	29
Figura 8 - Torno utilizado na fabricação dos componentes do reator.....	32
Figura 9 - Esquema de montagem da fonte AC no reator.....	33
Figura 10 - Montagem dos componentes do sistema de vácuo	34
Figura 11 - Montagem dos elementos adjacentes no reator	35
Figura 12 - Reator projetado (a) e suas peças constituintes. Em (b) o sistema montado	38
Figura 13 - Flange de saída do reator dimensionado e fabricado.	40
Figura 14 - A esquerda o dimensionamento do componente e a direita a peça fabricada.	41
Figura 15 - Desenho em vista isométrica e imagem do item fabricado.	42
Figura 16 - Desenho em vista isométrica e imagem do componente fabricado.	43
Figura 17 - Desenho isométrico e componente fabricado.	44
Figura 18 - Tampa de suporte do cátodo dimensionada e fabricada em nylon.	45
Figura 19 - Dimensionamento, simulação, componente fabricado.....	46
Figura 20 - Imagens da modelagem do <i>magnetron</i> e do componente fabricado.	47
Figura 21 - Processo de deposição de cobre na amostra	48
Figura 22 - Amostras depositadas de cobre a uma distância de 45 mm em relação ao alvo.....	50
Figura 23 - Amostra que receberam o processo de deposição a 78 mm de distância entre o alvo e o substrato.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação entre materiais utilizados e suas propriedades inerentes na fabricação de peças.	31
Tabela 2 - Tabela com os parâmetros de funcionamento necessários para a deposição.	36
Tabela 3 - Tabela com etapas constituintes do modelamento do projeto.	37

LISTA DE SIGLAS

DLC	Diamond-Like Carbon
CVD	Chemical Vapor Depositon
PVD	Physical Vapor Deposition
TiN	Nitreto de titânio
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
RF	Rádio Frequência
KHz	Quilo-Hertz
MHz	Mega-Hertz
PET	Polietileno Tereflato
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 PLASMA.....	15
2.1.1 Aplicação do Plasma	16
2.1.2 Métodos de alteração superficial	16
2.1.2.1 Implantação iônica.....	17
2.1.2.2 Ataque químico à plasma	17
2.1.2.3 Deposição química de vapores a plasma.....	18
2.1.2.4 Sputtering	18
2.1.2.5 PECVD	19
2.1.2.6 Polimerização	20
2.1.3 Reatores de Plasma	20
2.1.3.1 Reator do tipo barril	22
2.1.3.2 Reator de placas paralelas.....	22
2.1.3.3 Reator de plasma remoto	23
2.1.4 Processo de Nitretação.....	24
2.1.4.1 Nitretação gasosa.....	25
2.1.5 Seleção de materiais	25
2.1.5.1 Alumínio	26
2.1.5.2 Nylon	26
2.1.5.3 Aço inoxidável	26
2.1.5.4 Vidro de boro silicato	26
2.1.6. Sistemas de Vácuo.....	27
2.1.7 Fontes de Alimentação para o Reator a Plasma	27
3.1 DELIMITAÇÃO E MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS	28
3.1.1 Desenho e Dimensionamento dos Componentes Utilizados no Reator.....	29
3.1.1.1 Sistema do tipo <i>magnetron</i>	29
3.1.2 Especificação do Projeto Construtivo	30
3.1.3 Seleção de Materiais	30
3.1.4 Fabricação dos Componentes	31
3.1.4.1 Ferramental	31
3.1.5 Montagem do Reator	32
3.1.5.1 Montagem do sistema de elétrico.....	33
3.1.5.2 Montagem do sistema de vácuo.....	33
3.1.5.3 Montagem dos componentes no reator	34
3.1.6 Preparação das Amostras e Deposição.....	35
3.1.7 Procedimento e Etapas do Processo de Metodologia	36
4 RESULTADOS	38
4.1 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VÁCUO.	38
4.1.1 Dimensionamento e Construção do Flange de Saída do Reator para as Conexões de Vácuo.....	39
4.1.2 Dimensionamento e Fabricação do Flange de Conexão entre a Bomba Mecânica e o Sistema de Vácuo.....	40
4.1.3 Janela de Supervisão	41

4.1.4 Vedação da Câmara	42
4.1.5 Flange da Válvula de Escape	43
4.2 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO	44
4.2.1 Dimensionamento e Fabricação da Tampa de Isolamento de Vácuo com Suporte para o Cátodo.....	44
4.2.2 Dimensionamento e Fabricação do Cátodo	45
4.3 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE <i>MAGNETRON SPUTTERING</i>	46
4.4 DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS EM COBRE UTILIZANDO <i>MAGNETRON</i> ..	47
5 CONCLUSÃO.....	52
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A	59
APÊNDICE B	60
APÊNDICE C	61
APÊNDICE D	62
APÊNDICE E	63
APÊNDICE F.....	64
APÊNDICE G	65
APÊNDICE H	66

1 INTRODUÇÃO

Nos avanços tecnológicos aplicados em materiais metálicos e suas ligas a redução na manutenção e melhora nas características mecânicas de superfície são de interesse. Diversas ferramentas e componentes como: brocas, eixos de motores, bielas, engrenagens, polias, pistões, conjuntos motrizes entre outros componentes de uso industrial quando submetidos a tratamentos térmicos ou químicos, os quais podem apresentar redução de desgaste prematuro por atrito ou corrosão. Estes processos envolvem equipamentos tecnológicos que podem alterar as características superficiais (ALVES, 2001).

A tecnologia que envolve sistemas de plasma é promissora e possui uma importância nos avanços tecnológicos e alterações físico/químicas de superfície dos mais diversos materiais incluindo ligas metálicas, cerâmicas e polímeros. Para tal o desenvolvimento e a concepção de um reator de plasma para estudos e testes é de interesse, tanto laboratorial quanto industrial (TURRI, 2011).

A técnica do plasma pode ser descrita como um processo que possibilita a modificação de superfícies em um material sem que o seu volume obtenha algum tipo de transformação ou que a sua área dimensional seja afetada. Neste sentido, a técnica de tratamento a plasma é de destaque por apresentar algumas vantagens como, curto tempo de exposição a plasma, uniformidade na aplicação e replicação do método (BATISTA, 1998).

O plasma contribui de forma significativa nos processos industriais, sendo considerada uma técnica limpa, ou seja, não gera resíduos poluentes no processo. O plasma é definido como sendo o quarto estado da matéria além de constituir boa parte do que existe no universo (NELSON, 2013; DAUDT, 2012). Atualmente ela é utilizada na produção de circuitos eletrônicos, tratamento de superfícies em geral, desde embalagens alimentícias como em tratamentos de esterilização de material cirúrgico (SANT'ANA, 2014).

O desenvolvimento e construção de reatores a plasma, permitem uma ampla gama de experimentos como deposição de filmes e nitretação. O equipamento é importante devido as aplicações e técnicas que podem ser desenvolvidas além de estudos relacionados a construção, dimensionamento e deposições.

O tratamento de superfícies por rotas tecnológicas, que foi desenvolvido neste trabalho, foi um sistema de reator a plasma com aplicação em deposição de filmes finos. Inicialmente foi realizado um estudo dos materiais a serem utilizados na confecção do sistema a plasma, a exemplo: câmara do reator em aço inox, conexões de vácuo em alumínio, vedações em Viton e etc. Foi estudado o modelo de reator e um desenho em CAD será inicialmente desenvolvido para adequação de medidas e tolerâncias. Posteriormente foram adquiridos a bomba de vácuo e a fonte de tensão para a abertura do plasma e deposições. Testes foram realizados para verificar a vedação do vácuo na câmara e o funcionamento da fonte de tensão.

O projeto desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná é o primeiro equipamento do Campus Guarapuava, sendo utilizado para alavancar os estudos e pesquisas relacionados a engenharia de materiais e superfície.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e montar um sistema de plasma para realizar a deposição de filmes finos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenhar e detalhar o sistema de vácuo e reator com auxílio de software Inventor;
- Especificar materiais e fabricar peças para confecção do reator e peças de conexão;
- Montar e testar a vedação do sistema de vácuo e reator;
- Testar o processo de abertura de plasma utilizando uma fonte de corrente alternada;
- Realizar deposições de filmes metálicos em substratos;

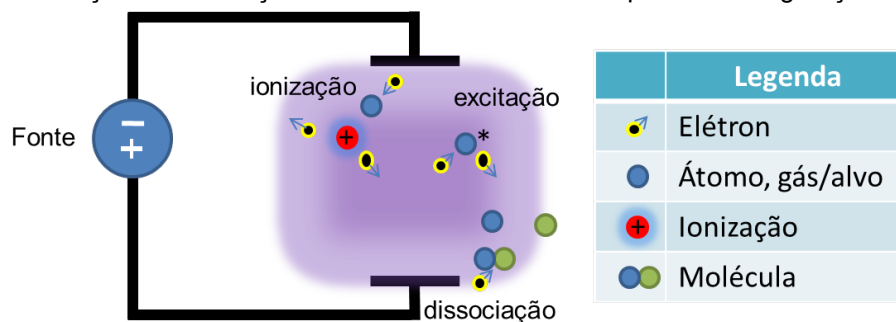
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PLASMA

O plasma é formado pela diferença de potencial elétrico inserido no ambiente, com a descarga elétrica no meio o gás presente na atmosfera ioniza-se formando o plasma, a abertura do plasma pode ocorrer em pressões atmosféricas ou pressões negativas. Estima-se que aproximadamente 95 % do universo esteja neste estado sendo considerado o quarto estado da matéria. Para a formação do plasma é necessário que algumas condições sejam satisfeitas como, por exemplo o aumento da temperatura de um gás (ROCHA, 2009). O processo de elevar a temperatura e causar superaquecimento faz com que as moléculas do gás se rompam, gerando átomos livres, elétrons e íons. Esse fator juntamente com uma carga de energia elétrica produz o que é chamado de plasma. O plasma pode ser notado em fenômenos naturais como raios, sol, estrelas e também em aparelho de iluminação e eletrônicos como lâmpadas fluorescentes, televisões a plasma ou em uma simples chama de uma vela (NELSON, 2013; DAUDT, 2012).

No plasma ocorrem colisões entre elétrons e átomos do gás, essas colisões podem ser do tipo elásticas ou inelásticas. Nas interações elásticas não há mudança na energia interna do átomo não ocorrendo processo de ionização. Nas interações inelásticas há o processo de modificação eletrônica, a qual vem a fornecer íons para o processo de formação do plasma. Na Figura 1 pode ser visualizado a ilustração das reações que ocorrem no processo de formação do plasma (CHABERT & BRAITHWAITE, 2011).

Figura 1 - Ilustração das interações dos átomos e elétrons no processo de geração do plasma.



Fonte: Adaptado de CHABERT & BRAITHWAITE, (2011).

Estas interações que ocorrem no plasma podem ser descritas da forma a seguir:

- Ionização – o processo de ionização ocorre quando as partículas aceleradas colidem e retiram elétrons dos átomos, tornando-os íons positivos. Ex: $e^- + X_2 = X_2^+ + 2e^-$;
- Dissociação – ocorre com moléculas dividindo-se em átomos ionizados chamados de radicais. Ex: $e^- + XY = X+Y+e^-$; $e^- + XY = X+ +Y+2e^-$;
- Excitação – átomos que absorvem energia alterando seu estado vibracional e ou rotacional no processo de plasma. Ex: $e^- + X = X^* + e^-$.

2.1.1 Aplicação do Plasma

Diversas aplicações são possíveis com a utilização da técnica de plasma, a nitretação possibilita uma melhora na dureza superficial e a resistência ao desgaste de materiais como ferro fundido, aços de baixa liga, aços de ferramentas, aços inoxidáveis, essas características são depositadas com a ação do nitrogênio na atmosfera do reator, realizando assim a dissociação com o meio e implantando átomos de nitrogênio na superfície do substrato (ALVES, 2001).

A deposição e formação de filmes finos em uma superfície possibilita a fabricação de circuitos VLSI (*Very Large Scale Integration*), esse tipo de circuito é chamado de integrado. Com a técnica é possível produzir vários componentes eletrônicos em uma única placa. Um exemplo desses circuitos são os microprocessadores comumente utilizados na computação, que através do processo obtém-se filmes com composições uniforme (TATSCH, 2000).

A deposição de filmes do tipo DLC (*Diamond-like Carbon*) torna possível a aplicação em componentes mecânicos automotivos e também na fabricação de nano diamante empregados em ferramentas de usinagem, à natureza do filme depositado apresenta características de um filme com elevada dureza e amorfo (DOS SANTOS, 2005).

2.1.2 Métodos de Alteração Superficial

Diversas características são adquiridas com a nova superfície formada com a técnica de plasma. Na literatura são indicados diferentes métodos de aplicação

desta tecnologia que envolvem o processo de *sputtering*, erosão, ataque químico, deposição de filmes finos, polimerização entre outros (ALVES, 2001).

Os métodos de alteração superficial podem ser diversificados e classificados em algumas modalidades como processo CVD e PVD. O processo CVD (*chemical vapor deposition*), o qual consiste em vaporizar um líquido dentro de um reator com a superfície do substrato aquecida promovendo a adesão do material evaporado. O PVD (*physical vapor deposition*), o qual industrialmente é muito utilizado, produz filmes a partir de alvos metálicos a serem depositados em um ambiente de vácuo. Muitas destas técnicas podem ou não serem assistidas a plasma, o que possibilita um melhor controle na deposição e espécies gasosas reativas que podem vir a formar os filmes com as características ópticas, elétricas, mecânicas e etc (TURRI, 2011). As alterações que ocorrem podem ser superficiais ou em camadas sub superficiais com implantação de íons por difusão nos materiais. Com a deposição de diferentes materiais é possível gerar filmes com características ópticas aplicadas em lentes, telas de computadores, câmeras fotográficas e camadas anti-refletoras em vidros.

2.1.2.1 Implantação iônica

Neste método é realizado um bombardeio de íons de alta energia sobre a superfície a ser tratada. Os íons positivos são atraídos e direcionados a superfície promovendo aquecimento e difusão iônica de espécies do plasma. Em alguns arranjos de equipamentos é possível utilizar um canhão de íons para o processo de implantação (SOUSA, 2006).

2.1.2.2 Ataque químico à plasma

A técnica de ataque químico à plasma, consiste na limpeza por ataque de íons, promovendo a retirada de partículas do material de um substrato. O método possui uma eficiência superior aos outros métodos de limpeza devido à alta energia iônica utilizada para o ataque. A energia de bombardeamento dos íons juntamente com uma atmosfera de baixa pressão, possibilita ao sistema obter uma excelente taxa de ataque, fazendo com que o processo químico retire grandes quantidades de partículas do substrato, tornando o método eficiente (HEDLER, 2014).

No processo de tratamento superficial com ataque químico a principal variável é o modelo do reator, o qual definirá a reprodutibilidade do tratamento. O confinamento do processo no reator gera um tratamento homogêneo e um estado de equilíbrio no ataque superficial, possibilitando que as partículas retiradas do substrato sejam implantadas na amostra com uma alta taxa de deposição. Alguns compostos químicos como oxigênio ajudam a melhorar a taxa de ataque do procedimento. O procedimento é aplicado em peças e componentes onde se deseja uma melhora na dureza e resistência ao desgaste (ALVES, 2001).

2.1.2.3 Deposição química de vapores a plasma

O método de deposição química por vapores CVD, é um processo aplicado dentro da indústria, isso deve-se as boas características do filme produzido. A maior aplicação deste método é no revestimento de nitreto de titânio (TiN). Esse composto é geralmente aplicado em ferramentas de aço para corte, usinagem e furação (JÚNIOR; RIBEIRO, 2003).

O processo de CVD é constituído pela evaporação do material a ser depositado e para que esse fenômeno aconteça é necessário que o composto passe por processos térmicos, que façam com que o material a ser depositado se transforme em vapor (AGUZZOLI, 2014). Os procedimentos que podem gerar vapor são: aquecimento resistivo, indução, utilização de feixe de elétrons entre outros, o aquecimento é responsável pela ionização do material a ser aplicado no componente.

O funcionamento da técnica utiliza alguns fatores, um deles é a pressão que o sistema deve conter sendo da ordem de 10^{-3} a 10^{-1} torr, outro fator é a taxa de ionização e a condensação. A deposição do revestimento ocorre com a ionização do gás, a pressão condensa o composto e faz com que o material fique próximo da região onde ocorre o plasma. Com a abertura do plasma o material começa a se deposita sobre a peça (ALVES, 2001).

2.1.2.4 Sputtering

Inicialmente o sputtering do cátodo era visto como algo maléfico para os tratamentos a plasma. No entanto, com estudos espectroscópicos foi verificado que o material arrancado do cátodo era depositado sobre a superfície de todo o reator

formando filmes (ALVES, 2001). A partir desta observação novos dispositivos foram desenvolvidos, como o caso do *magnetron sputtering*, o qual possibilitaram deposições controladas e crescimento dos filmes (NASCIMENTO, 2011).

Esse método consiste na aplicação de um gás neutro, geralmente argônio, dentro de um reator. Esse reator normalmente está pressurizado negativamente em vácuo, com isso é introduzido um potencial de energia. Essa energia pode ser adicionada com fontes de corrente alternada (CA), corrente contínua (CC), gerador de rádio frequência (RF), micro-ondas e etc. A energia injetada no sistema, ou elétrons, possibilita a formação dos íons que serão os responsáveis em gerar o ataque ao alvo (TATSCH, 2000).

Os gases também podem conter proporções de nitrogênio ou oxigênio. Nestes casos há possibilidade de gerar um óxido superficial ou um processo de nitretação. Na técnica utilizando um gás reativo o material ejetado do cátodo faz ligações químicas durante o processo de sputtering e o filme formado pode ser estequiométrico. Com a utilização desta técnica a interação dos materiais atômicos é possível à criação de filmes finos com homogeneidade, aderência e características superficiais dos materiais desenvolvidos no processo (FEIL, 2006).

Para que o procedimento alcance os objetivos, ele deve conter parâmetros específicos para a execução e funcionamento do sistema. Algumas condições de processo de retirada de material de um alvo são necessárias, entre elas: tensões de trabalho na ordem de 100V a 1000V, frequência de ligação da fonte, que pode variar de kHz para Mhz para modelos de equipamentos instalados para grande aplicação, que ocorre em processos industriais (ALVES, 2001). O crescimento de filmes utilizando a técnica de sputtering pode gerar filmes utilizados em componentes elétricos como chips, microcircuitos e sensores (MOURA, 2010).

2.1.2.5 PECVD

O processo de *plasma enhanced chemical vapor deposition* realiza a modificação de superfícies de forma parecida com a técnica *sputtering*. Basicamente o gás é ionizado devido a carga elétrica aberta dentro da câmara de vácuo. Nesse tipo de tratamento as frequências são mais elevadas por influência da pressão utilizada de 0,1 a 1 torr a mais que o processo por sputtering, ocasionando um maior ataque/colisões entre elétrons (SANT'ANA, 2014). O procedimento é amplamente

usado na implementação de filmes em embalagens de alimentos como embalagens PET. Geralmente esse processo está relacionado com a melhorar da aderência de superfícies (ZANIN et al., 2006). Inúmeras vantagens a técnica proporcionam ao componente como: uniformidade do filme, alta aderência, boa estabilidade térmica etc (ROCHA, 2009).

2.1.2.6 Polimerização

Nessa técnica o procedimento é bem parecido com o PECVD, porém a ionização ocorre em um monômero orgânico, onde é inserido em um reator com um gás inerte, o mesmo recebe uma descarga elétrica de mesma intensidade que o do sistema anterior. A técnica de polimerização é extremamente dependente de algumas variáveis que controlam a taxa de deposição, as variáveis são: fluxo elétrico, potência elétrica, volume, área de descarga, etc. (ASSIS, 2010). A polimerização é amplamente utilizada para criar filmes do tipo hidrofílicos, suas vantagens são boas uniformidades, pequena quantidade de resíduos, temperaturas controladas e baixa no substrato e diversidade de materiais a serem aplicados (CARVALHO; SILVA, 2008).

2.1.3 Reatores de Plasma

Os reatores são equipamentos com características construtivas que levam em consideração o sistema de vácuo (bomba mecânica, difusora turbo molecular), sistema de entrada de gás (válvulas agulha), sistema elétrico com as fontes de alimentação como (corrente contínua, alternada, rádio frequência) e o sistema de *magnetron* (alvo do metal a ser depositado, ímãs, placa de ferro doce).

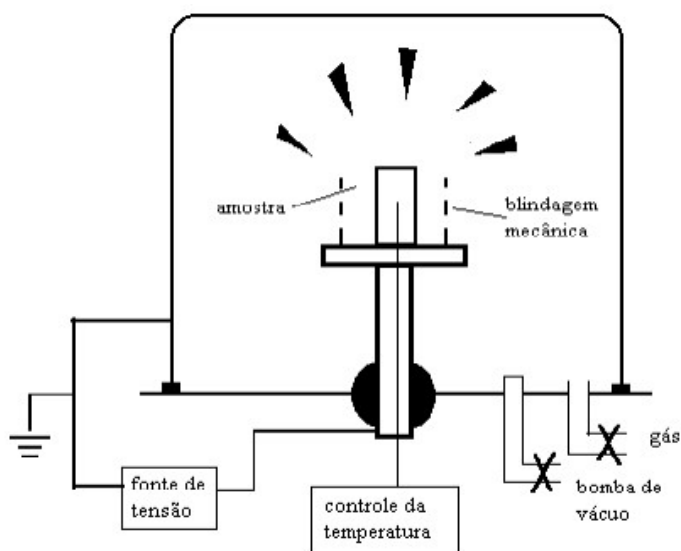
Os reatores aplicados no setor industrial, geralmente são construídos de metais ou aços. No caso de estudo acadêmicos e processos amadores a utilização do vidro ou polímero se torna a opção mais atrativa em relação aos custos de fabricação (MACHADO et al. 2015). O reator é um componente hermeticamente fechado e estável, isto é, as interações atômicas externas do processo não devem alterar a constituição química e a integridade física do reator (SOUZA, 2013).

O reator é um componente que é derivado de vários sistemas. Esse equipamento utiliza alguns dispositivos como o sistema de vácuo, esse sistema é responsável por gerar pressões negativas, retirar contaminantes e garantir que a

atmosfera do reator esteja preparada para que ocorra a abertura do plasma (MENDES, 2001). O sistema de alimentação geralmente é constituído por uma fonte de energia e seus cabos ligados no reator mais precisamente no catodo.

O controle da atmosfera é importante, visto que no processo são usados gases no procedimento. É importante que a câmara não gere obstruções e nem tenha qualquer tipo de vazamento de gás. O sistema de resfriamento é um dispositivo que depende da intensidade de trabalho e temperatura dos componentes, sua aplicação é voltada no arrefecimento do reator não deixando com que o equipamento tenha um superaquecimento (BESSELER, 2008). Na Figura 2 é possível verificar um modelo esquemático do funcionamento de um equipamento de nitretação iônica.

Figura 2 - Modelo esquemático de um reator que realiza nitretação iônica.



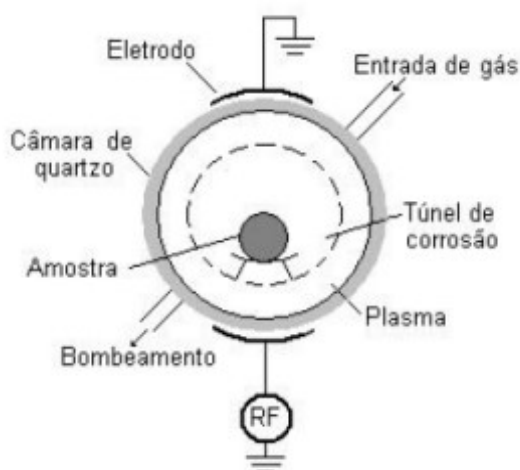
Fonte: Adaptado de JONES, 1975.

Os reatores à plasma podem ser confeccionados de vários modelos, contendo diversas aplicações e diferentes resultados na deposição do filme, isso se deve as características construtivas. Dentro dos reatores existem diversos exemplos e constituições possíveis, sendo que o foco de todas elas é realizar a aplicação de tratamentos superficiais a plasma. Como exemplo podemos citar alguns dos reatores mais usado como: Tipo barril, *Downstream*, ECR, ICP entre outros (TURRI, 2011). A próxima seção apresentará os mais utilizados.

2.1.3.1 Reator do tipo barril

O primeiro modelo de reator a plasma construído. Seu formato é desenvolvido representado um barril. Para esse tipo de modelo a construção pode ser constituída de metal ou de quartzo. O reator em barril é usado em aplicações de pulverização catódica, sendo aconselhável a construção da câmara em quartzo (NUNES, 2005). O equipamento é constituído por sistema de vácuo, sistema de alimentação utilizando rádio frequência RF, sistema de alimentação de gás, túnel de corrosão e etc. É um sistema que gera altas produções, porém as amostras não são uniformes (BESSELER, 2008). Na Figura 3 é possível observar o modelo construtivo do reator do tipo barril.

Figura 3 - Modelo esquemático de reator do tipo barril

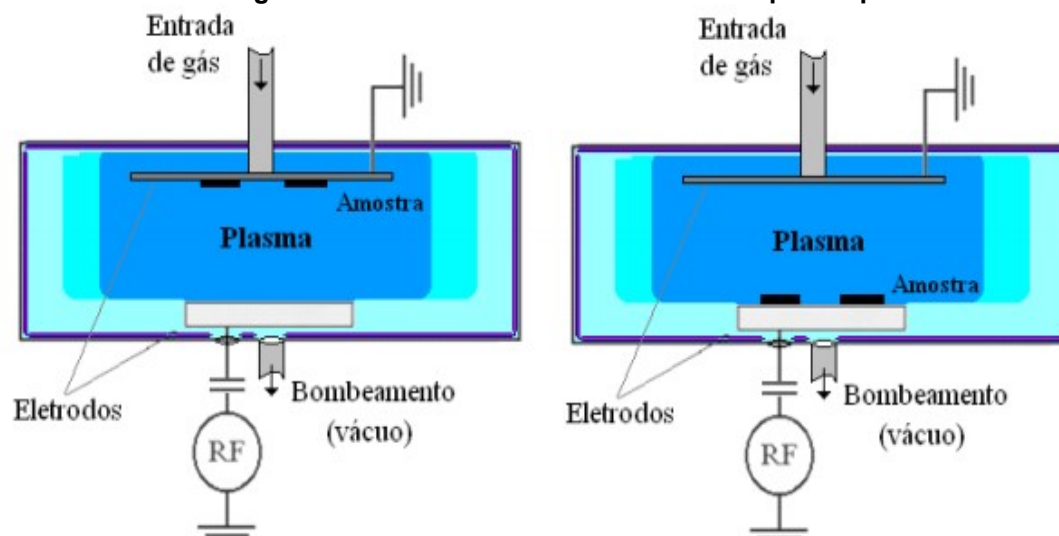


Fonte: NUNES, (2005).

2.1.3.2 Reator de placas paralelas

O reator planar ou placas paralelas é de interesse devido a diferença entre as placas que podem trabalhar como eletrodos quando aplicado uma diferença de potencial elétrico. Com esses parâmetros alterados o conjunto é construído para ter diferenças tanto na dimensão quanto na carga elétrica dos cátodos, tornando possível um melhor direcionamento dos íons para o bombardeamento da superfície da peça. Na Figura 4 é possível verificar as imagens da área interna e o modelo esquemático do reator de placas paralelas.

Figura 4 - Modelo de reator constituído de placas paralelas



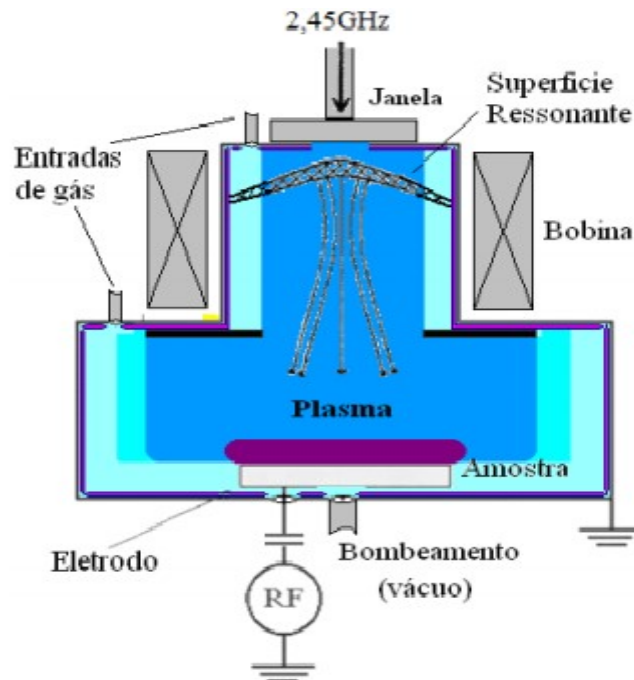
Fonte:

BESSELER, (2008).

2.1.3.3 Reator de plasma remoto

Esse tipo de reator o plasma é realizado em uma câmara separa do substrato, e os compostos ionizados são transferidos para o local onde se encontra a amostra, com isso é possível realizar a deposição (TATSCH, 2000). Esse tipo de sistema pode gerar vantagens no tratamento da superfície devido ao componente a ser tratado não sofrer com irradiações do plasma. Com essas atribuições o processo apresenta características como baixa pressão e temperatura, esse equipamento consegue proporcionar vantagens como boa uniformidade, boa densidade de plasma, boa deposição de filmes finos e etc (NUNES, 2005). Na Figura 5 é possível verificar a imagem do sistema construtivo e seu funcionamento esquemático.

Figura 5 - Reator de plasma remoto.



Fonte: BESSELER, (2008).

2.1.4 Processo de Nitretação

A nitretação a plasma é um método no qual o gás nitrogênio é implantado na área superficial de um material, tendo como finalidade uma melhora nas características específicas do material. É de destaque alguns aspectos técnicos que o tratamento possibilita como: maior dureza, elevação da resistência ao desgaste e melhora na resistência a fadiga. Todas as modificações geradas pelo método são devido a formação de nitretos e a dissolução do átomo de nitrogênio na superfície do material, que é misturado com a formação atômica interna do componente sendo introduzido na superfície (REIS & BORGES, 2008).

No processo de nitretação a peça é inserida dentro de um reator que é hermeticamente fechado, afim de que o sistema de vácuo gere pressão em escalas negativas, com a câmara em um estado de evacuação adequado. O sistema de distribuição de nitrogênio entra em funcionamento e insere uma quantidade de gás N_2 . Com a entrada de um gás e um diferencial de potencial aplicado, o plasma abre interagindo com os átomos do nitrogênio, o processo de interação atômica é chamado de dissociação, essa reação faz com que os íons bombardeiem o substrato e o nitrogênio seja implantado na superfície (SOUSA, 2007).

O método de nitretação gera aquecimento da peça e esse fenômeno pode ser atribuído ao bombardeamento dos íons contra a superfície do componente. Com o ganho de temperatura o nitrogênio inicia difusão. Os íons colidem com o substrato gerando fendas onde os componentes químicos de N_2 são implantados na superfície da amostra (BALLES, 2004).

Os procedimentos de nitretação são amplamente utilizados nas indústrias, sendo bastante empregados na melhoria de superfícies gerando um melhor desempenho na peça. Essa técnica é utilizada na maioria dos casos em materiais como: ferros, aços, alumínio, titânio, entre outros (GOBBI, 2009).

2.1.4.1 Nitretação gasosa

A nitretação gasosa é um processo de tratamento superficial que se utiliza de gases para realizar a alteração de propriedades micro estruturais de um material. O emprego de diferentes gases no processo de melhoramento de propriedades é essencial por ser uma alternativa na obtenção de diferentes tipos e características de materiais gerados para as aplicações em componentes (SKONIESKI et al., 2010).

A utilização de um meio gasoso para melhorar as propriedades é devido a alta temperatura e a implantação de nitrogênio na superfície da peça (Garzón & Tschiptschin, 2005). Com esses fatores estabilizados e a peça com temperatura adequada é possível que o íon de nitrogênio seja inserido em camadas superiores da peça, realizando assim o processo. O método de nitretação com gás é responsável por realizar tratamentos em peças e componentes como: turbinas, pistões hidráulicos, tubulações, válvulas entre outros (Garzón & Tschiptschin, 2005).

2.1.5 Seleção de materiais

Cada subgrupo de materiais é dependente de determinadas propriedades, que são fornecidas pelas características estruturais do composto, as características podem influenciar na escolha e seleção de um material. Sendo estas o tipo de polímero empregado na vedação ou o tipo de material que apresente suportabilidade térmica compatível com o processo. A seleção de materiais atuou de forma direta, levando em conta as propriedades desejadas e o custo (ASHBY, 2013). Para a confecção deste equipamento foram selecionados o Alumínio, Nylon, Aço Inoxidável

e vidro. A seção abaixo apresenta de forma direta como cada material foi empregado e a sua importância no projeto.

2.1.5.1 Alumínio

O alumínio foi um material utilizado na fabricação das peças do sistema de vácuo em geral. Devido as suas propriedades como o baixo peso, ductilidade, resistência a corrosão, vida útil, usinabilidade e baixo custo foi utilizado na confecção de diversos componentes (GIUDICE, 2017). Com essas características atribuídas ao material pode-se afirmar que as propriedades são de interesse, na fabricação de componentes.

2.1.5.2 Nylon

As propriedades que fazem o nylon ser escolhido para o procedimento são: baixo peso, vida útil prolongada, não condutividade elétrica, rápido processo de usinagem (MACHADO, 2011). O uso da peça em nylon é importante, isso pode ser explicado devido ao cátodo estar acoplado na peça por interferência, com isso o nylon isola todo o reator e deixa que apenas o catodo conduza eletricidade para dentro da câmara.

2.1.5.3 Aço inoxidável

O aço inoxidável é um material que foi usado na confecção do cátodo e do reator. Suas propriedades, além do custo estão: a condução de eletricidade, resistência a corrosão e mecânica, elevada dureza e condutividade elétrica entre outras propriedades (TSCHIPTSCHIN, 2010).

2.1.5.4 Vidro de boro silicato

O vidro é um material atrativo a projetos e dimensionamentos nos quais existem a necessidade de supervisão. Os reatores utilizam esse componente devido as propriedades no qual pode-se utilizar como: isolantes térmicos e elétricos e também a transparência que possibilita a visão na região interna do sistema e as avaliações no interior do equipamento (LOPES, 2018).

2.1.6. Sistemas de Vácuo

O sistema de vácuo é responsável pela abertura e qualidade do plasma. O conjunto de tubulações e bombas tem como objetivo gerar pressões negativas dentro da câmara do reator, a pressão é uma das variáveis que possibilita a abertura de plasma e cria as condições necessárias para a realização do tratamento (DEGASPERI, 2002). O sistema de vácuo é constituído por conexões que ligam o reator até a entrada da bomba de vácuo, anéis de vedação, abraçadeiras, válvulas de controle e de pressão. Todos esses componentes são responsáveis pelo funcionamento do conjunto (SALMORIA; FÚCIO, 2013).

O sistema de vácuo conta com elementos como bomba mecânica de vácuo e sensores de pressão. Esse componente é de extrema importância em processos de geração de vácuo. O principal objetivo foi realizar a retirada de átomos que compõem o gás atmosférico (DEGASPERI, 2002). Com isso há a possibilidade de controlar a atmosfera dentro do reator. As bombas de vácuo mecânica operam com paletas rotativas em um banho de óleo obtendo pressões próximas a 10^{-2} mbar.

2.1.7 Fontes de Alimentação para o Reator a Plasma

Para a abertura e manutenção do plasma é necessário a utilização de fontes de alimentação, podendo estar serem dos mais diversificados modelos e potências. Esse conjunto tem como objetivo gerar cargas elétricas e direcionar para a região interna do reator. As fontes são responsáveis pela alimentação elétrica do reator, na maioria dos casos os reatores utilizam demanda energia para realizar e obter os resultados esperados com a técnica. A demanda energética depende de algumas variáveis como: a técnica utilizada, modelo de reator e a capacidade da fonte (CASSINI, 2014). Em sistemas de baixo custo uma das alternativas utilizadas é o uso do micro-ondas.

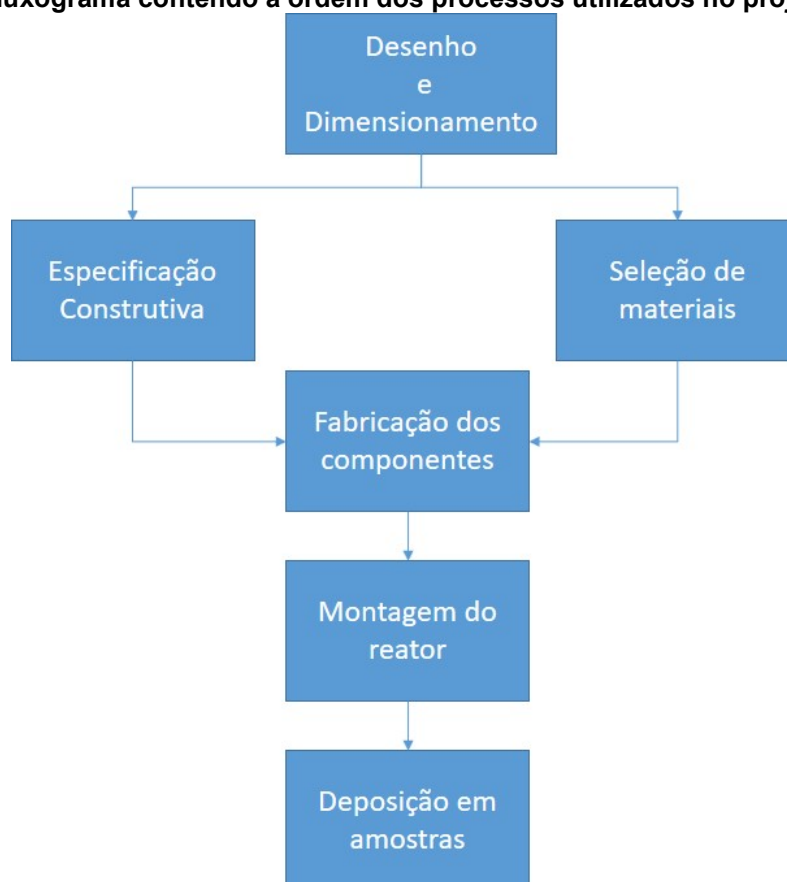
Em outros casos existem fontes específicas que controlam tanto a demanda elétrica quanto o pulso energético para atender as especificações da técnica (FELISBERTO, 2006). As fontes utilizadas para a alimentação dos reatores são corrente contínua, corrente alternada e rádio frequência (BORGES, 2005). A escolha da fonte de energia remete ao tipo de deposição e as características do filme.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DELIMITAÇÃO E MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS

Para a realização das atividades e execução dos objetivos específicos foi necessário um estudo e um levantamento dos materiais e processos que envolvem a construção de um reator. No desenvolvimento do projeto foi indispensável à utilização de alguns metais e polímeros, assim como o emprego de métodos de fabricação. Foi utilizado um cilindro de aço inox que apresentava algumas características semelhantes a um reator a plasma. Esse sistema foi adquirido de como empréstimo de projeto sob responsabilidade do professor Dr Lucas Máximo Alves. Os respectivos processos de fabricação foram realizados dentro dos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Guarapuava. Na Figura 6 são apresentadas as etapas do projeto.

Figura 6 - Fluxograma contendo a ordem dos processos utilizados no projeto do reator.



Fonte: Autoria própria.

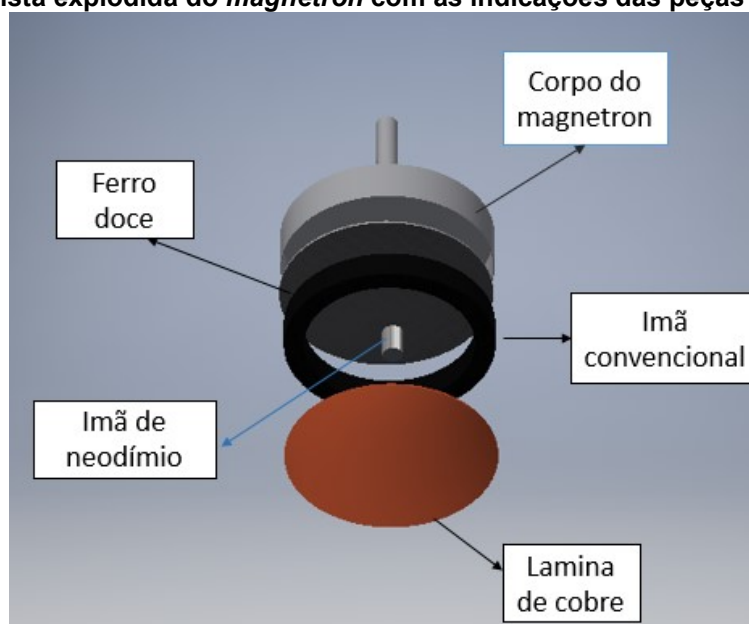
3.1.1 Desenho e Dimensionamento dos Componentes Utilizados no Reator

O processo de dimensionamento e desenho são etapas da projeção de funcionamento reator. Para iniciar os desenhos, as dimensões dos componentes e da câmara de doação foram realizadas. Foi realizada o dimensionamento do reator de doação e dos outros componentes que compõe o conjunto do reator e do sistema. Vale ressaltar que os componentes a serem fabricados serão utilizados para a vedação do reator no processo de obtenção de vácuo. Foi realizado as medições do reator de doação com a utilização de um paquímetro marca DIGIMESS com resolução 0,05 mm

3.1.1.1 Sistema do tipo *magnetron*

Para o desenvolvimento do conjunto de *magnetron* é necessário entender quais componentes são pertencentes a esse sistema e quais as suas respectivas funções. O desenho deve conter todas as características estruturais de um *magnetron* como: suporte em alumínio, placa de ferro doce, um ímã circular e um em anel (NASCIMENTO, 2011). Como alvo foi utilizado uma chapa de cobre. Na Figura 7 é possível verificar as peças constituintes do sistema do tipo *magnetron*.

Figura 7 - Vista explodida do *magnetron* com as indicações das peças constituintes



Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Especificação do Projeto Construtivo

Para a construção de um equipamento, máquina, ou realizar qualquer modelo de projeto, existem partes constituintes que traçam as formas e direções a serem seguidas para a concretização de um projeto. Na construção de um reator, as ferramentas mais importantes são o dimensionamento dos equipamentos e um desenho detalhado dos sistemas a serem confeccionados. As especificações do projeto servem para determinar as ordens de dimensionamento e de fabricação dos componentes, visando sempre atender os requisitos necessários para o reator, mantendo assim qualidade e atendendo a funcionalidade de cada sistema que compõem o conjunto.

3.1.3 Seleção de Materiais

O procedimento de seleção de materiais é de grande importância dentro da elaboração de projetos de máquinas, ferramentas e elementos mecânicos. Sua principal função é relacionar as melhores propriedades com as características desejadas pelo projeto. No desenvolvimento do reator a aplicação da seleção de matérias foi utilizada usando rotinas de seleção para garantir um menor custo com materiais e atender as especificações e características necessárias para os sistemas do projeto.

A seleção avaliou as características com maior utilização na construção do reator. As propriedades em destaque para os materiais são: características dielétricas, condutor elétrico, material com resistência a corrosão, durabilidade e baixo custo. Os materiais utilizados foram alumínio, nylon, aço inoxidável, vidro e cobre. Na Tabela 1 pode ser verificado a relação dos materiais utilizados no projeto e as respectivas peças fabricadas.

Tabela 1 - Correlação entre materiais utilizados e suas propriedades inerentes na fabricação de peças.

Componente	Material	Propriedade
Flange da tampa inferior	Alumínio	Resistência a corrosão/baixo peso
Flange de ligação entre bomba e reator	Alumínio	Resistência a corrosão/baixo peso
Tampa suporte do cátodo	Nylon	Característica isolante elétrica
Cátodo	Aço Inoxidável	Condução de eletricidade Resistência a corrosão
Janela de supervisão	Alumínio Vidro	Resistência a corrosão Isolante elétrico, Translúcido
Pino de vedação	Alumínio	Resistência a corrosão/baixo peso
Válvula de escape	Alumínio	Resistência a corrosão/baixo peso
<i>Magnetron</i>	Alumínio Cobre	Condução de eletricidade Alvo

Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Fabricação dos Componentes

O processo de fabricação dos elementos construtivos do reator, foi realizado com alguns equipamentos e ferramentas disponibilizadas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, os aparelhos utilizados foram: furadeira e o torno. Toda a parte construtiva se estabeleceu na aplicação do método de usinagem, dentro da técnica de usinagem foi realizado o procedimento de torneamento, furação e a realização de rosca em alguns componentes.

3.1.4.1 Ferramental

No desenvolvimento do reator a plasma o principal mecanismo para realizar a fabricação das peças foi o torno marca Nardini modelo Mascote. O processo de usinagem consiste na retirada de material de um componente até atingir as medidas e dimensões projetadas, mantendo a qualidade de acabamento evitando sujidades que possam interferir no processo de vácuo. As ferramentas utilizadas na fabricação foram brocas com tamanhos que iniciam com 5 até 23 mm, na usinagem das peças as ferramentas utilizadas para desbaste foram o bedame fabricado em aço rápido e pastilhas de corte da marca Mitsubishi. Na Figura 8 é possível verificar a imagem do torno convencional utilizado nos processos de usinagem.

Figura 8 - Torno utilizado na fabricação dos componentes do reator.



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Montagem do Reator

Para o funcionamento do reator foi necessário a montagem de todos os sistemas que fazem parte dele, a montagem pode ser dividida em três partes, montagem dos componentes que se referem a câmara de tratamento, os elementos que fazem parte do sistema de vácuo, e a montagem do sistema de alimentação. Quando é falando em montagem de reatores alguns cuidados devem ser cuidados.

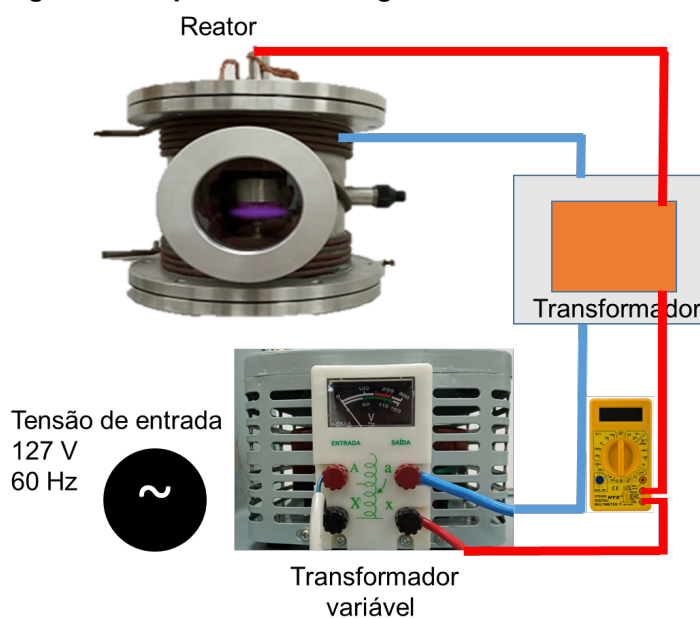
Para a obtenção de pressões negativas e tratamentos com maior controle no crescimento dos filmes são necessárias alguns procedimentos, entre eles garantir a limpeza do sistema Os elementos a serem montados devem passar por um procedimento de limpeza, que parte do básico que foi a lavagem das peças em água corrente para a retirada de sujidades mais grosseiras, após a primeira etapa os elementos lavados passam por uma secagem em condição ambiente e ficam prontos para o próximo processo, a etapa seguinte foi a secagem e limpeza com álcool isopropílico ou acetona, esses materiais fazem a retirada de contaminantes orgânicos que ainda podem estar na peça.

Terminando a etapa de limpeza das peças foi realizado o procedimento de secagem com ar quente garantindo uma peça seca e limpa.

3.1.5.1 Montagem do sistema de elétrico

A montagem do sistema elétrico foi composta por poucos componentes isso torna possível uma montagem rápida. Foi desenvolvido uma fonte de corrente alternada com a utilização de um varistor e um transformador. Para a utilização da fonte é necessária uma verificação sobre seu estado de funcionamento, com a verificação feita, inicia-se a montagem do resto do sistema, os fios positivo e negativo devem ser separados, o positivo é acoplado no cátodo fabricado em aço inoxidável, e o negativo vai para a base metálica do reator fazendo o aterramento. Com as etapas cumpridas a fonte pode ser utilizada. Os elementos constituintes desse projeto são: fonte de alimentação, transformador, cabos de ligação e um multímetro na escala de amperímetro marca Minipa. A fonte de alimentação foi ligada ao transformador, com isso a tensão de entrada do reator aumenta e a corrente de entrada baixa, o amperímetro foi ligado logo após a saída do transformador, fazendo a função de monitoramento dos valores de corrente. Na Figura 9 está indicado o esquemático do sistema elétrico utilizado no reator.

Figura 9 - Esquema de montagem da fonte AC no reator



Fonte: Autoria própria.

3.1.5.2 Montagem do sistema de vácuo

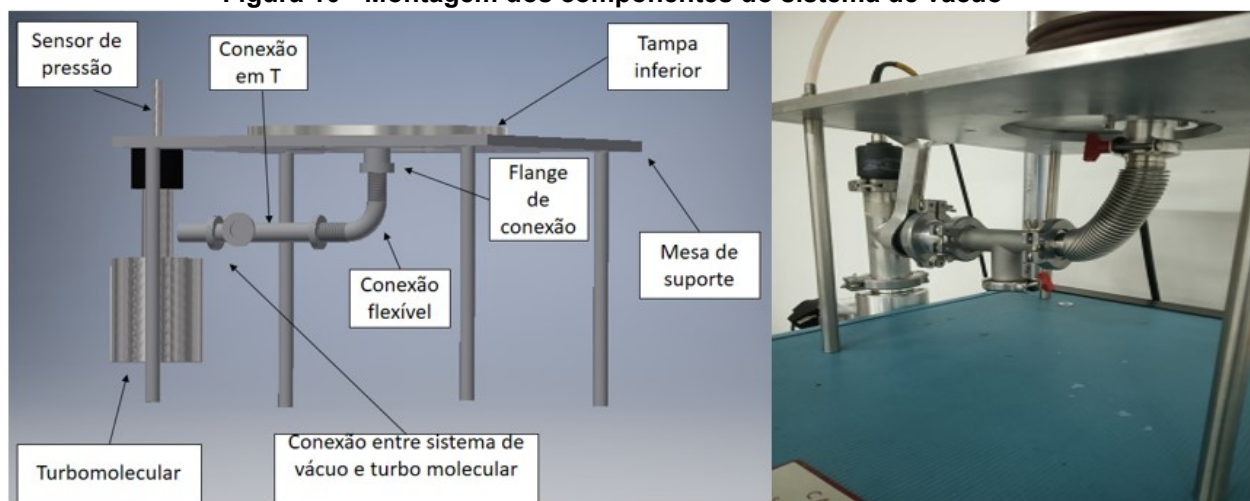
O sistema de vácuo foi o conjunto responsável por gerar pressões negativas no reator. As peças que fazem parte desse sistema estão apresentadas na Figura 10 e são constituídos pelo flange inferior, flange da bomba molecular, peça de

vedação da câmara, flange de quebra de vácuo, para iniciar a montagem desses elementos todos devem estar devidamente limpos, para que suas contaminações não influenciem na geração do plasma e suas deposições.

A flange inferior é o primeiro elemento construtivo do sistema de vácuo, esse componente é conectado a tampa inferior e seu flange fica à disposição de outra conexão do sistema de vácuo. O segundo flange tem a função de conectar a bomba de vácuo a bomba turbo-molecular, essa conexão permite uma maior geração de vácuo dentro da câmara melhorando o funcionamento do sistema.

O elemento de vedação é uma peça cilíndrica que vai na parte traseira do reator, permitindo que o mesmo seja hermeticamente fechado, não deixando a possibilidade de falha na vedação. A última peça que constitui o sistema de vácuo é a válvula de quebra de vácuo, esse elemento possibilita retirar a pressão negativa ou de término do processo de tratamento.

Figura 10 - Montagem dos componentes do sistema de vácuo



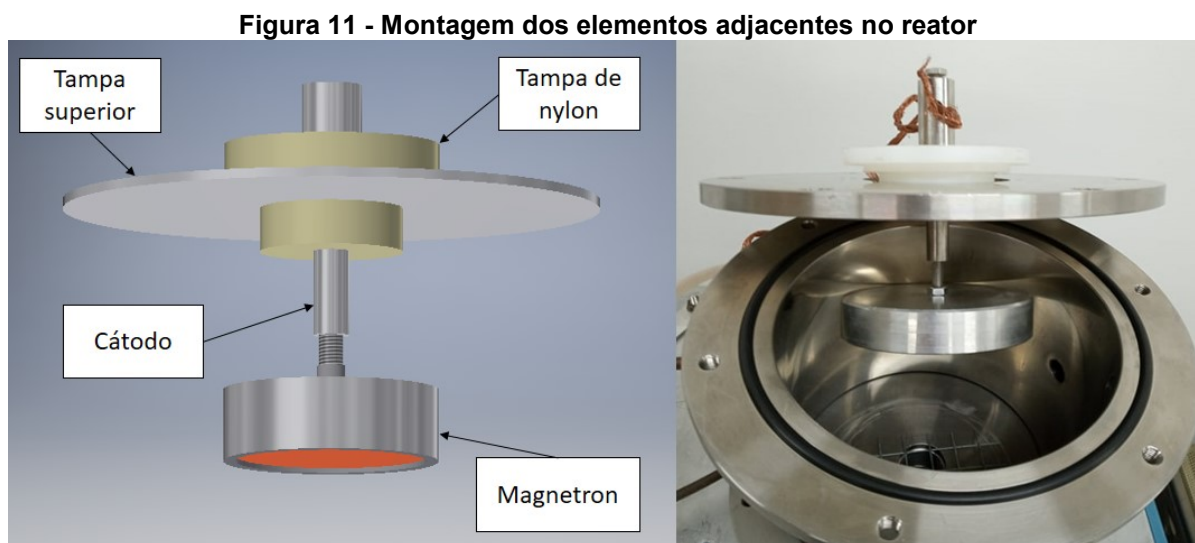
Fonte: Autoria própria.

3.1.5.3 Montagem dos componentes no reator

O reator é constituído por um conjunto de sistemas e componentes que possibilitam o funcionamento do processo, basicamente o reator é um sistema central, com isso abre a possibilidade de diversos componentes serem montados nele, como é o caso do conjunto de vácuo e de alimentação, porém à componentes que são diretamente dimensionado para o corpo do reator, como é o caso da janela de supervisão, tampa superior de nylon, cátodo, esses elementos são fabricados visando sua atuação na melhoria do processo.

A janela de inspeção é um componente fabricado e montado na parte frontal do reator, possibilitando uma melhor visualização da técnica, seu acoplamento garante rigidez e boa visibilidade. Sua montagem visa encaixar o componente no corpo do reator.

A tampa de nylon é um componente que visa a vedação do sistema junto com a inserção do cátodo, sua montagem é na parte superior do reator, e consiste no encaixe do componente de nylon e inox, na superfície superior do equipamento, o inox é inserido na tampa de nylon por meio de interferência após esse processo o equipamento de vedação é acoplado a tampa superior do reator, com a tampa em nylon acoplado na tampa do reator o *magnetron* é parafuso no cátodo, com isso é possível o funcionamento do reator. Na Figura 30 é possível verificar a imagem interna do reator e o conjunto de elementos adjacentes montados. Na Figura 11 é possível verificar a imagem da montagem em software e a montagem após fabricação das peças.



Fonte: Autoria própria.

3.1.6 Preparação das Amostras e Deposição

Para a realização das deposições e verificação da funcionalidade do sistema foram utilizadas lamínulas para microscopia nas dimensões de 22 x 22 x 3 mm. As lamínulas foram previamente limpas com álcool isopropílico e secas em papel. Foram tomadas precauções para não ocorrer contaminação de sujidades na superfície, como o uso de luvas.

A deposição nas amostras consiste em etapas que devem ser seguidas sistematicamente como: preparação da amostra, limpeza do reator, montagem da lamínula no suporte, fechamento da tampa superior do reator, realizar a ligação do sistema de vácuo, avaliar a pressão necessária 4×10^{-2} mBar, ligar a fonte de alimentação e regular em 100 mA. As deposições foram realizadas em patamares de 30 s totalizando 10 amostras. Foram realizadas as deposições nas amostras com duas distâncias do alvo, inicialmente com 45 mm e após com 78 mm. A bomba de vácuo utilizada foi a Edwards 18 com monitoramento de vácuo com o sistema Combivac 31.

Na Tabela 2 é possível verificar os parâmetros utilizados para a deposição de filmes finos em cobre.

Tabela 2 - Tabela com os parâmetros de funcionamento necessários para a deposição.

Parâmetros necessários	Valores correspondentes
Pressão de Trabalho	$4 \cdot 10^{-2}$ mbar
Corrente de trabalho	100 mA \pm 5
Tempo de Deposição	30 s até 300 s com incremento de 30 s

Fonte: Autoria Própria

3.1.7 Procedimento e Etapas do Processo de Metodologia

Na Tabela 3 são indicadas as etapas do dimensionamento, seleção de materiais e fabricação dos componentes, além da montagem e tratamento das amostras.

Tabela 3 - Tabela com etapas constituintes do modelamento do projeto.

Etapas	Atividade	Descrição
Primeira	Desenho, dimensionamento e fabricação	Flange de saída do reator Flange bomba de vácuo Tampa superior Cátodo Janela de supervisão Componentes de vedação da câmara Flange para a válvula de escape Sistema <i>magnetron</i>
Segunda	Montagem	Montagem da câmara Montagem do sistema de vácuo Montagem do sistema elétrico Testes do sistema de vedação de vácuo
Terceira	Deposição de filmes	Testes de deposição do <i>magnetron</i> com alvo de cobre

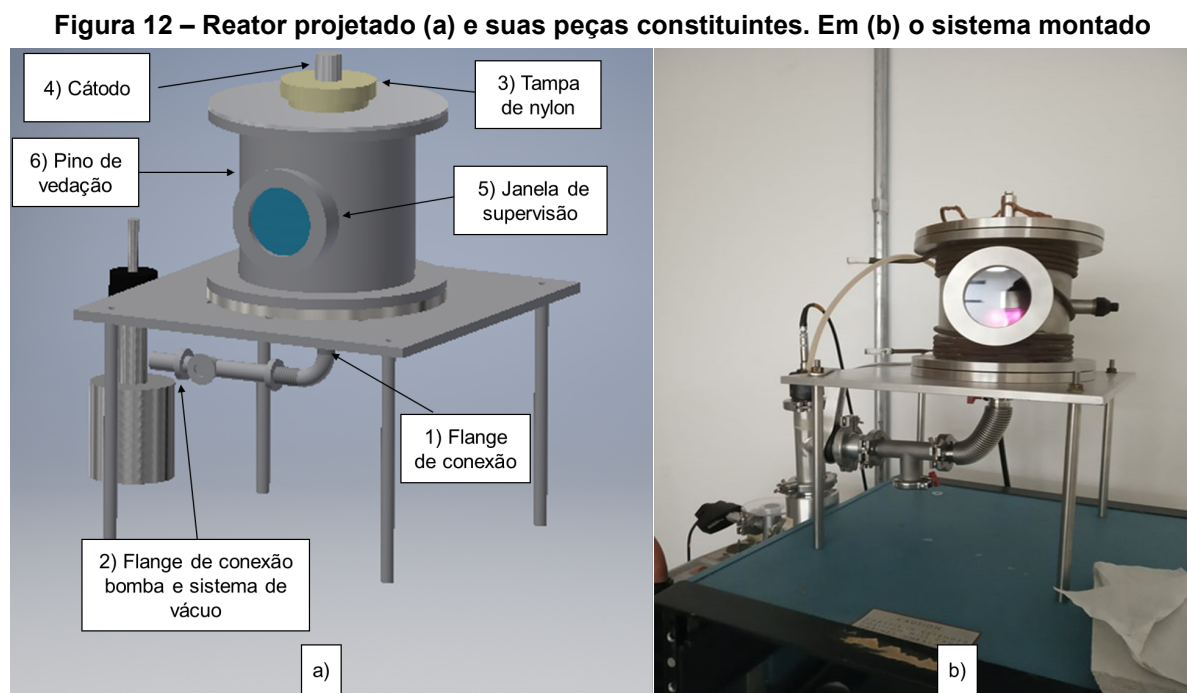
Fonte: Autoria Própria

As etapas de deposição seguiu um protocolo adotado como medida de segurança e limpeza do sistema durante o procedimento. Inicialmente foi realizado o processo de limpeza e inserção das amostras no reator, montagem correta do reator com encaixe de todas as partes mecânicas, testes do sistema de vácuo, parâmetros pré-definidos para abertura do plasma com a fonte, tempo de duração da deposição (30 até 300 s) e abertura do reator. Os cuidados de segurança levam em consideração a utilização de altas tensões durante o processo de deposição.

4 RESULTADOS

Neste capítulo os resultados experimentais obtidos foram apresentados e discutidos, que incluem a apresentação dos dimensionamentos e fabricação das peças. Também foi apresentada as deposições de filmes de cobre em lamínulas de vidro com variação de tempo e distância.

Na Figura 12 (a) pode ser visualizado o reator com suas principais partes. São indicados as peças realizadas neste trabalho como: 1 – flange de conexão; 2 – flange de conexão bomba e sistema de vácuo; 3 – tampa em nylon; 4 – cátodo; 5 – janela supervisão e 6 – pino de vedação. Na Figura 12 (b) pode ser visualizado o reator montado.



Fonte: Autoria própria.

4.1 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VÁCUO.

O sistema de vácuo foi onde ocorreu o maior número de dimensionamentos e fabricações. O número é grande devido a quantidade de flanges e tubos que precisam ser fabricados para realizar a conexão das bombas de vácuo e o reator. Há componentes que atuam apenas na vedação do reator. Esses componentes

desse sistema são a flange de conexão entre o reator e conexões de vácuo, flange de ligação entre as tubulações do reator e a turbo molecular, pino de vedação. Janela de supervisão.

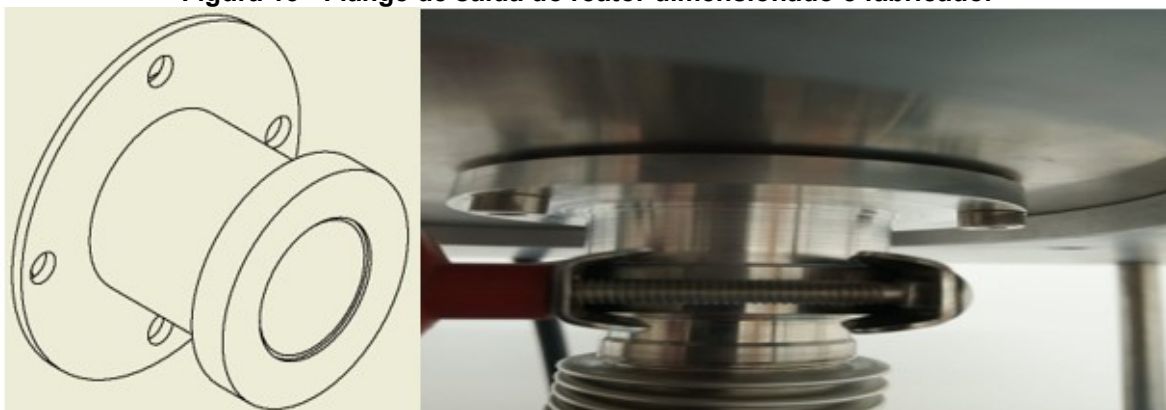
4.1.1 Dimensionamento e Construção do Flange de Saída do Reator para as Conexões de Vácuo

Para o dimensionamento desse componente foi necessário medir a saída pré usinada da tampa do reator para estimar as medidas e avaliar o melhor tipo de acoplamento. Esse flange tem a função de vedar a câmara, além de servir como um acoplamento para as conexões do sistema de vácuo, fazendo com que a bomba mecânica de vácuo e o reator estejam conectados.

Para a fabricação desse componente o material escolhido foi o alumínio, devido a sua versatilidade e seus atributos corresponderem as necessidades exigidas para a peça. O processo de usinagem aconteceu em etapas: torneamento para retirada de imperfeições do tarugo, torneamento para retirar o excesso de material, furo de centro, torneamento da face de conexão com a tampa do reator, torneamento do flange que se prende ao reator, usinagem do pescoço que serve de espaçador, torneamento do flange que se conecta com a tubulação do sistema de vácuo e por fim os torneamentos dos oring's de vedação e a furação central da peça.

Cada uma dessas etapas tornou possível o torneamento do componente, com a obtenção de uma boa tolerância nas dimensões e acoplamentos. As medidas desse componente foram retiradas da aferição do diâmetro externo de 62 mm do flange de saída com diâmetro de 40 mm, furo central do reator de 23 mm e face parafusada na tampa inferior do reator com 42 mm, todas as informações foram retiradas do corpo do reato. Na Figura 13 é possível verificar a vista isométrica do dimensionamento e a imagem do componente fabricado. Para medidas e mais informações verificar o Apêndice A.

Figura 13 - Flange de saída do reator dimensionado e fabricado.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Dimensionamento e Fabricação do Flange de Conexão entre a Bomba Mecânica e o Sistema de Vácuo

Esse componente foi dimensionado para trabalhar em conjunto com o sistema da bomba mecânica. Esse elemento tem a função conectar as duas partes constituintes do sistema de vácuo. O flange foi conectado diretamente na entrada da bomba mecânica e com uma tubulação em alumínio possibilitou o caminho com a tubulação em T e o reator.

O torneamento seguiu os passos convencionais de fabricação, como retirada das imperfeições, desbaste até a dimensão ideal, furação de centro e etc. Esse componente é utilizado como um sistema de conexão entre a turbo-molecular e a bomba de vácuo, o dispositivo consiste em um flange torneado em alumínio que trabalha no acoplamento do sistema turbomolecular, a flange tem um formato circular com diâmetro de 30 mm e furação central de 17 mm, o corpo do componente tem um diâmetro de 25,40 mm e é ligado na tubulação da bomba de vácuo. Esse elemento é fabricado em alumínio, devido as propriedades que o material proporciona como baixo peso e boa resistência a corrosão. Na Figura 14 é possível visualizar a modelagem 3D da peça e sua construção. Para mais informações consultar o apêndice B.

Figura 14 - A esquerda o dimensionamento do componente e a direita a peça fabricada.



Fonte: Autoria própria.

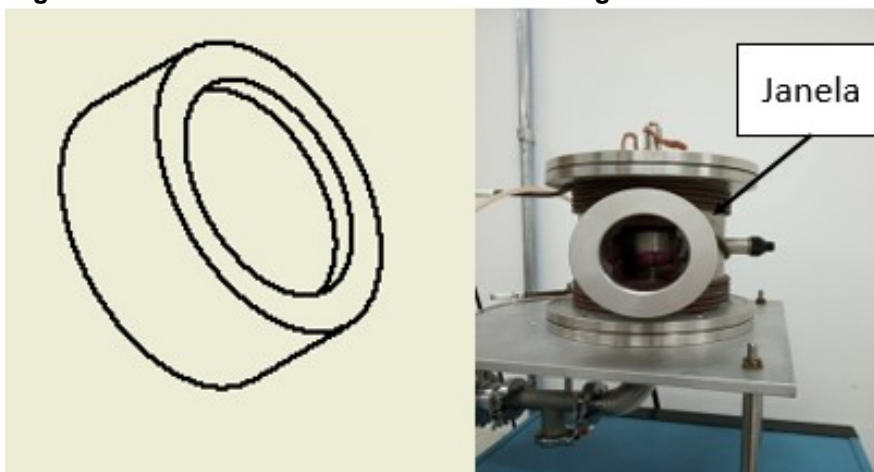
4.1.3 Janela de Supervisão

Esse componente foi utilizado na parte frontal do reator e permite a visualização do processo e também atua como elemento de vedação do sistema. Atua também como supervisor, dando a possibilidade de obter a visibilidade do tratamento que ocorre dentro do reator.

Esse elemento construtivo foi produzido em vidro, o qual foi acoplado a um sistema cilindro fabricado em um anel de alumínio, o qual suporta um o´ring de viton. As medidas foram retiradas da área frontal do reator, sendo assim possível levantar os parâmetros para realizar o dimensionamento e desenho dos componentes que fazem parte o sistema de inspeção. Esse conjunto permite ver as deposições que ocorrem nas amostras, além disso o monitoramento pode ser utilizado em situações de emergência.

Esse item foi fabricado devido a necessidade de acompanhamento das abertura do plasma e verificação de possíveis descargas elétricas prejudiciais a fonte de tensão. Sua confecção foi realizada em alumínio, o elemento contém uma furação central de 50 mm no qual é acoplado a um polímero que faz possível a visualização da parte interna do reator, a janela é fabricada para realizar a vedação e inspeção, esse elemento é fabricado para abrigar o´rings de vedação e o componente em acrílico, suas dimensões são classificadas em diâmetro externo: 101 mm, diâmetro interno: 62 mm, espessura: 5 mm e comprimento de 25 mm , o componente é encaixado em uma entrada do reator. Na Figura 15 é apresentado o desenho do componente nas vistas isométricas junto com a peça fabricada. Informações detalhadas da janela de inspeção estão disponíveis no Apêndice E.

Figura 15 - Desenho em vista isométrica e imagem do item fabricado.



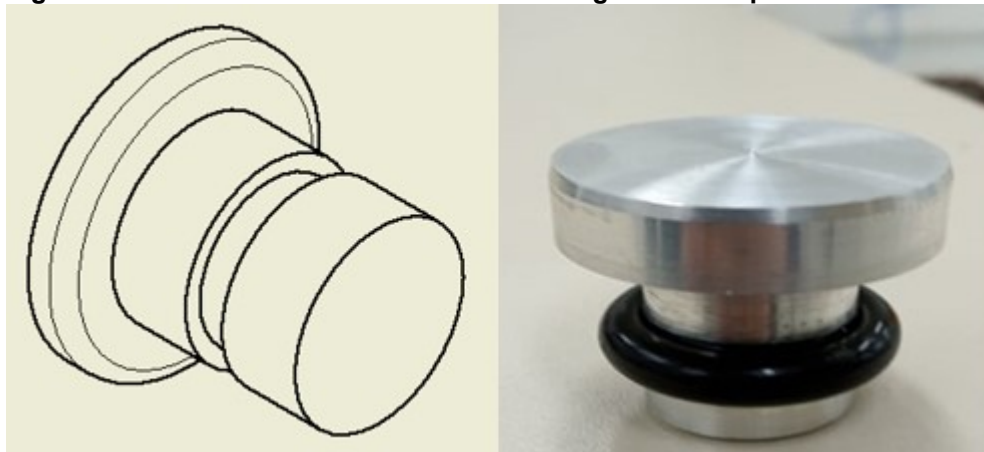
Fonte: Autoria própria

4.1.4 Vedação da Câmara

Esse componente foi utilizado na região lateral do reator trabalhando como vedação do sistema. Suas medidas foram obtidas com medições realizadas no corpo do reator, seu dimensionamento foi projetado para que o componente realize uma boa vedação e para que não haja folgas entre o componente e o reator.

O componente de vedação foi fabricado em alumínio, contendo canais para abrigar orings que realizam a vedação da peça. Foram fabricados com medidas de tolerância com folga para as vedações de o-rings. Suas dimensões são 36 mm de diâmetro externo da cabeça, 21 mm de diâmetro do corpo interno, 30 mm de comprimento e um canal para o oring com diâmetro de 18mm. Na Figura 16 é possível verificar o desenho realizado em 3D em vista isométrica e o componente fabricado. Informações detalhadas do pino de vedação estão disponíveis no Apêndice F.

Figura 16 - Desenho em vista isométrica e imagem do componente fabricado.



Fonte: Autoria própria

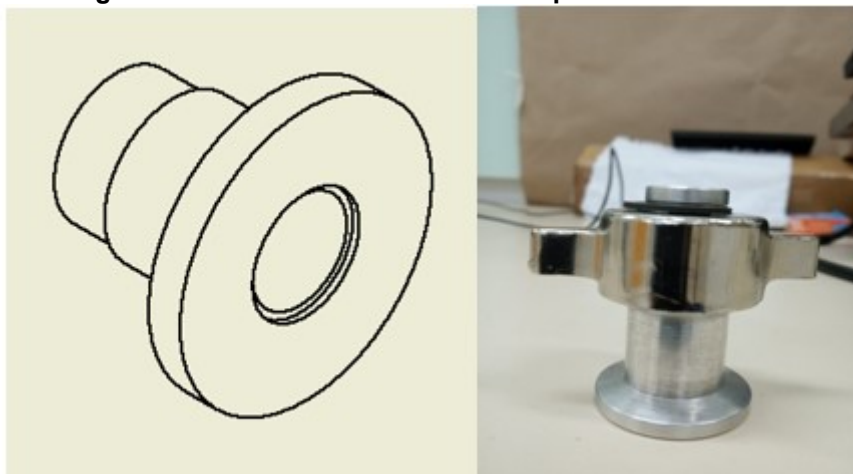
4.1.5 Flange da Válvula de Escape

O componente foi utilizado para se obter o controle da saída de pressão, em casos de quebra de vácuo. Basicamente o dimensionamento desse elemento parte da saída de vácuo da bomba mecânica. As medidas de interesse foram a saída do flange de 40 mm e o furo de escoamento do gás.

O dispositivo consiste em um flange conectado a uma conexão de vácuo e seu corpo conectado à uma válvula que descarrega a pressão sobressalente, a flange fabricada contém um rebaixo para a entrada de o-ring de 26 mm, já o diâmetro externo da flange que é ligada a bomba de vácuo tem diâmetro de 40 mm e furo central de 22 mm, o seu corpo é formado por uma rosca e porca de 20 mm, o comprimento da rosca é de 9 mm, com o aperto da porca a saída do reator fecha havendo o aumento do vácuo no sistema.

Os processos de usinagem dessa peça consistem em algumas etapas, torneamento do flange, torneamento do rebaixo para o o-ring, furo central, torneamento para fabricação da rosca e por último o processo de rosqueamento no componente. Na Figura 17 é possível verificar o desenho realizado em 3D em vista isométrica e o componente fabricado. Informações detalhadas da válvula quebra vácuo estão disponíveis no Apêndice G.

Figura 17 - Desenho isométrico e componente fabricado.



Fonte: Autoria própria.

4.2 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO.

Os componentes fabricados para esse sistema são a tampa de nylon e o cátodo de inox. Um dos elementos serve como isolante para evitar que o corpo do reator conduza eletricidade. O elemento fabricado em inox tem por função conduzir eletricidade ao interior do reator possibilitando a abertura do plasma. Os dois componentes desse sistema são inseridos dentro do reator.

4.2.1 Dimensionamento e Fabricação da Tampa de Isolamento de Vácuo com Suporte para o Cátodo.

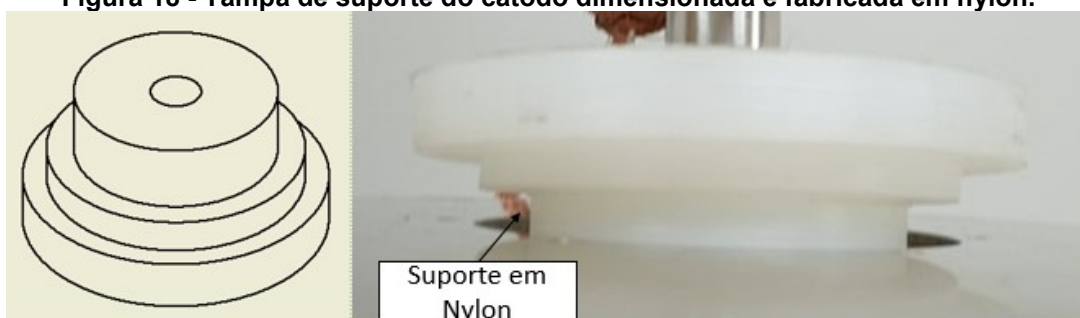
A tampa de isolamento do cátodo foi desenvolvida com o desenho e medidas retiradas da tampa superior do reator, também foi utilizado a seleção de materiais para escolher um material isolante elétrico. A tampa de vedação da câmara foi projetada para vedar o reator de vácuo e no isolamento do cátodo para o ânodo. O projeto possibilitou ainda o acoplamento do cátodo, o qual foi projetado em aço inox. Informações detalhadas da tampa de vedação em nylon estão disponíveis no Apêndice C.

O elemento construtivo fabricado em nylon é a tampa de vedação com encaixe para o cátodo em inox, essa cobertura realiza a vedação da câmara de vácuo e é responsável pelo acoplamento do cátodo dentro do reator.

Sua fabricação foi baseada no torneamento e foi utilizado ferramentas de corte construídas em aço rápido para realizar o desbaste, a rotação para esse tipo de material foi de 600 RPM e o avanço utilizado na ferramenta foi de 0,05 mm/rotação.

As dimensões do elemento são: diâmetro externo para fora do reator de 96 mm, diâmetro da face acoplado no reator de 76 mm, e diâmetro interno para dentro do reator de 58mm, seu comprimento é de 50 mm, e tem uma furação na parte interna de 12mm, já na região superior a furação é de 23mm para acoplar o o'ring de vedação. Na Figura 18 é possível visualizar a imagem da tampa de suporte do cátodo dimensionado e fabricado. Informações detalhadas da tampa de suporte em nylon estão disponíveis no Apêndice C.

Figura 18 - Tampa de suporte do cátodo dimensionada e fabricada em nylon.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Dimensionamento e Fabricação do Cátodo

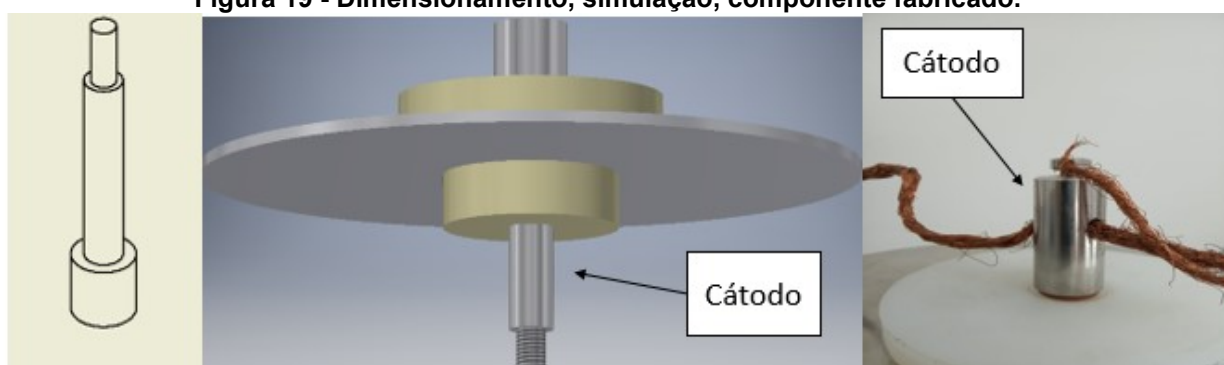
Esse componente tem a função de transmitir a energia da fonte de alimentação até dentro do reator. Para o desenvolvimento desse componente foi necessário centralizar e avaliar a forma de acoplamento entre o cátodo e a tampa em nylon. Utilizando as medidas retiradas da tampa superior do corpo do reator, foi possível estipular dimensões e realizar os desenhos. Foi realizada a montagem dos componentes, cátodo e tampa afim de simular o sistema.

O dispositivo do cátodo, consiste no torneamento de um aço inoxidável a fim de se chegar nas medidas e geometrias definidas, o torneamento consistiu em dois desbastes, um na área superior e outra na área inferior do corpo, uma furação foi realizada na cabeça do componente para a entrada de um dos polos da fonte de tensão, na região inferior foi realizado uma rosca de 10 mm para acoplamento do *magnetron*. O elemento tem suas dimensões definidas como: Comprimento:

150 mm, diâmetro da parte interna: 12 mm, diâmetro da parte externa: 19 mm, no setor externo ocorre a ligação da fonte de alimentação na cabeça do catodo com uma furação de 10mm e rosca de 10 mm na área inferior.

O material no qual a peça foi fabricada tem algumas propriedades que são de importância para o reator. Foi utilizado o aço inox devido ao custo monetário. Na Figura 19 é possível verificar o desenho realizado em 3D em vista isométrica e a imagem do componente fabricado. Informações detalhadas do cátodo estão disponíveis no Apêndice D.

Figura 19 - Dimensionamento, simulação, componente fabricado.



Fonte: Autoria própria.

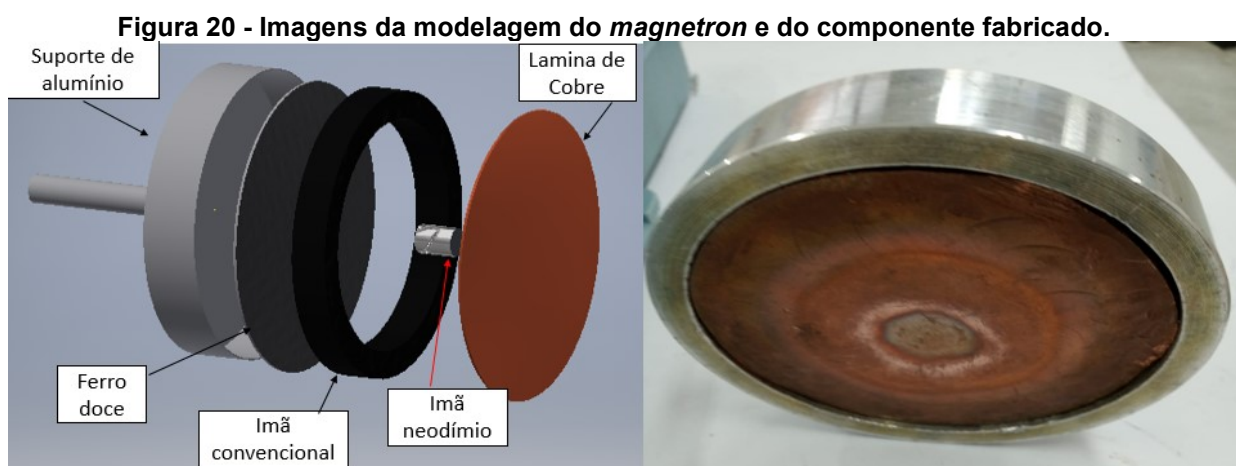
4.3 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE *MAGNETRON SPUTTERING*

O *magnetron* foi um sistema montado com cinco componentes, suporte em alumínio, uma placa de ferro doce, imã convencional, imã em neodímio e uma placa de cobre. O dimensionamento desse conjunto é relacionado com a forma com que se monta os elementos seguindo suas respectivas ordens.

O ferro doce é montado no suporte em alumínio, com isso é possível conectar o primeiro imã com formato cilíndrico centralizado na placa de metal. O segundo imã é de menor tamanho e dimensão, sua montagem é no centro da placa de ferro doce e circunda o primeiro imã. Desse conjunto de imãs é possível gerar um campo magnético, o qual serve para delimitar o campo de ação dos íons gerando uma área de remoção de material, ou comumente chamado de pista ou trilha de corrosão. O campo magnético gera uma armadilha eletrônica, focalizando em um ponto gerando aumento da taxa extração de material do alvo, os átomos retirados são depositados na superfície de todo reator abaixo (PASCOALI et.al., 2007).

A utilização da chapa de cobre serve como substrato, esse componente bombardeado com íons sobre a placa de cobre, com isso os átomos de cobre são ejetados e depositados sobre a amostra e em todo o reator.

O processo de fabricação do *magnetron* consistem na utilização das técnicas de usinagem para o desenvolvimento das peças, como foi definido na área de desenho e dimensionamento. O *magnetron* é subdividido em corpo/suporte, alvo de cobre, ferro doce, ímã de neodímio, ímã convencional, diante desse contexto o único componente no qual é preciso realizar os processos de torneamento é o corpo do *magnetron*. Na Figura 20 é possível verificar o desenho realizado em 3D. Informações detalhadas do *magnetron* estão disponíveis no Apêndice H.



Fonte: Autoria própria.

4.4 DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS EM COBRE UTILIZANDO *MAGNETRON*

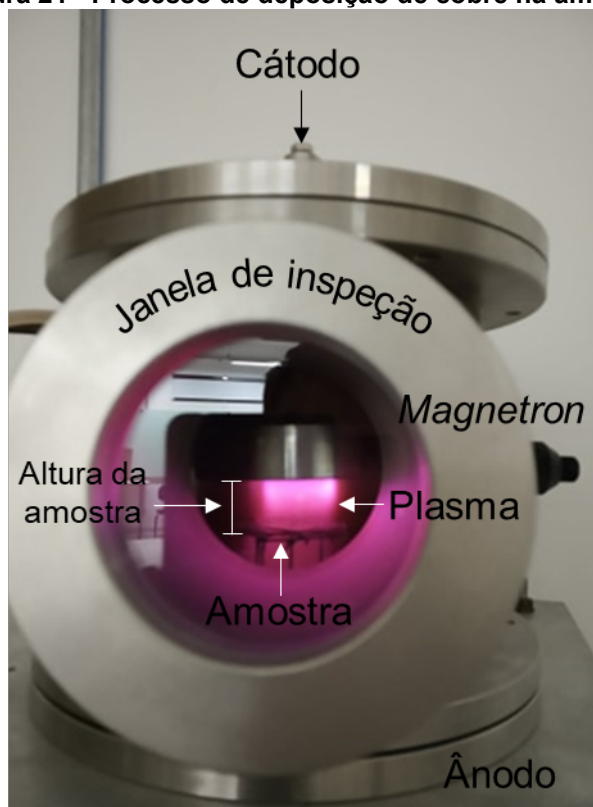
Para a realização do procedimento de deposição de filmes em substrato, foi necessário levar em consideração procedimentos de trabalho. O primeiro procedimento foi a avaliação dos componentes de vedação, com a checagem e verificação de posicionamento das peças para início do processo. Após ligar a bomba de vácuo, e verificar a obtenção de vácuo, com auxílio de um manômetro digital, há a possibilidade de iniciar o tratamento.

Com a câmara toda vedada e o sistema de vácuo trabalhando foi possível obter pressões de vácuo na ordem de $5,5 \cdot 10^{-2}$ mbar a $4,4 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Com a pressão no valor necessário foi ligado a fonte de tensão e início do processo de deposição. Conforme mencionado anteriormente a corrente de trabalho utilizada para a abertura do plasma foi de 100 mA. Com a visualização do plasma

formado na janela de inspeção essa foi a corrente utilizada para as deposições. O tempo de deposição, na ordem de segundos foi utilizada devido ao aquecimento do *magnetron* e do porta amostras. A diferença de tempo além de alterar a taxa de deposição com incremento da espessura do filme depositado possibilita as alterações das características de coloração e mudanças nas características de molhabilidade da superfície (PASCOALI, 2007). Na Figura 21 é possível verificar a imagem do reator em funcionamento e o processo de deposição em uma amostra.

Figura 21 - Processo de deposição de cobre na amostra



Fonte: Autoria própria.

A deposição de filmes metálicos utilizando a técnica de *magnetron sputtering*, pode apresentar diferentes resultados. Essas propriedades dos filmes estão condicionadas ao tempo de exposição do material a ser depositado no plasma, tipo de *magnetron*, distância entre o alvo e a amostra, aquecimento do substrato, tipo de fonte de tensão (tensão, corrente, frequência) e etc. Para as deposições alguns parâmetros foram mantidos, a fim de obter reprodutibilidade e não interferir nos resultados. A distância entre o alvo e a amostra foi de 45 e 78 mm com a deposição das 10 amostras para o primeiro e segunda altura.

As deposições com diferenças distâncias foram realizadas no mesmo equipamento e respeitando os mesmos parâmetros de tensão, corrente, pressão e tempo. Em deposições onde o substrato utiliza um posicionamento próximo ao alvo, a taxa de deposição é elevada, gerando filmes com maior espessura, com menos impurezas e com aspecto de aumento de densidade (NASCIMENTO, 2011). Filmes que são gerados muito próximos do alvo, podem apresentar diferentes defeitos. Os principais problemas ocasionados pela proximidade do alvo e substrato são a formação de filmes em regiões preferenciais com deposições disformes. (FARAH & BILAC, 1990).

Os resultados das deposições do filmes próximos do alvo (45 mm) são apresentados na Figura 22. As amostras que permaneceram mais próximas do alvo apresentaram uma maior deposição de material em sua extensão. A proximidade do alvo aumentou significativamente a taxa de deposição. A não uniformidade é característica do excesso de deposição, em alguns pontos da amostra, é possível observar uma diferença em seu contraste. Essa diferença pode estar associada a filmes mais espessos, e em outros nota-se filmes mais finos. Sendo assim o filme não tem uma linearidade por toda a extensão da amostra, sendo configurado como um problema advindo da proximidade do substrato com o alvo.

Nos filmes depositados com 300 s fica evidente a diferença de contraste de cor nas deposições, reforçando os resultados obtidos por Nascimento (2011). Nessa amostra foi possível perceber a grande diferença de material depositado em um único local. O tempo de exposição e a temperatura são os responsáveis pela grande quantidade de material empregado na amostra. A diferença de coloração e deposição é atribuída ao posicionamento do substrato em relação ao *magnetron*, isso pode ser explicado pela distância do alvo e substrato e também pelo posicionamento geométrico da peça em relação ao anel máximo de deposição (FEIL, 2006). Os cantos das amostras não apresentam deposição devido a montagem das lamínulas de vidro no porta amostra, fazendo com que as pontas fossem encobertas durante o processo.

Figura 22 - Amostras depositadas de cobre a uma distância de 45 mm em relação ao alvo

0 Segundos				
30 Segundos	60 Segundos	90 Segundos	120 Segundos	150 Segundos
300 Segundos	270 Segundos	240 Segundos	210 Segundos	180 Segundos

Fonte: Autoria própria.

As amostras posicionadas longe do *magnetron* apresentam vantagens e desvantagens. As características que são de interesse são a boa uniformidade do material depositado e a não criação de zonas com excesso de material, já em contrapartida problemas podem ser relacionados entre distância do alvo e amostra (FARAH & BILAC, 1990). O baixo aproveitamento de material retirado do alvo e filmes com baixa taxa de deposição, são características de substratos que estão longe do *magnetron* (NASCIMENTO, 2011).

O conjunto de amostras que receberam deposição do filme em cobre a uma distância de 78 mm, pode-se perceber que existem uma grande diferença na coloração das amostras com distâncias diferentes, isso prova que a distância influencia diretamente na taxa de deposição do filme metálico, além de afetar questões como uniformidade e espessura do filme depositado. O filme com 78 mm de distância apresenta melhor uniformidade do que o filme com 45 mm. Nas imagens da Figura 23 foram possíveis avaliar as deposições realizadas pela diferença de tempo e distância do alvo. Para o caso de 150 e 180 s de deposição a

inversão da ordem foi utilizada para dar continuidade na avaliação das deposições, podendo realizar comparações em relação ao tempo de exposição. Na Figura 23 é possível verificar as imagens das amostras que ficaram a distância de 78 mm do alvo. Quando comparadas as deposições de 45 mm e 75 mm de distância do alvo fica evidente as características ópticas de deposição, sendo que apenas a distância do alvo foi o fator determinante na mudança das características ópticas percebidas (ELEUTERIO, 1991; NASCIMENTO, 2011).

Figura 23 - Amostra que receberam o processo de deposição a 78 mm de distância entre o alvo e o substrato.



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÃO

O desenho e detalhamento do projeto e sistemas foi realizado possibilitando a fabricação de peças baseados nos conceitos retirados do dimensionamento dos componentes.

Os componentes dimensionados e fabricados para o sistema de vácuo como: flanges e conexões, atenderam as características necessárias para o trabalho não apresentando nenhum vazamento.

Os testes de abertura do plasma e vácuo da câmara, mostram que o sistema trabalhou de forma eficiente e sem defeitos permitindo chegar em pressões de vácuo de $4,5 \cdot 10^{-2}$ mbar.

A fonte utilizada apresentou o funcionamento necessário atendendo as solicitações de energia na região interna do reator. Com base em testes realizados a fonte de corrente alternada e seus componentes possibilitaram a abertura do plasma e a deposição de filmes de cobre.

O sistema de *magnetron* funcionou dentro do esperado gerando processo de pulverização catódica. Com diferentes tempos e distâncias entre o alvo e o substrato foi possível verificar que a taxa de deposição não foi uniforme e que o *magnetron* não deposita de forma homogênea sobre as amostras próximas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Colocar um sistema de controle de vazão com a utilização de uma válvula agulha controlada por um sistema arduino.

Melhorar o sistema elétrico inserindo um painel elétrico e componentes como botão, disjuntor entre outros componentes elétricos.

Realizar a fabricação de um suporte para o reator e todos o os outros elementos que fazem parte desse conjunto.

Testar as características de deposição utilizando gases como argônio, nitrogênio e oxigênio.

Desenvolver e construir um *magnetron* com sistema de refrigeração para dissipação de calor.

Substituir o aço inox e o alumínio respectivamente do cátodo e do *magnetron* por cobre eletrolítico.

REFERÊNCIAS

AGUZZOLI, C. **Transporte atômico e reação química em nanoestruturas TiN e TiN/Ti em aço nitretado a plasma**. Monografia (Especialização) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

ALVES-JÚNIOR. **Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações**. Natal: EDUFRN, p. 84-85 2001.

ASHBY, M.; JOHNSON, Kara. **Materiais e design: A arte e ciência da seleção de materiais no projeto do produto**. Elsevier Brasil, 2013.

ARAÚJO, L. F. **Desenvolvimento e teste de um protótipo de reator de plasma com gaiola catódica rotatória para nitretação em lote de pequenas peças**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2013.

ASSIS, O. B. G. **Alteração do caráter hidrofílico de filmes de quitosana por tratamento de plasma de HMDS**. Quim. Nova, v. 33, No. 3, p. 603-606, 2010.

BALLES, A.C.; SCHREINER, W. H.; DA SILVA, J. M.; FONTANA, L. C. **Nitretação a Plasma Como Meio Alternativo ou Complementar à Oxidação Negra na Proteção à Corrosão do Aço de Baixo Teor de Carbono**. Revista Matéria, Joinville, Revista Matéria, v. 9, n. 4, pp. 360 – 369, 2004.

BATISTA, V. J. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS POR PLASMA**. 1998. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

BESSELER, E. **Construção e caracterização de um reator indutivo – icp para corrosão de materiais**. 2008. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CARVALHO, R. A. M.; SILVA, A. N. R.; SILVA, M. L. P. **Produção e caracterização de filmes finos nanoporosos e protetores obtidos por polimerização por plasma de TEOS**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 25, n. 3, p. 141-148, 2008.

CASSINI, F. A. **Desenvolvimento de Reator de plasma AC aplicado à conversão de hidrocarbonetos**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CHABERT, P.; BRAITHWAITE, N. **Physics of radio-frequency plasmas**. Cambridge University Press. 1ª ed. 2011.

DAUDT, N. D .F. **Influência dos parâmetros de processo na deposição de nitreto de titânio por plasma em gaiola catódica**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

DEGASPERI, Francisco Tadeu. **Modelagem e Análise Detalhadas de Sistemas de Vácuo**. 2002. 235 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

DOS SANTOS, A. P. M. **DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE PROCESSOS COM PLASMAS DE ALTA DENSIDADE PARA A DEPOSIÇÃO DE FILMES DE CARBONO**. 2005. 231 f. Tese (Doutorado) - Doutora em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FEIL, A. F. **Deposição e caracterização de filmes finos de TiOx formados por DC Magnetron Sputtering reativo: estudo de transição estrutural**. 2006. 173 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia e Tecnologia dos Materiais, Universidade Pontifícia Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

FARAH, E A; BILAC, S A.B, 1990, Rio de Janeiro. **Planar magnetron sputtering: construção e aplicações**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Física, Rio de Janeiro, p. 257.1990.

ELISBERTO, M. D. V. **Adequação de homogeneidade e ajuste de parâmetros no reator de plasma excitado por microondas de modo a otimizar a produção de intersticiais $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x(x=3)$** . 2006. 48 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2006.

ELEUTERIO, F. S. **Magnetron Sputtering planar construção e aplicação**. 1991. [128] f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP, 1991.

GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Nitreção gasosa em alta temperatura de aços inoxidáveis**. Revista Matéria, v. 10, n. 4, p. 502-525, 2005.

GIUDICE, E. B.; NASCIMENTO, C. A.; GUIMARÃES, G. E.; BRAGA, G. E., FILHO, O. C.; PAULINO, J. O. S.; MIRANDA, A. Q.; BRACARENSE, Costa, L. A. **Desenvolvimento de Condutores Compactos Aplicados a Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão.** 2017.

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2.** 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

HEDLER, P. **Influência dos Tratamentos Superficiais de Aços por Ataque Químico e Plasma nas Propriedades Mecânicas e de Superfície de DLC.** 2014. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LOPES, P. E. K. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE REATOR PARA TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE SUPERFÍCIE DE NITRETAÇÃO POR PLASMA.** 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2018.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. **Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários.** Cerâmica, v. 54, n. 330, p. 174-183, 2008.

MACHADO, M. M.; MACHADO, M. M.; DUTRA, A. R. A.; MOECKE, E. H. S.; CUBAS, A. L. V. **Construção de um reator de plasma descarga corona para eliminação de compostos orgânicos voláteis.** Rev. Química Nova, v. 38, n. 1, p. 128-131, 2015.

MENDES, L. A. **Desenvolvimento e validação de um reator piloto para processamento de materiais por plasma.** 2001. 310 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MOURA, J. A. S. **Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por *Sputtering* e aplicações do efeito Peltier.** 2010. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NASCIMENTO, I. O. **Construção de um aparato experimental para monitoramento in situ da deposição de filmes finos de titânio por *magnetron sputtering*.** 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

NELSON, O. R. Uma abordagem didática da natureza dos processos de aquecimento da atmosfera estelar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Natal, v. 35, n. 3, p.1-14, set. 2013.

NUNES, A. M. **Corrosão por plasma de filmes de silício policristalino e nitreto de silício para tecnologia MEMS e CMOS**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

OLIVEIRA; H. S.; REIS, D. A. P.; DE MOURA, C. N.; PIORINO, F. N. **Caracterização mecânica e microestrutural da liga ti-6al-4v após tratamento superficial com laser pulsado nd:yag**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, p. 8, 2009.

PASCOALI, S. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DE TiO₂ DEPOSITADOS SOBRE CERÂMICA DE REVESTIMENTO VIA MAGNETRON SPUTTERING DC**. 2007. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RANGEL, E. C. **IMPLANTAÇÃO IÔNICA EM FILMES FINOS DEPOSITADOS POR PECVD**. 1999. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

REIS, R. F.; SCHREINER, W. H.; BORGES, P. C. Nitretação do aço inoxidável AISI 316L a altas temperaturas: influência na camada nitretada. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 25, n. 3, p. 183-187, 2008.

ROCHA, V. **Esterilização de materiais termossensíveis através de aplicação de plasma gerado por descarga com barreira dielétrica (DBD)**. 2009. 310 f. Monografia (Especialização) - Curso de Física, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

SALMORIA, G. V.; MARTINS, W. F. M.; FÚCIO, D. M. **Tratamento da superfície de cateteres de poliamida 11 por plasma de oxigênio**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 23, n. 4, 2013.

SANT'ANA, P. L. **Plásticos comerciais tratados a plasma para dispositivos ópticos e embalagens alimentícias**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia em Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

SKONIESKI, A. F. O; LIMA, E. S; HIRSCH, T; ROCHA, A. S. **Influência da mistura gasosa em processos de nitretação e nitrocarbonetação a plasma.** Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 27, n. 4, p. 175-182, 2010.

SOUSA, R. R. M. **Nitretação em plasma com gaiola catódica: investigação do mecanismo e estudo comparativo com a nitretação em plasma de tensão contínua.** 2007. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SOUSA, R. R. M. **Nitretação iônica sem efeito de borda: desenvolvimento e avaliação de uma nova técnica.** 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

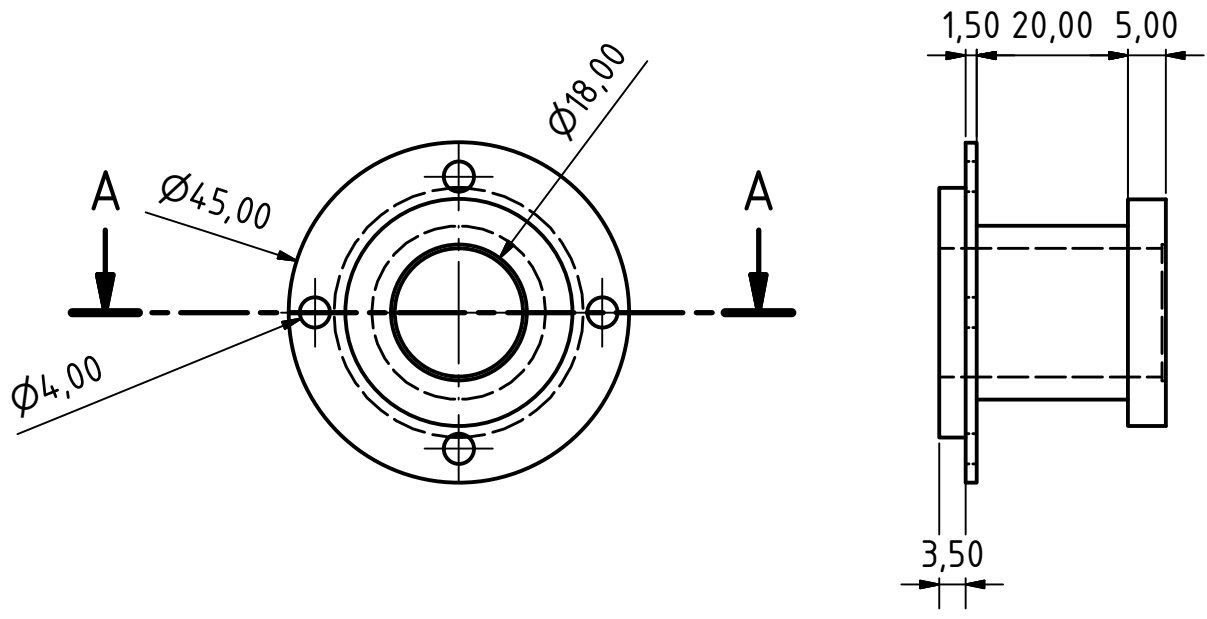
SOUZA, I. A. **Descarga em barreira dielétrica: construção de um reator DBD e caracterização mediante análises ópticas e elétricas do plasma produzido.** 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

TATSCH, P. J. **Deposição de filmes finos.** V Oficina de Microeletrônica, p. 22, 2000.

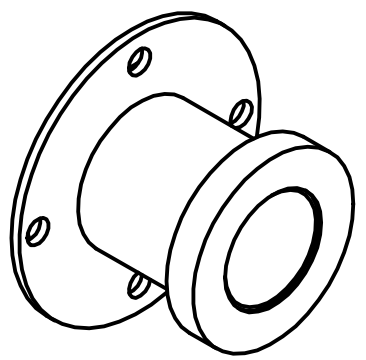
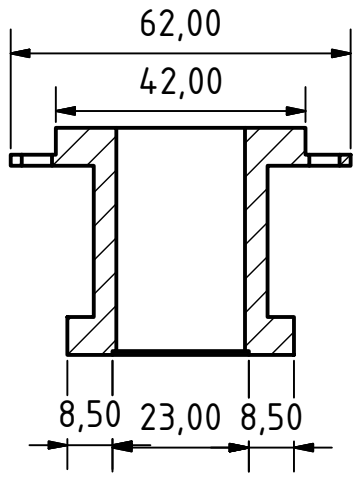
TSCHIPTSCHIN, A. P.; PINEDO, C. E. **Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, n. 1, p. 137-141, 2010.

TURRI, R. G. **Propriedades estruturais e ópticas de filmes finos a-C:H:Cl obtidos por deposição à vapor químico assistido por plasma e deposição e implantação iônica por imersão em plasma.** 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2011.

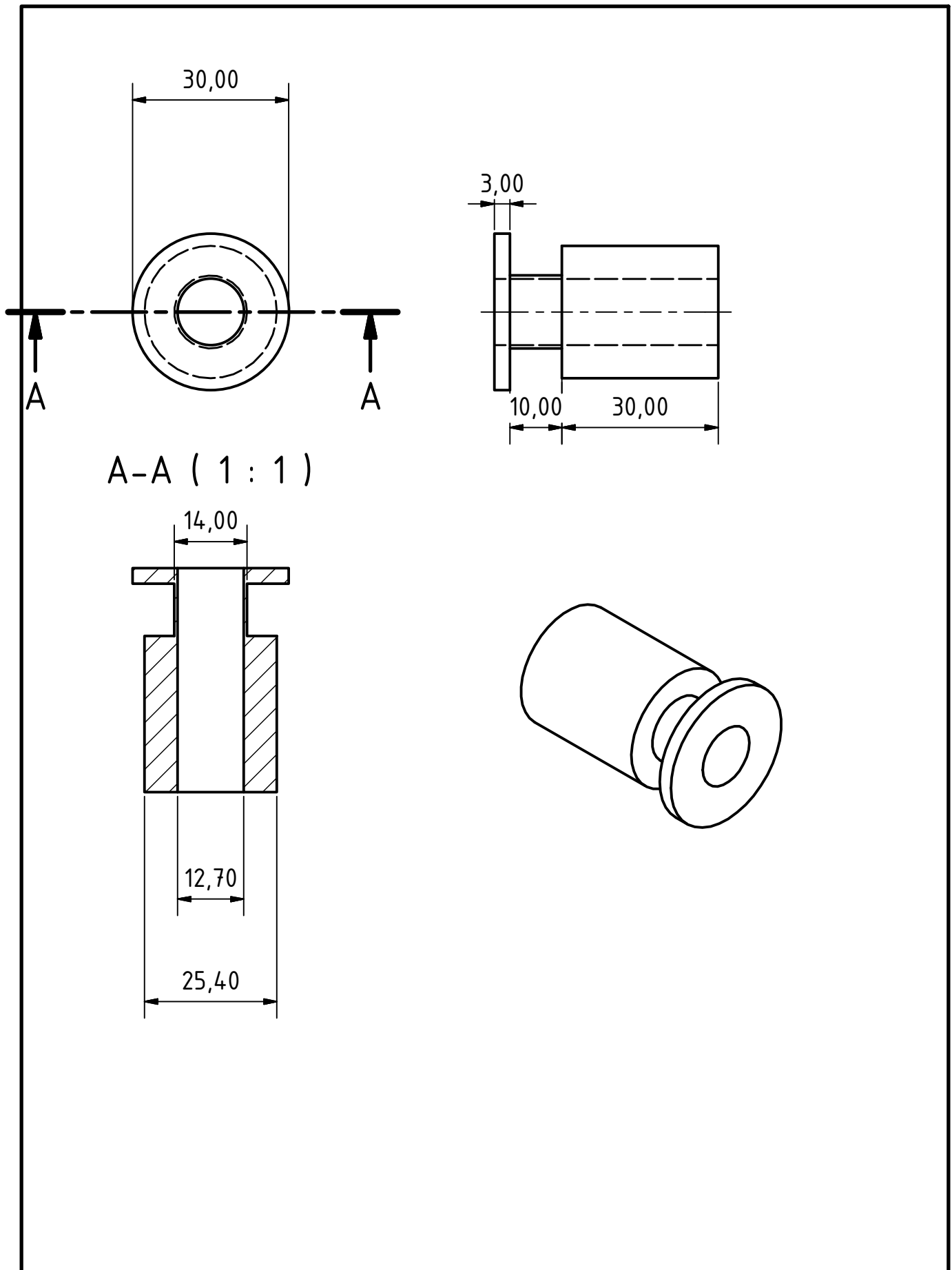
ZANIN, Maria; CRUZ, Andrea Sandra; MORAES, Mario Antônio Bica de. **Processo Para Melhorar A Aderência De Filmes Finos Depositados Pelo Processo Pecvd Em Embalagens Pet E Embalagem Resultante.** 2006. 24 f. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.



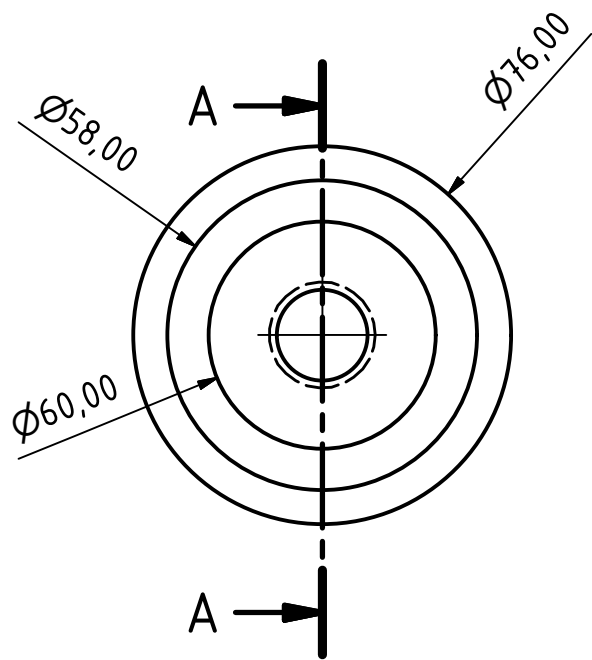
A-A (1 : 1)



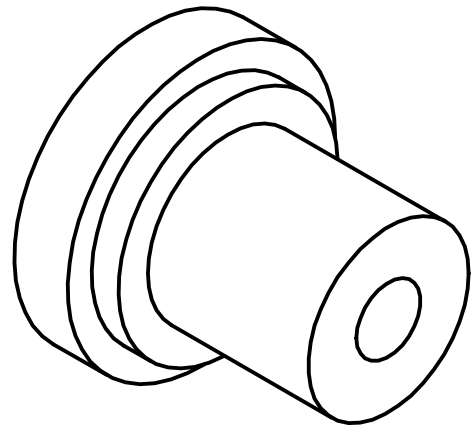
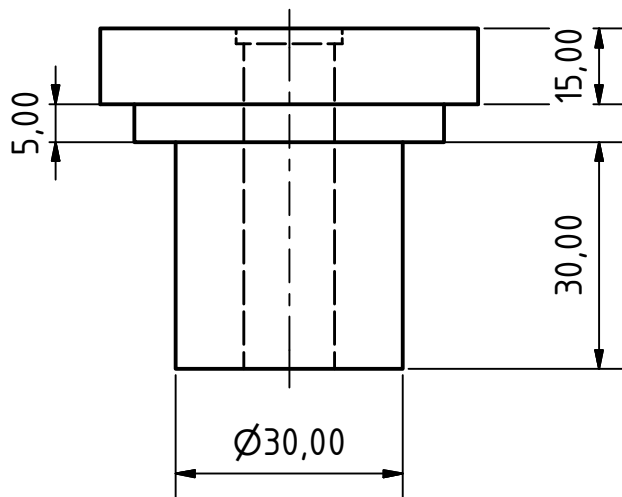
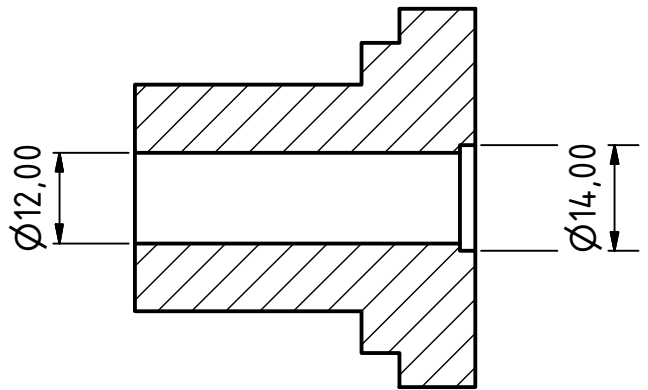
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 59	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
FLANGE DE SAÍDA		APÊNDICE: A	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO



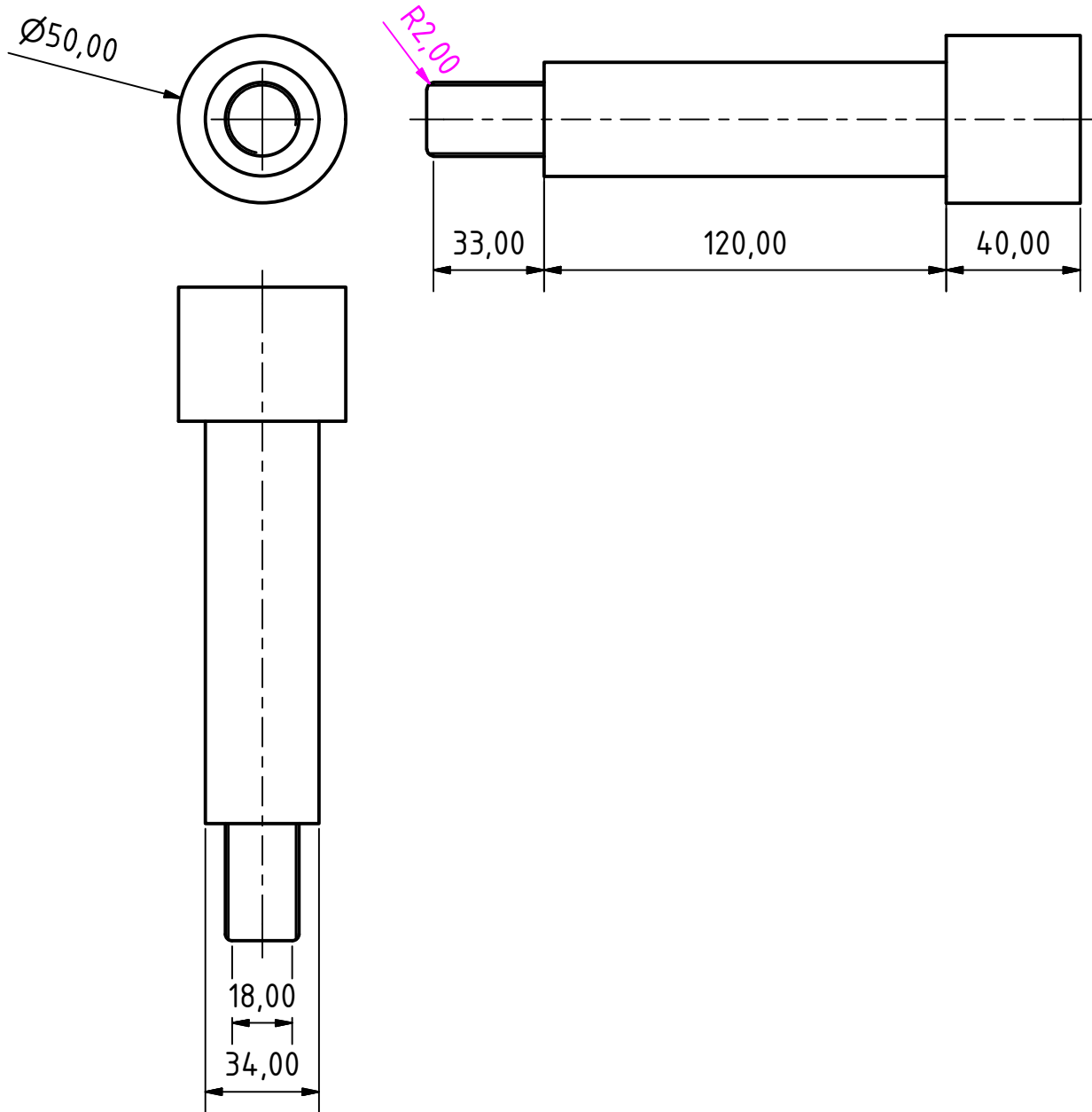
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 60	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
FLANGE DE CONEXÃO		APÊNDICE: B	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO



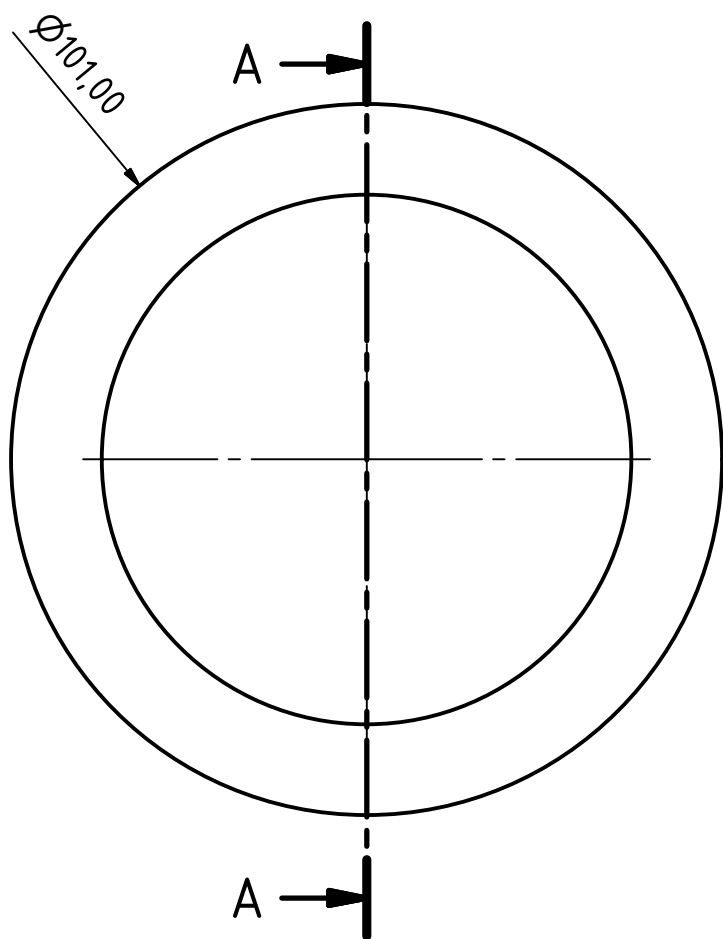
A-A (1 : 1)



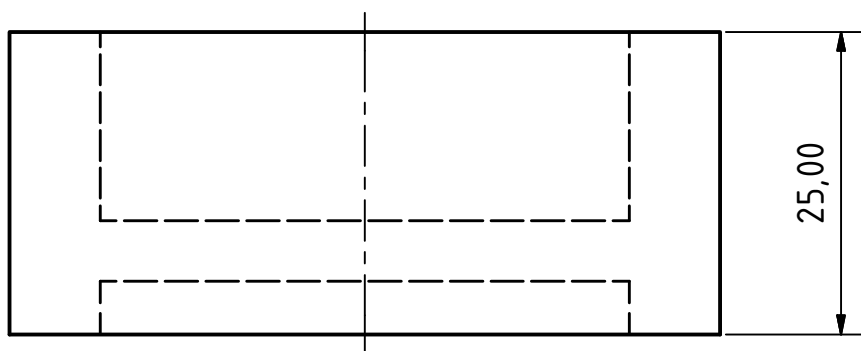
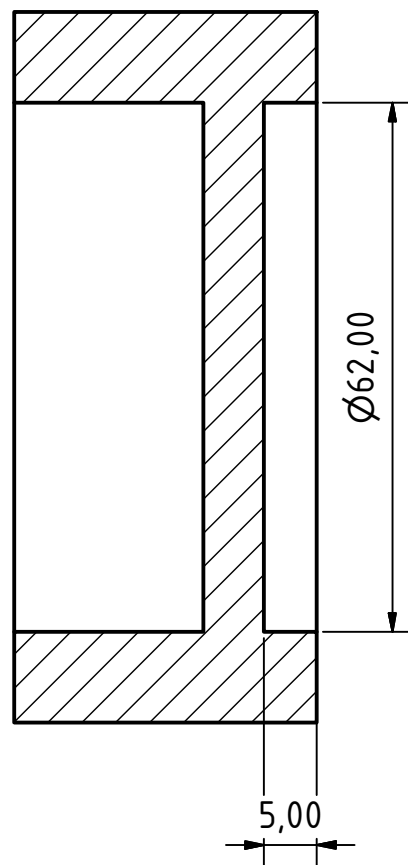
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 61	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
TAMPA DE VEDAÇÃO		APÊNDICE: C	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO



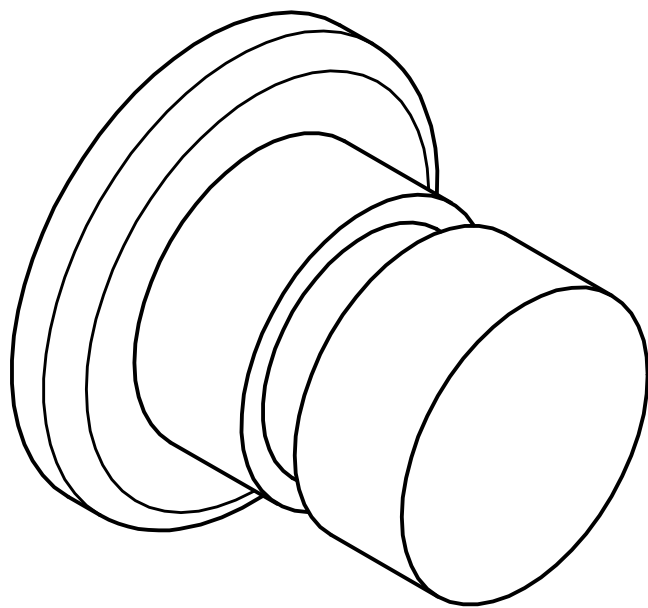
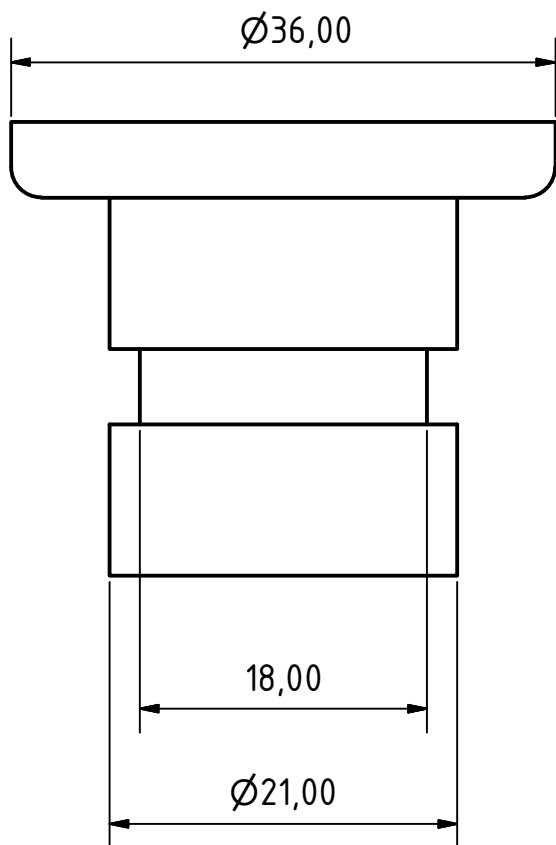
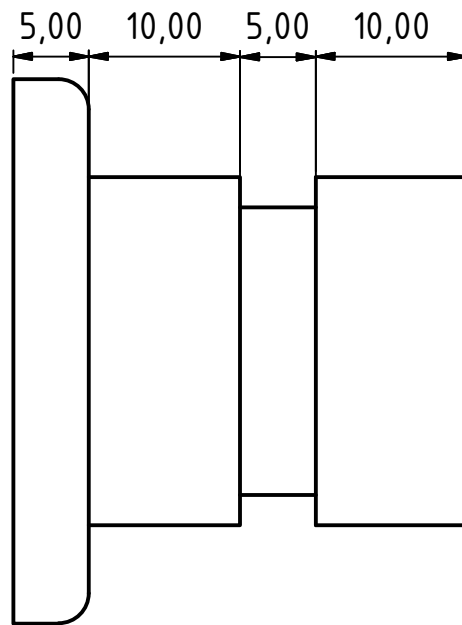
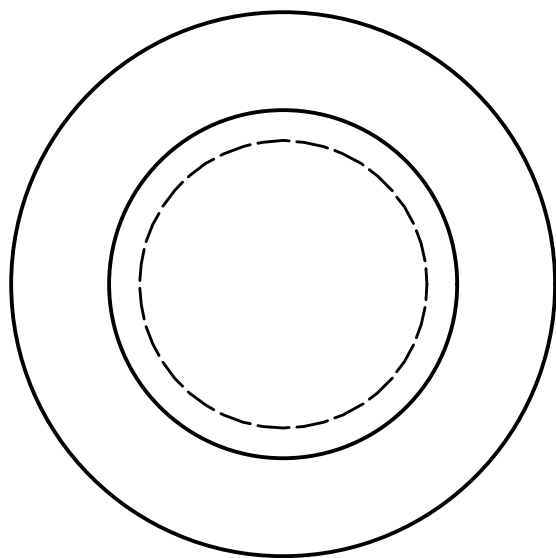
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 62	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
CÁTODOS		APÊNDICE: D	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO



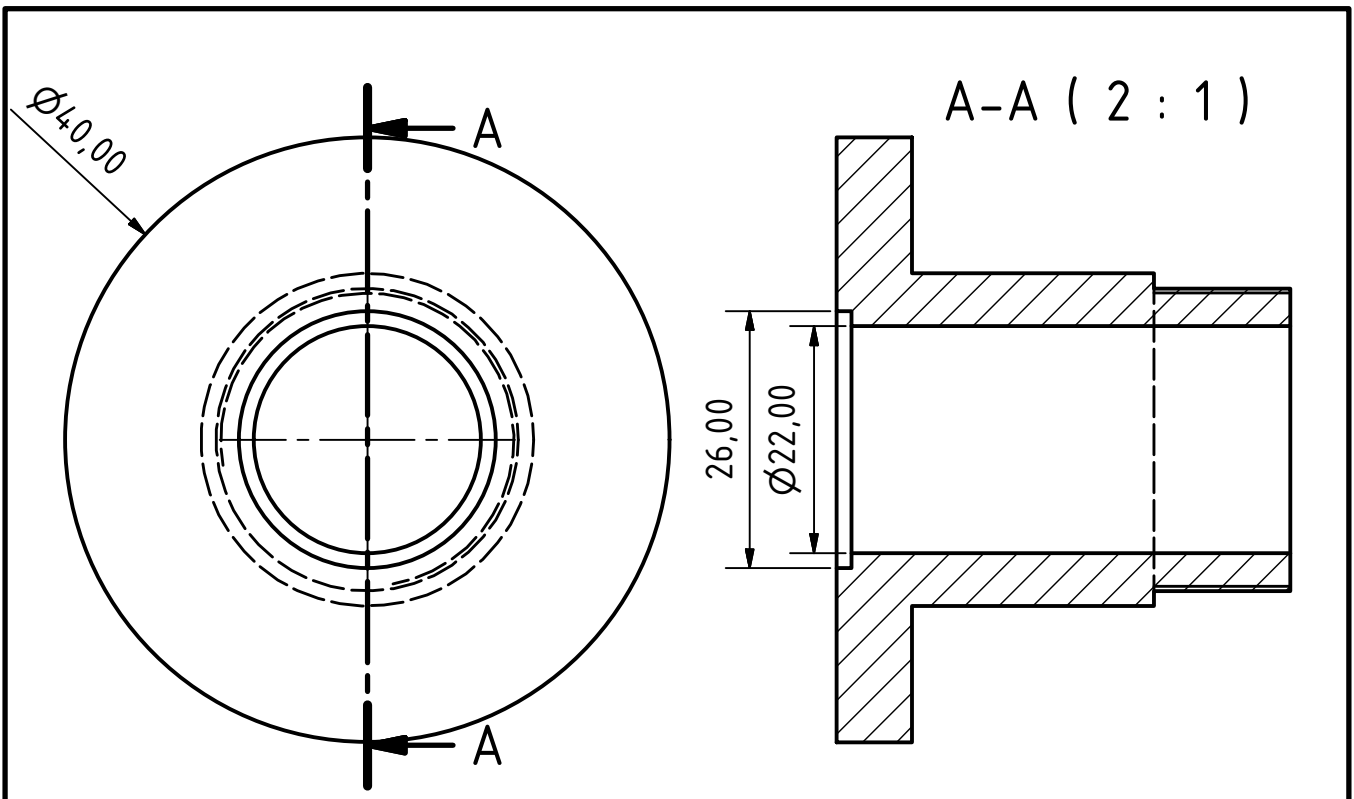
A-A (1 : 1)



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 63	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
JANELA DE SUPERVISÃO		APÊNDICE: E	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO

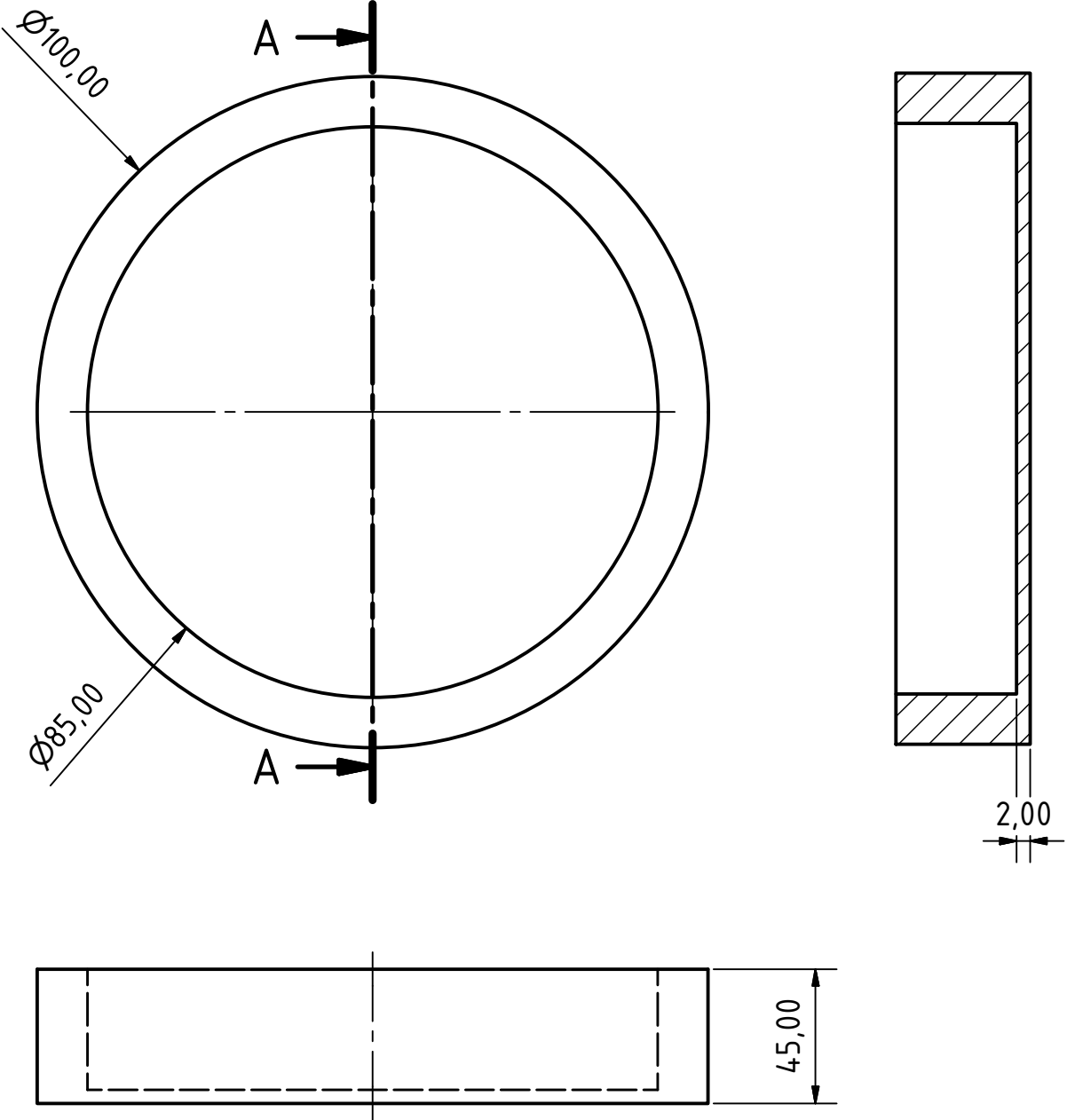


UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 64	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
PINO DE VEDAÇÃO		APÊNDICE: F	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 65	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
VÁLVULA QUEBRA VÁCUO		APÊNDICE: G	20/11/19
Escala: 2:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO

A-A (1 : 1)



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		Página: 66	
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL		1 DIEDRO	
CORPO MAGNETRON		APÊNDICE: H	20/11/19
Escala: 1:1	UNIDADE: mm	DENNER TRAIANO	REVISADO