

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS
Microeletrônica

IRIS DEL CARMEN CLAUDINO FLORES

MODELAGEM COM PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ÓPTICOS
DO EFEITO DE BLOCAGEM DE GASES EM SISTEMAS DE VÁCUO

SÃO PAULO

2021

IRIS DEL CARMEN CLAUDINO FLORES

**MODELAGEM COM PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ÓPTICOS
DO EFEITO DE BLOCAGEM DE GASES EM SISTEMAS DE VÁCUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP), como requisito para obtenção do título de tecnóloga em Microeletrônica.

Orientadores:

Professor Dr. Francisco Tadeu Degasperí

Professor Dr. Eduardo Acedo Barbosa.

SÃO PAULO

2021

Iris del Carmen Claudino Flores

**MODELAGEM COM PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ÓPTICOS
DO EFEITO DE BLOCAGEM DE GASES EM SISTEMAS DE VÁCUO**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa
FATEC-SP

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi
FATEC-SP

Prof. Me. Ricardo Cardoso Rangel
FATEC-SP

Prof. Esp. Renato Marcelo Franzin
FATEC-SP

São Paulo, 04 de fevereiro de 2022.

Dedico este trabalho aos meus familiares, que me deram todo o suporte e incentivo ao longo de minha vida para que eu me tornasse uma pessoa cada vez melhor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus pais e irmão por todo o apoio durante essa jornada.

Aos meus amigos, principalmente aqueles que conheci durante a graduação e que estiveram comigo durante os momentos de maior dificuldade nessa etapa de minha vida.

Aos meus professores orientadores Francisco Tadeu Degasperi e Eduardo Acedo Barbosa por todo o apoio e conhecimento, principalmente pelas palavras de conforto e incentivo, que me fizeram muito bem nos meus momentos de insegurança.

Ao André Gustavo Lima Caetano, que me auxiliou e apoiou no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa PIBIC concedida.

RESUMO

O Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP tem realizado ao longo dos anos diversos projetos para a área de tecnologia do vácuo voltados para os mais diversos setores industriais de produção e inclusive na área acadêmica, o seguinte trabalho é uma continuidade de um projeto proposto anteriormente e que apresentou ótimos resultados, onde nesse fora comprovado a eficiência de se analisar dados de fluxo de gás através da interferência óptica, já que o índice de refração varia de acordo com a pressão. A grande vantagem desse tipo de abordagem se dá ao fato de que o processo de análise dos dados é um método não-interferente e não-destrutivo, já que somente a luz entra em contato com a amostra. Sendo assim, o seguinte projeto também propõe uma abordagem que relaciona a variação do índice de refração com a variação de pressão, mas dessa vez com o intuito de determinar com precisão o ponto onde ocorre o efeito do escoamento bloqueado (*choked flow*), ou quando a taxa de transferência de um gás (*throughput*) deixa de ser constante. O método utilizado para a análise foi o de interferometria a laser, onde o que se mostrou mais efetivo para a montagem do arranjo foi o interferômetro de Fabry-Perot, contudo, os resultados foram ineficientes, não apresentando um momento exato que possamos definir o efeito de bloqueio, ainda assim, podemos buscar outros métodos para essa análise, já que os resultados podem ser promissores e trazer avanços a tecnologia do vácuo, facilitando principalmente a elaboração dos sistemas de vácuo.

Palavras-chave: tecnologia do vácuo; escoamento bloqueado; interferência óptica; *throughput*.

ABSTRACT

The Vacuum Technology Laboratory - LTV of the Technology College of São Paulo - FATEC-SP has carried out over the years several projects in the vacuum technology area aimed at the most diverse industrial sectors of production and even in the academic area, the following project is a continuation of a previously proposed project that presented excellent results, in which the efficiency of analyzing gas flow data through optical interference was proven, since the refractive index varies according to the pressure. The great advantage of this type of approach is the fact that the data analysis process is a non-interfering and non-destructive method, since only light meets the sample. Therefore, the following project also proposes an approach that relates the variation of the refractive index with the variation of pressure, but this time with the aim of accurately determining the point where the choked flow effect occurs, or when the throughput of a gas is no longer constant. The method used for the analysis was the laser interferometry, where the Fabry-Perot interferometer was the most effective for the assembly of the array, however, the results were inefficient, not presenting an exact moment that we can define the choked flow effect, even so, we can search for other methods for this analysis, since the results can be promising and bring advances to vacuum technology, mainly facilitating the elaboration of vacuum systems.

Keywords: vacuum technology; choked flow; optical interference; throughput.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Regime de Escoamento Viscoso Turbulento..... | 9 |
| Figura 2- Regime de Escoamento Viscoso Laminar..... | 9 |
| Figura 3- Regime de Escoamento Intermediário..... | 10 |
| Figura 4 - Regime de Escoamento Molecular..... | 10 |
| Figura 5- Efeito de blocagem (...)...... | 16 |
| Figura 6- Gráfico do throughput (...)...... | 17 |
| Figura 7 - Interação de ondas com interferência totalmente destrutiva. | 19 |
| Figura 8 - Interação de ondas com interferência construtiva. | 19 |
| Figura 9 - Padrão de franjas observado (...)...... | 20 |
| Figura 10 - Interferômetro de Michelson | 21 |
| Figura 11- Esquema de um interferômetro de Mach-Zehnder. | 22 |
| Figura 12 - Representação esquemática do interferômetro de Fabry-Perot..... | 23 |
| Figura 13: Corte meia vista da vista superior da câmara de vácuo. | 24 |
| Figura 14 – Vista do capilar localizado no interior da câmara. | 25 |
| Figura 15 – Valores catalogados dos flanges | 25 |
| Figura 16 - Arranjo experimental do sistema de vácuo utilizado. | 27 |
| Figura 17 – Arranjo do sistema de vácuo (...) | 28 |
| Figura 18 – Arranjo do sistema de vácuo (...) | 29 |
| Figura 19 – Arranjo do sistema de vácuo utilizando Fabry-Perot | 30 |
| Figura 20 – Padrão de franjas apresentado durante o experimento..... | 31 |
| Figura 21 – Arranjo experimental para modelagem (...)...... | 32 |
| Figura 22 – Exemplo de cálculo realizado no <i>software ImageJ</i> | 34 |
| Figura 23 – Resultados da comparação das fases equivalentes (...)...... | 34 |
| Figura 24 – Resultados da comparação de duas fases equivalentes (...)...... | 35 |
| Figura 25 – Resultados da comparação de duas fases equivalentes (...)...... | 36 |
| Figura 26 – Resultados da comparação de fases equivalentes (...)...... | 37 |
| Figura 27 – Desenho técnico do corpo da câmara de vácuo..... | 44 |
| Figura 28 – Desenho técnico do flange KF40..... | 45 |
| Figura 29 – Desenho técnico do flange KF10..... | 46 |
| Figura 30 – Desenho técnico do flange KF25..... | 47 |
| Figura 31 – Desenho técnico da tampa de KF40..... | 48 |
| Figura 32 – Montagem da câmara de vácuo..... | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Relação entre os regimes de escoamento com o número de Knudsen..... | 11 |
| Tabela 2: Relação entre os regimes de escoamento com o número de Reynolds..... | 12 |
| Tabela 3: Relação entre o número de Mach com o tipo de escoamento..... | 14 |
| Tabela 4: Relação entre o tipo de gás com o coeficiente de expansão adiabática..... | 18 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 11 |
| 2.1 Tecnologia do vácuo..... | 11 |
| 2.1.1 O Estado Gasoso | 11 |
| 2.1.2 Taxa de Transferência de gás (<i>Throughput</i>) | 12 |
| 2.1.3 Bombeamento em vácuo | 13 |
| 2.1.4 Condutância..... | 14 |
| 2.1.5 Regimes de escoamento | 14 |
| 2.1.6 Livre caminho médio e número de Knudsen | 16 |
| 2.1.7 Número de Reynolds | 17 |
| 2.1.8 Efeito de blocagem (choked flow) | 19 |
| 2.1.8.1 Escoamento Compressível..... | 19 |
| 2.1.8.2 Estado de Estagnação Isentrópico | 20 |
| 2.1.8.3 Escoamento bloqueado (<i>Choked Flow</i>) | 21 |
| 2.2 Óptica | 25 |
| 2.2.1 Interferência Óptica..... | 25 |
| 2.2.2 Interferômetro de Michelson | 26 |
| 2.2.3 Interferômetro de Mach-Zehnder | 27 |
| 2.2.4 Interferômetro de Fabry-Perot..... | 28 |
| 2.2.5 Índice de refração da luz..... | 29 |
| 3 METODOLOGIA | 30 |
| 3.1 Construção da câmara de vácuo | 30 |
| 3.2 Montagem do arranjo do sistema de vácuo e do arranjo óptico. | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4 RESULTADOS | 39 |
| 5 CONCLUSÃO E PLANOS FUTUROS | 45 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |
| 7 APÊNDICE..... | 49 |
| Apêndice A – Desenhos técnicos da câmara de vácuo | 49 |
| Apêndice B – Artigos Publicados Durante a Graduação | 56 |

1 INTRODUÇÃO

O índice de refração é muito utilizado para análise de resultados já que é um parâmetro óptico básico dos materiais e de grande precisão na sua medida, por isso é de extrema importância em várias áreas, como na física, engenharia, medicina etc. A partir de experimentos realizados anteriormente do Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV), podemos dizer que o índice de refração de um gás é dependente da sua densidade, com isso é possível medir a pressão do gás através deste parâmetro [4]. Sendo assim, o atual projeto tem como objetivo estudar experimentalmente a variação do índice de refração da luz que interage em um gás pela variação de pressão em uma câmara de vácuo, buscando determinar com precisão o ponto de bloqueio (*choked flow*) de um gás, ou então, quando o *throughput* (taxa de transferência de um gás no processo de escoamento) deixa de ser constante, podendo ser útil na calibração de equipamentos que compõem os sistemas de vácuo.

O método que será utilizado para a análise óptica dos dados será baseado na interferência de luz, este método utiliza a apresentação de padrões de franjas, que nada mais são que interferências construtivas e destrutivas de ondas de luz que variam de acordo com o índice de refração, como base para nossas medidas e então será estabelecida uma relação experimental entre índice de refração de um gás e a sua pressão. Este método é possível de ser utilizado já que o índice de refração do gás é dependente de sua densidade, que por sua vez varia de acordo com a pressão ao qual é submetido, gerando uma variação no padrão de franjas.

Neste trabalho será primeiramente apresentado toda a fundamentação teórica que possibilita a compreensão do experimento realizado, trazendo os conceitos básicos dos gases e como estes se comportam em diferentes pressões, essenciais para a compreensão do que é o efeito de bloqueio (*choked flow*), além disso, também serão apresentados os conceitos que abrangem a interferometria a laser para compreender principalmente do arranjo experimental proposto durante o experimento. Em seguida teremos a apresentação detalhada do experimento: seus materiais, construção, adversidades encontradas ao longo do processo, entre outros. Por fim, serão apresentados os resultados provenientes dessa pesquisa, se foram satisfatórios ou não e como poderiam ser aplicados e continuados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão dos arranjos experimentais propostos, torna-se necessária a compreensão de conceitos fundamentais da tecnologia do vácuo e da óptica física. Assim, ao longo deste capítulo serão primeiramente abordados conceitos referentes à tecnologia do vácuo para a compreensão do comportamento dos gases no interior da câmara de vácuo. Em seguida, será tratado o assunto referente a óptica física, onde serão apresentados conceitos para a compreensão da interferometria a laser e da variação dos índices de refração, para que estes sejam posteriormente utilizados para a análise dos dados.

2.1 Tecnologia do Vácuo

2.1.1 O estado gasoso

O estado físico da matéria se constitui de três estados: sólido, líquido e gasoso, podendo ser classificados pela proximidade das moléculas definidas na maioria das vezes pelas forças de coesão, que faz com que as moléculas se aproximem, e repulsão, que promove o afastamento das moléculas. No estado sólido as moléculas possuem uma maior proximidade, podemos então dizer que predominam as forças de coesão, no estado líquido as moléculas têm uma proximidade menor que no estado sólido, conseqüentemente temos uma predominância maior das forças de repulsão e seu volume se adequa ao recipiente que está inserido. Já no estado gasoso as forças intermoleculares são muito pequenas [11] e quando tratamos deste em seu estado ideal podemos dizer que as moléculas estão livres de qualquer força de atração ou repulsão, sendo assim, as moléculas possuem um afastamento maior sem uma forma própria e, assim como os líquidos, se adequam ao recipiente que estão inseridos, além disso, suas moléculas frequentemente colidem entre si e com as paredes do recipiente. O estudo dos gases e de seu comportamento quando submetido a diferentes temperaturas e pressão se torna essencial para a compreensão dos sistemas de vácuo e do efeito de blocagem (*choked flow*).

Para a simplificação do estudo dos gases temos a lei dos gases ideais, que está ligada a equação de Clapeyron:

$$P.V = n.R.T \quad (1)$$

Sendo P a pressão, V o volume do recipiente, n o número de mols, T a temperatura a qual o gás é submetido e R a constante universal dos gases dependente da unidade de pressão utilizada. Os valores de R podem ser atribuídos da seguinte forma: para pressões em atm, temos $R= 0,082 \text{ L.atm.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; em mmHg temos $R= 62,3 \text{ L.mmhg.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; em KPa temos $R= 8,31 \text{ L.KPa.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Quando o comportamento do gás condiz com a lei dos gases ideais, podemos acrescentar algumas características para tal simplificação e que condizem com a ideia de fluidos perfeitos: a densidade do fluido é constante, o fluido não possui viscosidade, o módulo da velocidade do fluido não varia com o tempo e a velocidade do fluido como um todo possui a mesma direção e sentido [4], quando o comportamento do gás não condiz com a equação de Clapeyron, dizemos que este se desvia da idealidade, mas para o a blocagem em si a compreensão do que são os gases ideais é suficiente.

2.1.2 Taxa de transferência de gás (*Throughput*)

Na tecnologia do vácuo, o *throughput* pode ser definido como a taxa de transferência de um gás no processo de escoamento, podendo ser representado pela letra Q e podendo ser descrito em relação as mais diversas grandezas da tecnologia do vácuo, como na equação 4, descrita como a derivada da pressão no tempo pelo volume da câmara de vácuo:

$$Q = \frac{dP}{dT} V \quad (2)$$

Levando em consideração a velocidade de bombeamento, a equação também pode ser descrita como o produto da velocidade de bombeamento (S_B) pela pressão na câmara de vácuo (P_{in}):

$$Q = P_{in} \cdot S_B = P_{in} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Também pode ser descrita através da condutância da tubulação, podemos definir a taxa de transferência de gás (*throughput*) dessa maneira como sendo:

$$Q = C(P_b - P_a) \quad (4)$$

sendo C a condutância e $P_b - P_a$ a diferença de pressão dos pontos do tubo. A unidade normalmente utilizada é Torr.litro/s, ou ainda, mbar.litro/s. O *throughput* é proporcional ao fluxo de massa W de um gás desde que sob condições de fluxo constante, quando a pressão é constante temos o *throughput* como sendo:

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{W}{M} \cdot R \cdot T \right) = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dW}{dt} \quad (5)$$

2.1.3 Bombeamento em vácuo

Todo e qualquer sistema de vácuo necessita de uma bomba de vácuo para que assim ocorra o processo de diminuição de pressão e da saída dos gases do interior da câmara de vácuo, sendo assim, a equação para o bombeamento pode ser descrita como a derivação da equação dos gases ideais no tempo [4], sendo o volume e a temperatura constantes, assim obtemos:

$$V \frac{dP(t)}{dt} = -S_{ef} P(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (6)$$

Independentemente do tipo de bomba ou do sistema de vácuo utilizado a velocidade de bombeamento sempre estará presente, a velocidade de bombeamento (S) é definida como o volume de gás por unidade de tempo dV/dt que a bomba de vácuo remove do sistema, sendo assim, a velocidade de bombeamento pode ser tratada como:

$$S = \frac{Q}{P} \quad (7)$$

2.1.4 Condutância

Assim como em circuitos elétricos, os tubos de sistemas a vácuo e seus fluídos também contam com uma condutância, já que os componentes presentes nos sistemas de vácuo, como válvulas, tubulações, filtros, entre outros, fornecem uma certa resistência a passagem do gás [12]. Considerando essa comparação entre a condutância elétrica e a condutância em um sistema de vácuo, podemos dizer que a condutância em uma região durante o escoamento é:

$$C = \frac{Q}{P_b - P_a} \quad (8)$$

E, assim como na equação 6, o C representa a condutância e $P_b - P_a$ a diferença de pressão de dois pontos do tubo. Esse é um dos conceitos mais importantes quando tratamos de escoamento de fluídos em baixas pressões, principalmente por podermos definir, por exemplo, a velocidade de bombeamento efetiva do sistema (S_{ef}), ou seja, o quanto de volume de gás por unidade de tempo é removida do sistema efetivamente, onde podemos utilizar as seguintes equações:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_b} + \frac{1}{C} \quad (9)$$

$$S_{ef} = \frac{S_b \cdot C}{S_b + C} \quad (10)$$

2.1.5 Regimes de Escoamento

Os regimes de escoamento definem a forma como o gás e suas moléculas se comportam durante o escoamento no processo de bombeamento para formação do vácuo no interior da câmara de vácuo, estes variam de acordo com a pressão ao qual o gás está sendo submetido e pela velocidade de bombeamento do processo. Podem ser classificados através de dois parâmetros adimensionais: número de Knudsen (Kn) e número de Reynolds (Re), que serão tratados nos próximos capítulos, e podem ser definidos como:

Regime Viscoso: O regime viscoso pode ser caracterizado como o fluxo com fricção, tal fricção está presente entre o gás que está sendo escoado e as paredes da tubulação. Este regime pode ser dividido em Turbulento e Laminar, onde a diferença de ambos é causada principalmente pela fricção, que causa mudanças drásticas ao comportamento dos gases durante o escoamento [2]. O Regime Viscoso Turbulento ocorre ao início do processo de bombeamento, a alta pressão e alta velocidade dos gases fazem com que o fluido siga de forma desordenada [29], formando redemoinhos ao longo do tubo, ocorre quando o livre caminho médio é menor que o diâmetro do tubo. Já no Regime Viscoso Laminar, existe uma certa queda de pressão e velocidade em relação ao momento inicial do escoamento, o fluido segue uma trajetória suave ao longo do tubo, caracterizado normalmente como uma linha de corrente, assim como no turbulento, ocorre quando o livre caminho médio é menor que o diâmetro do tubo.

Figura 2- Regime de Escoamento Viscoso Turbulento

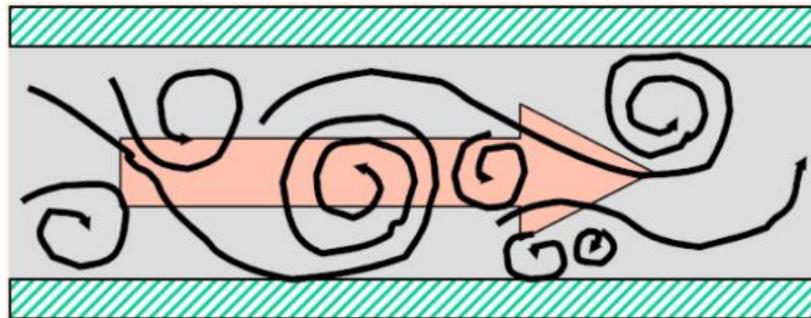
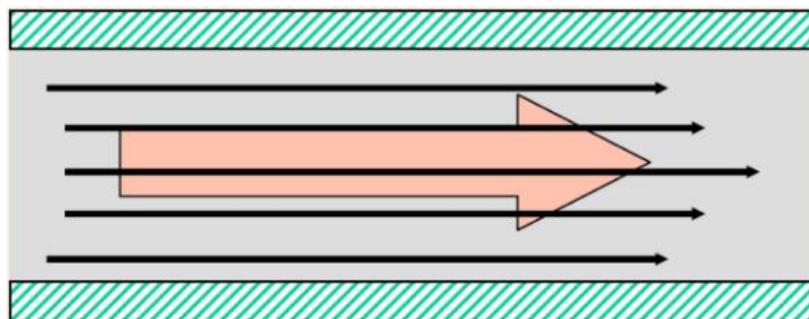


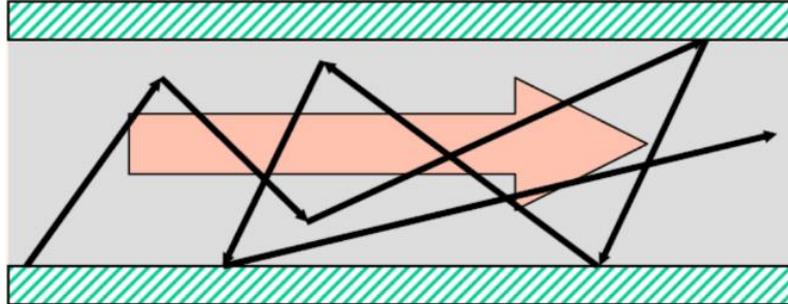
Figura 2- Regime de Escoamento Viscoso Laminar



Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [21].

Regime Intermediário: A quantidade de choques de moléculas com as paredes é a mesma que com as demais moléculas, ocorre quando o livre caminho médio tem diâmetro semelhante ao do tubo.

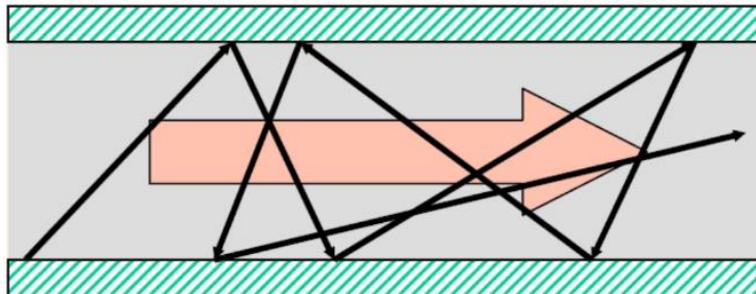
Figura 3- Regime de Escoamento Intermediário



Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22].

Regime Molecular: As moléculas se movem independentemente uma das outras, a queda da pressão e o aumento do livre caminho médio gera um maior choque de moléculas com as paredes do tubo do que com outras moléculas [13], ocorre quando o livre caminho médio é maior que o diâmetro do tubo.

Figura 4 - Regime de Escoamento Molecular



Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22].

2.1.6 Livre caminho médio e número de Knudsen

Denomina-se livre caminho médio a distância média percorrida por uma molécula entre duas colisões sucessivas, sendo este dependente das variações de pressão, temperatura e dimensões do recipiente. Este conceito é muito utilizado em cálculos de projetos para sistemas de vácuo, pois com ele podemos definir o regime de escoamento do fluido a ser utilizado, isso se deve ao fato de que para obtermos o regime de escoamento, necessitamos

de outro parâmetro chamado número de Knudsen (Kn) e este é dependente do valor do livre caminho médio. Podemos definir matematicamente o livre caminho médio como sendo:

$$\lambda = \frac{1}{\pi d^2 n} \quad (11)$$

Como já mencionado, é possível obter o número de Knudsen por meio do valor do livre caminho médio e de uma dimensão característica do sistema de vácuo. A equação que nos dá o valor do número de Knudsen é dada pela equação:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (12)$$

onde λ é o livre caminho médio e L é uma distância característica do tubo (no caso, o seu diâmetro) utilizado no sistema de vácuo. Podemos definir os regimes de escoamento através do número de Knudsen da seguinte forma:

Tabela 1: Relação entre os regimes de escoamento com o número de Knudsen.

| Regime de escoamento | Número de Knudsen |
|-----------------------------|--------------------------|
| Molecular | $Kn > 1,0$ |
| Intermediário | $0,01 < Kn < 1,0$ |
| Viscoso Laminar | $Kn < 0,01$ |
| Viscoso Turbulento | $Kn < 0,01$ |

Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22].

2.1.7 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re), assim como o número de Knudsen é um parâmetro muito importante para o projeto de sistemas de vácuo, pois este também pode ser utilizado para definir o regime de escoamento do fluido, é utilizado para diferenciar os regimes que não são

totalmente definidos com o número de Knudsen, no caso o viscoso laminar e turbulento. Este parâmetro pode ser obtido pela seguinte equação:

$$Rn = \frac{v\rho d}{\eta} \quad (13)$$

onde ρ é a densidade do fluido que estamos trabalhando (gás), d é o diâmetro do tubo, v é a velocidade do escoamento e η é a viscosidade do fluido. Podemos definir o regime de escoamento com o número de Reynolds da seguinte forma:

Tabela 2: Relação entre os regimes de escoamento com o número de Reynolds

| Regime de escoamento | Número de Reynolds |
|-----------------------------|---------------------------|
| Viscoso Laminar | Re < 1200 |
| Viscoso Turbulento | Re > 2000 |

Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22].

2.1.8 Efeito de Blocagem

2.1.8.1 Escoamento Compressível

Para podermos definir o efeito de blocagem é necessário que primeiramente vejamos conceitos como escoamentos compressíveis e o número de *Mach*, sendo assim, o escoamento compressível pode ser definido como um escoamento onde há uma variação significativa na massa específica do fluido, ou de sua densidade, a partir de variações na pressão [26]. Este escoamento é favorecido com o aumento da velocidade do escoamento do fluido, já que com uma grande variação de velocidade iremos observar também grandes variações na massa específica do fluido, na pressão e, conseqüentemente, na temperatura.

Podemos definir os escoamentos como compressíveis ou incompressíveis através do número de *Mach*, o número de *Mach* é definido pela relação entre a velocidade de escoamento do fluido com a velocidade do som local, como podemos observar na equação 12, quando o número de *Mach* é superior a 0,3 podemos dizer que o escoamento é compressível, abaixo disso o escoamento será classificado como incompressível, estando no nível subsônico.

$$M = \frac{V}{c} \quad (14)$$

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (15)$$

sendo *V* a velocidade do fluido, *c* a velocidade do som local, γ o coeficiente de expansão adiabática dos gases, *R* a constante universal dos gases e *T* a temperatura. A partir do número de *Mach* é possível também classificar o escoamento do fluido, como podemos ver na tabela 3:

Tabela 3: Relação entre o número de Mach com o tipo de escoamento

| Nº de Mach | Escoamento |
|-------------------|-------------------|
| M<1 | Subsônico |
| M>1 | Supersônico |
| M=1 | Sônico |
| 0,9<M<1,2 | Transônico |
| M≥5 | Hipersônico |

Fonte: Número de Mach [27].

2.1.8.2 Estado de Estagnação Isentrópico

O estado de estagnação isentrópico pode ser definido como o estado que o escoamento atingiria caso fosse levado ao modo de repouso [5]. Normalmente, os parâmetros tratados na condição de estagnação do gás ideal recebem o índice 0 (zero), por exemplo: P_0 .

A partir das equações da quantidade de movimento e da continuidade, podemos deduzir as equações das propriedades locais de estagnação isentrópica para um gás ideal [10], dispostas nas equações a seguir:

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (16)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (17)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (18)$$

Quando atingimos o escoamento sônico, isso é quando $M=1$, obtemos as propriedades críticas do escoamento isentrópico e levando em consideração que os parâmetros tratados na condição de estagnação são constantes ao longo do escoamento isentrópico [10], obtemos as seguintes equações para o escoamento crítico:

$$\frac{P_0}{P^*} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (19)$$

$$\frac{T_0}{T^*} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \quad (20)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho^*} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (21)$$

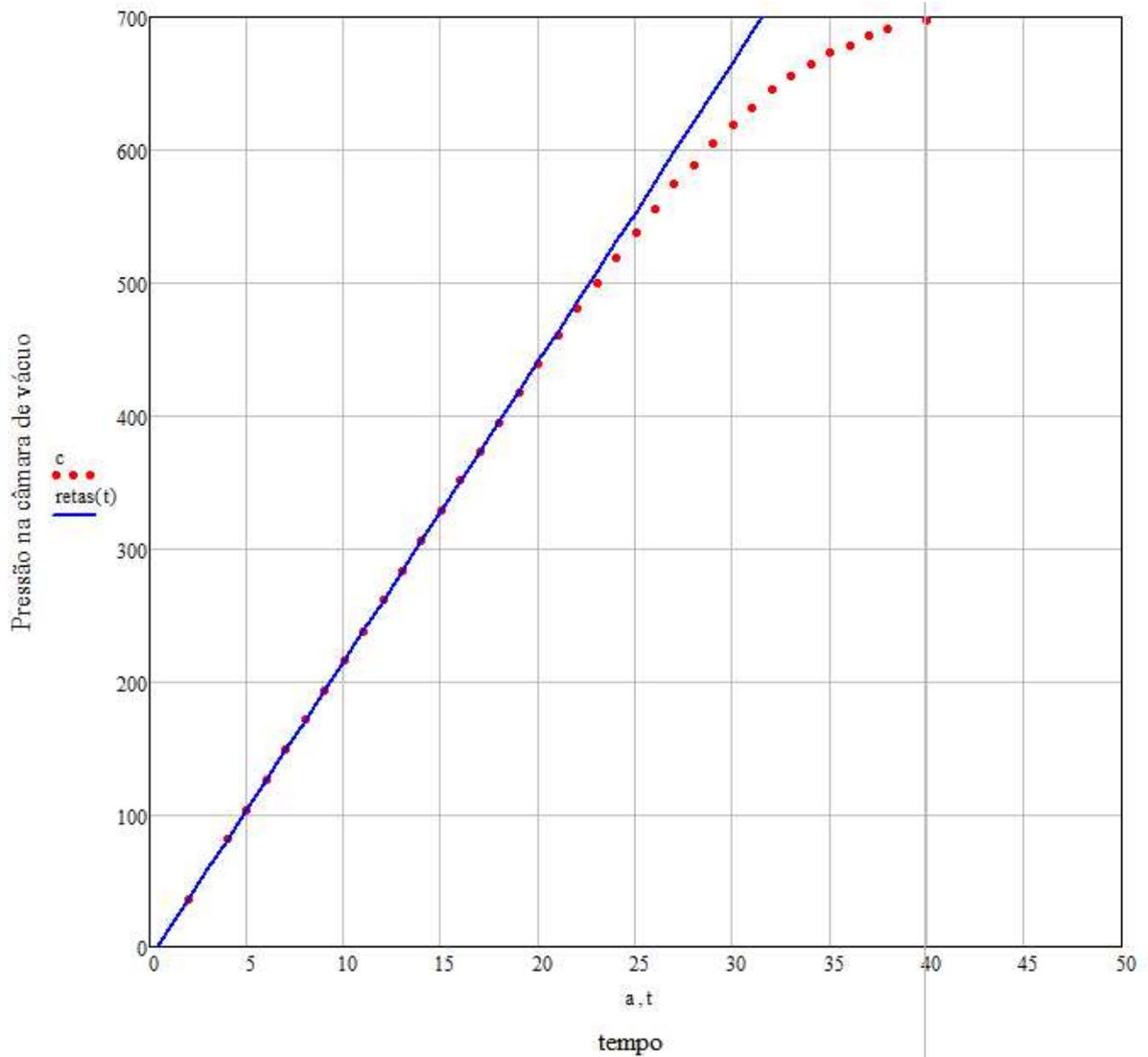
Tanto para as equações (14), (15) e (16), quanto para as equações (17), (18) e (19), P é a pressão, T a temperatura, ρ a densidade, γ o coeficiente de expansão adiabática dos gases e M o número de *Mach*.

2.1.8.3 Escoamento bloqueado (*Choked Flow*)

O fenômeno de escoamento bloqueado, ou também chamado *Choked flow*, é um efeito de um escoamento compressível que limita a velocidade de fluídos que passam por pequenos orifícios. A bloqueagem ocorre quando o número de *Mach* é igual a 1, ou seja, quando a velocidade do fluído é a mesma que a velocidade do som local, como vimos anteriormente nesta condição podemos dizer que o escoamento é sônico.

O efeito de bloqueagem também está associado ao efeito Venturi, onde em um tubo de escoamento o fluído é comprimido por uma zona de estreitamento, onde nessa zona sua pressão abaixa e conseqüentemente aumenta sua velocidade. À medida que a vazão do escoamento é aumentada, a pressão mínima na região de estreitamento se torna menor, até que o escoamento se torne sônico ($M=1$). Neste momento o *throughput* deixa de ser constante e passa a decair, afetando a subida de pressão no interior da câmara de vácuo, como podemos observar na figura 1:

Figura 5- Efeito de blocagem – Variação temporal da pressão em câmara de vácuo



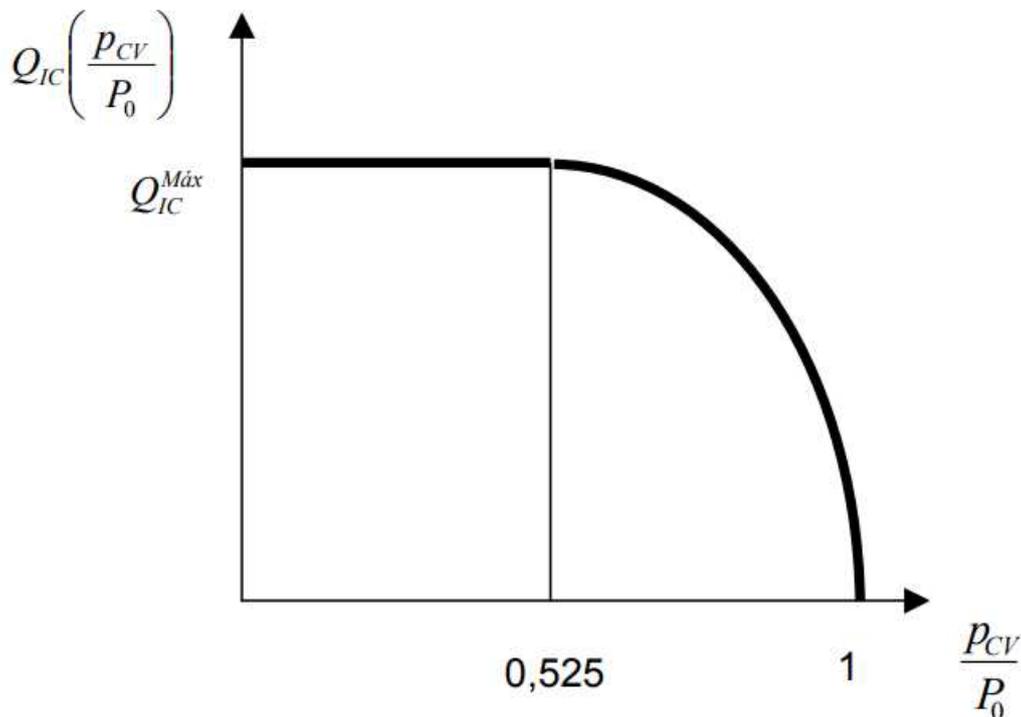
Fonte: Experimento realizado pelo professor Francisco Tadeu Degasperi no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP).

A partir das equações de estagnação isentrópica para o escoamento sônico, ou seja, para as propriedades críticas do escoamento isentrópico para a pressão, é deduzida a equação que indica que o sistema está bloqueado:

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (22)$$

Onde $\frac{P^*}{P_0}$ é a relação entre as pressões do recipiente divididas pelo orifício que o gás escoou, para o hidrogênio, ou também o nitrogênio, temos o momento da bloqueagem como sendo aproximadamente $\frac{P^*}{P_0} = 0,525$ que pode ser observado na seguinte figura:

Figura 6- Gráfico do throughput em função do quociente da pressão na câmara de vácuo pela pressão no reservatório de gás. A pressão no reservatório de gás é mantida constante, com $P_0 = 1000$ mbar.



Fonte: Modelagem e Análise detalhadas de Sistemas de Vácuo [7].

No gráfico temos o eixo das ordenadas sendo representado pelo *throughput* do sistema, já no eixo das abscissas temos a razão de pressão na câmara de vácuo pela pressão atmosférica. Podemos observar que quando a pressão na câmara de vácuo for aproximadamente metade da pressão atmosférica o *throughput* deixará de ser constante, esse estará então em sua condição crítica e indicará que o sistema está bloqueado, limitando o fluxo de gás.

Os valores da razão crítica para os sistemas de vácuo irão depender do tipo de gás que estamos trabalhando, que dependerão do valor de seu coeficiente de expansão adiabática (γ). Com isso, temos a seguinte tabela que relaciona os valores de γ ao tipo de gás trabalhado:

Tabela 4: Relação entre o tipo de gás com o coeficiente de expansão adiabática

| Tipo de gás | γ |
|--------------------|----------------------------|
| Monoatômico | 1,66 |
| Diatômico | 1,4 |
| Triatômico | 1,3 |
| Poliatômico | 1,1 |

Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22]

2.2 Óptica

2.2.1 Interferência Óptica

Como já se sabe, a luz é tratada como um tipo de onda eletromagnética, já que é constituída por uma propagação em conjunto de um campo elétrico e um campo magnético, podendo propagar-se por vários meios. O fenômeno da interferência óptica, por sua vez, é observado quando dois feixes de luz se encontram no mesmo espaço físico ou quando duas ondas eletromagnéticas oscilam no mesmo espaço físico [4]. Existem dois principais tipos de interferência entre ondas coerentes: a construtiva e a totalmente destrutiva; na interferência construtiva as ondas oscilam em mesma fase, onde sua somatória resulta na soma das amplitudes das duas ondas, na interferência totalmente destrutiva as ondas oscilam com diferença de fase de $\lambda/2$ e a somatória delas resulta em zero.

Figura 7 - Interação de ondas com interferência totalmente destrutiva.

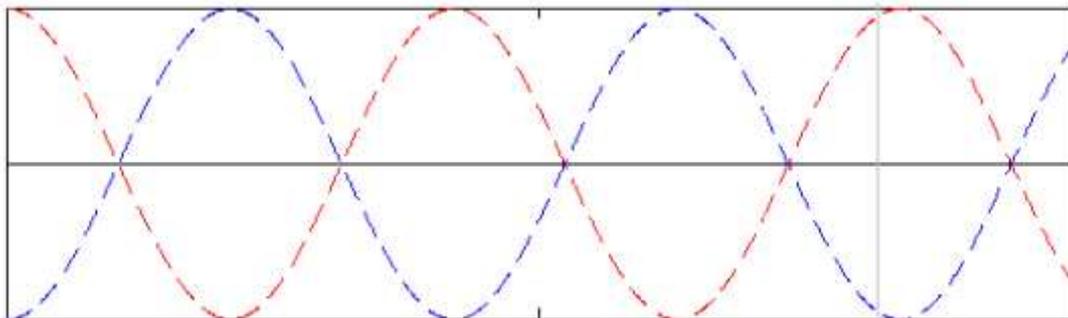
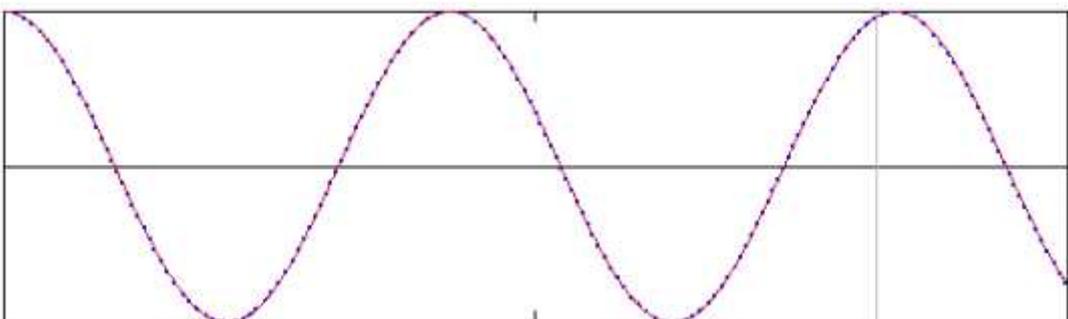


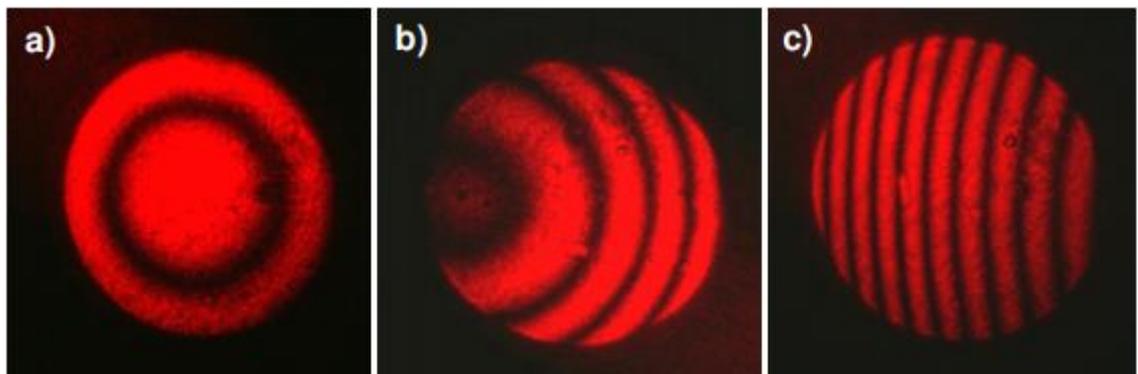
Figura 8 - Interação de ondas com interferência construtiva.



Fonte: Medição e Análise Detalhada da Brocagem de Gás (Choked Flow of Gases) por meio da Dependência do Índice de Refração da Luz em Função da Pressão. [4]

O padrão de franjas é comumente utilizado na interferometria, já que pode ser facilmente analisado a olho nu, o padrão de franjas pode ser entendido como sendo duas ondas que se propagam obliquamente no espaço, quando os feixes se interferem de forma construtiva geram a faixa clara, quando interferem de forma destrutiva geram a faixa escura [26], na imagem abaixo é possível observar um exemplo de padrão de franjas, onde apenas alterando a angulação dos espelhos de um interferômetro de Michelson, obtemos diferentes resultados sendo que no primeiro caso os espelhos estão perfeitamente alinhados e nos outros dois com uma pequena alteração de alinhamento:

Figura 9 - Padrão de franjas observado quando os espelhos estão alinhados (a) e ligeiramente desalinhados (b e c).



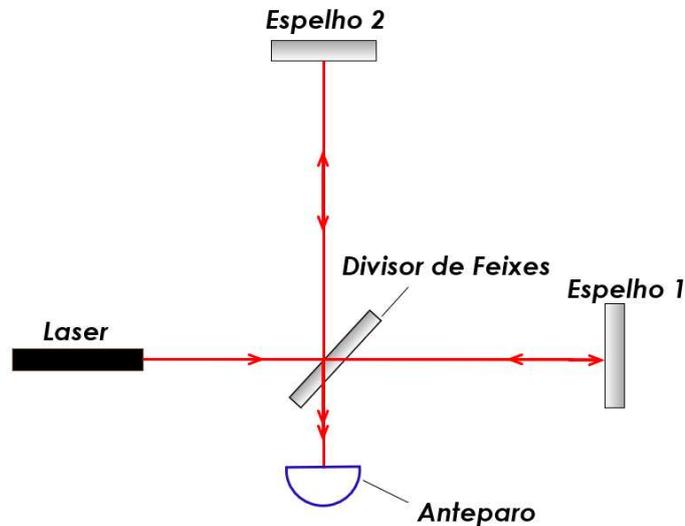
Fonte: Interferômetro de Michelson. [1]

Existem diversos tipos de interferômetros que produzem o padrão de franjas mostrado anteriormente, onde se diferenciam principalmente pelo arranjo e sensibilidade do conjunto utilizado.

2.2.2 Interferômetro de Michelson

O interferômetro de Michelson é constituído de um espelho semi-refletor, um espelho fixo e outro espelho móvel e é utilizado principalmente para a medição de comprimentos ópticos, pequenos deslocamentos e comparação de superfícies, conseqüentemente podem ser utilizados para o calcular o índice de refração de meios, como no caso desse projeto, onde utilizaremos o método de interferometria para a análise do índice de refração de gases.

Figura 10 - Interferômetro de Michelson



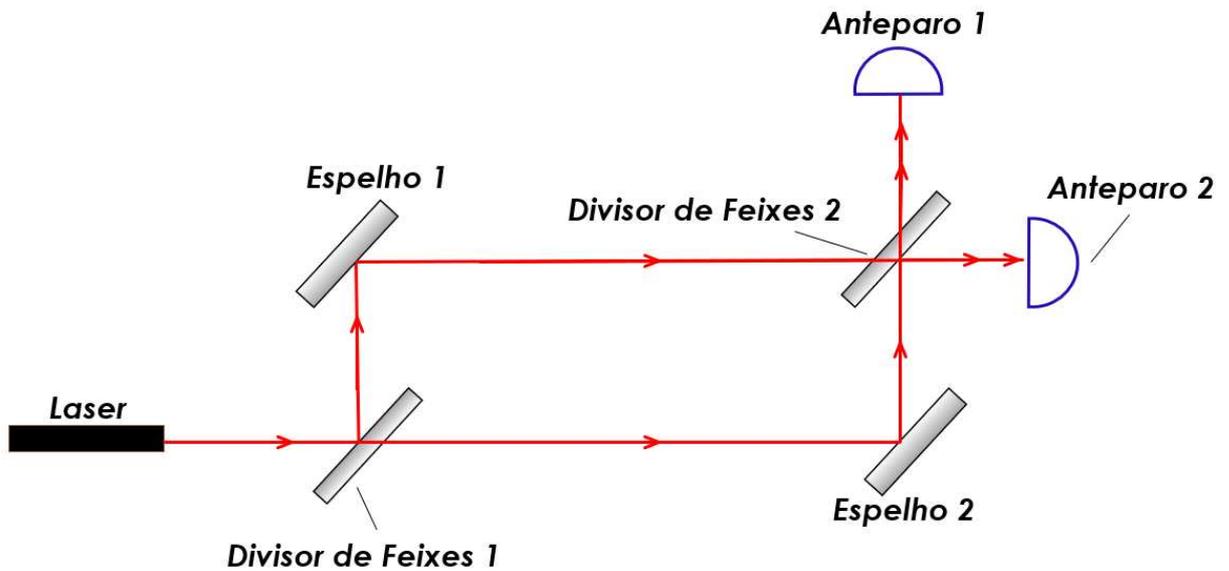
Fonte: Análise de misturas gasosas por refratometria [3].

No esquema apresentado, é possível visualizar o caminho que o feixe de luz incidente percorre no interferômetro, a luz incide no divisor de feixes onde gera duas componentes, a primeira componente segue para o espelho 1, a segunda componente segue para o espelho 2, ambas componentes então são refletidas e recombinadas, gerando o padrão de franjas no anteparo.

2.2.3 Interferômetro de Mach-Zehnder

Assim como o interferômetro de Michelson, o interferômetro de Mach-Zehnder é um interferômetro divisor de feixes utilizado para experimentos de interferência, difração e polarização. É composto por dois divisores de feixe onde o feixe incidente no divisor 1 separa o feixe em duas componentes que são direcionadas aos espelhos 1 e 2, que então incidem no segundo divisor de feixes, as componentes serão recombinadas e então apresentadas no anteparo 1 e 2.

Figura 11- Esquema de um interferômetro de Mach-Zehnder.



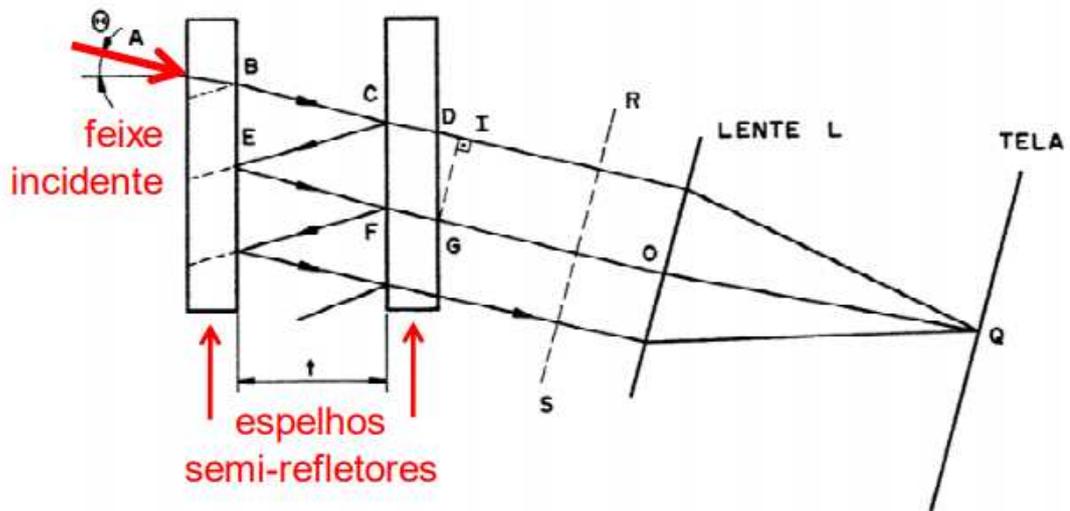
Fonte: Análise de misturas gasosas por refratometria. [3]

Assim como o anterior, o padrão de franjas resultante do processo irá ser mostrado no anteparo, por onde serão obtidos os resultados do experimento.

2.2.4 Interferômetro de Fabry-Perot

O interferômetro de Fabry-Perot, assim como os anteriores, é um interferômetro divisor de feixes que gera como resultado de seu conjunto um padrão de franjas, que podem ser posteriormente utilizados para a análise dos resultados dos experimentos realizados. É composto por dois divisores de feixe em paralelo, com um deles podendo ser movido, onde a luz incidente é refletida diversas vezes no espaço entre os semi-refletores e posteriormente são coletados por uma lente e incidem em um anteparo formando o padrão de franjas a ser analisado, a seguir podemos observar a figura que representa o interferômetro de Fabry-Perot:

Figura 12 - Representação esquemática do interferômetro de Fabry-Perot.



Fonte: Interferômetro de Fabry-Perot [14].

2.2.5 Índice de refração da luz

O índice de refração é uma medida do quanto a velocidade da luz varia em relação a um meio, é um parâmetro óptico básico dos materiais e a precisão na sua medida tem grande importância em várias áreas. Pode ser definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo absoluto (c) e a velocidade da luz no meio (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (23)$$

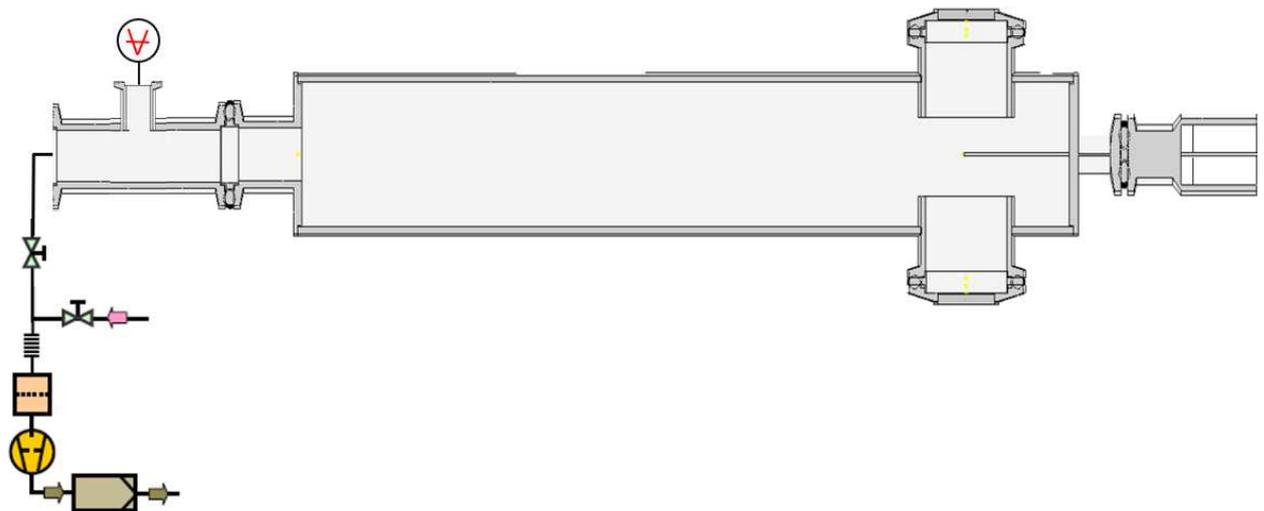
Neste trabalho utilizaremos o índice de refração em gases como o principal parâmetro para análise, já que este pode variar dependendo de sua densidade, o que permite que se meça a pressão do gás através deste parâmetro [4], mas outros fatores precisam ser levados em consideração, como também o tipo de molécula do gás, umidade, entre outros. Através de processos interferométricos e pelo padrão de franjas apresentados, podem ser obtidos os índices de refração de meios líquidos e gasosos com precisão, com estes podendo ser convertidos para valores de pressão posteriormente.

3 METODOLOGIA

3.1 Construção da câmara de vácuo

Para o experimento foi projetada uma câmara de vácuo em formato de tubo utilizando o *software Autodesk Inventor Professional 2021*, nele é possível realizar os desenhos técnicos dos componentes que serão posteriormente encaminhados para o torneiro mecânico e para soldagem. O corpo da câmara de vácuo precisava ser em formato cilíndrico de comprimento suficiente para que a circulação dos gases em seu interior não prejudicasse o experimento, no caso, utilizamos um cilindro de comprimento de 1,13m, além disso, a câmara de vácuo precisava conter dois visores em suas laterais para que fosse feita a passagem do feixe de luz para a interferometria, para isso foram utilizados dois flanges KF40, na figura a seguir é possível visualizar o esboço feito para a projeção da câmara de vácuo:

Figura 13: Corte meia vista da vista superior da câmara de vácuo.



Fonte: Autor.

O feixe deve passar bem próximo ao capilar por onde entrarão os gases para podermos observar o efeito desejado, sendo assim, este capilar deveria estar posicionado de forma a podermos o observar através dos visores, como apresentado tanto na figura 13 como na figura a seguir, onde podemos observar a cavidade por onde percorrerá o laser, tendo os flanges KF40 abertos sem a instalação da visor:

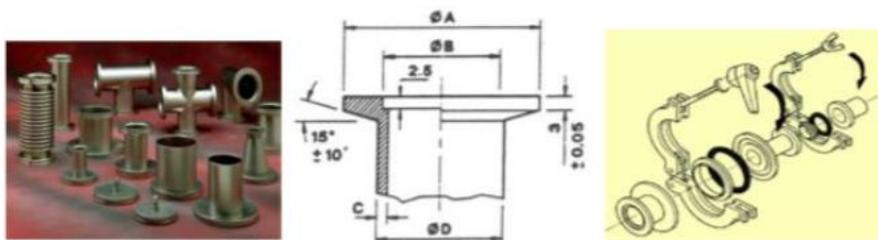
Figura 14 – Vista do capilar localizado no interior da câmara.



Fonte: Autor.

Além disso, a câmara também necessitou conter dois flanges em sua extremidades, sendo eles: o KF10 que faz a ligação com o componente auxiliar portador do capilar por onde entrarão os gases no sistema (extremidade direita) e outro KF25 que fará ligação com o restante do sistema de vácuo para o bombeamento dos gases para fora da câmara de vácuo (extremidade esquerda), todos os flanges possuem medidas catalogadas e podem ser observadas na figura 15. Os desenhos técnicos referentes à construção da câmara de vácuo são possíveis de serem visualizados na seção de anexos deste trabalho.

Figura 15 – Valores catalogados dos flanges



| | A | B | C | D |
|-------|----|------|-----|------|
| NW 10 | 30 | 12,2 | 2 | 14 |
| NW 16 | 30 | 17,2 | 2 | 20 |
| NW 25 | 40 | 16,2 | 2 | 28 |
| NW 40 | 55 | 41,2 | 2 | 44,5 |
| NW 50 | 75 | 52,2 | 3,2 | 57 |

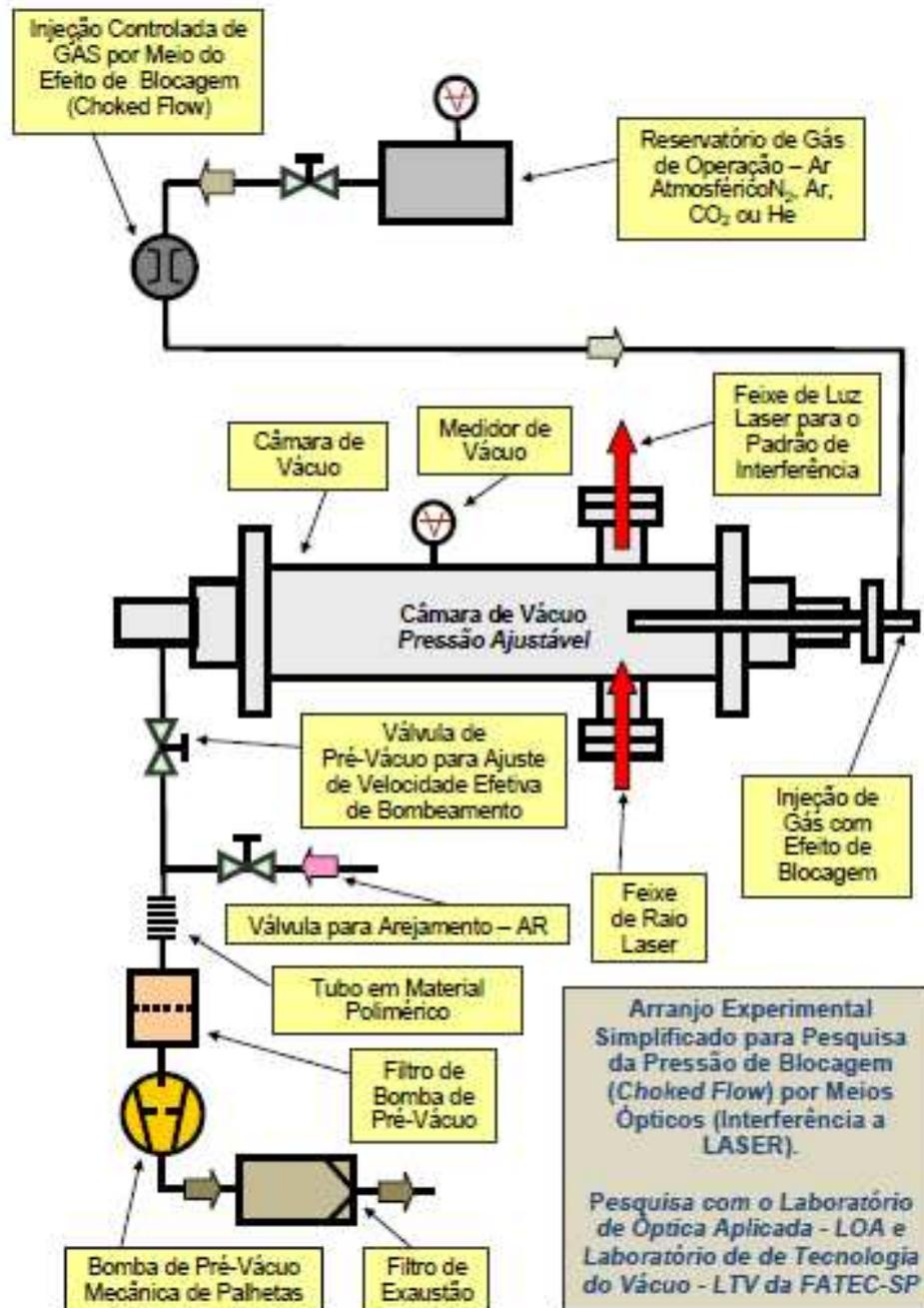
Fonte: Notas de aula da disciplina de Tecnologia do Vácuo [22].

3.2 Montagem do arranjo do sistema de vácuo e do arranjo óptico.

Para a montagem do arranjo experimental deste projeto, foi utilizado inicialmente um interferômetro de Michelson, mencionado anteriormente neste trabalho, onde um feixe de luz em um dos ramos passa pela câmara de vácuo através dos dois visores de vidro óptico, a câmara é então pressurizada por uma bomba de vácuo mecânica. O método de interferometria foi adotado pois possui alta precisão, além disso, possui caráter não-destrutivo e não-interferente, já que apenas a luz interage com o meio a ser analisado. Com a variação de pressão na câmara, varia-se o índice de refração do gás em seu interior, que provoca uma diferença no padrão de franjas apresentadas no anteparo.

Primeiro foi feito vácuo no interior da câmara de vácuo até a região de pré-vácuo, onde nesse caso o efeito irá ocorrer na regime de escoamento viscoso, para que assim analisemos o fenômeno desejado: a blocagem (*choked flow*), através da variação de pressão. Em seguida injetamos gases, nesse caso o próprio ar atmosférico, analisando a subida de pressão do gás no interior da câmara juntamente a variação do padrão de franjas, para isso o seguinte arranjo do sistema de vácuo foi elaborado:

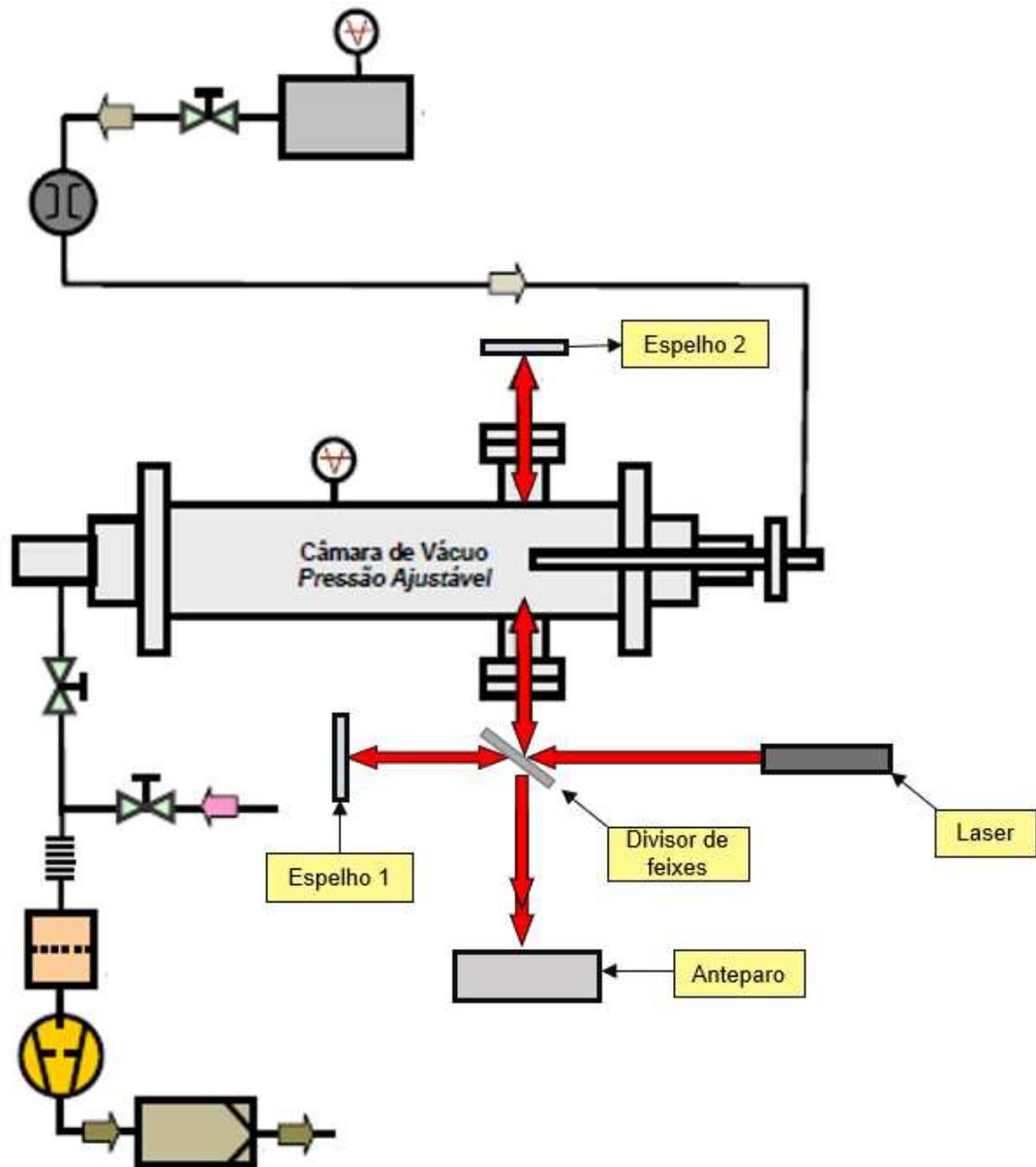
Figura 16 - Arranjo experimental do sistema de vácuo utilizado.



Fonte: Autor.

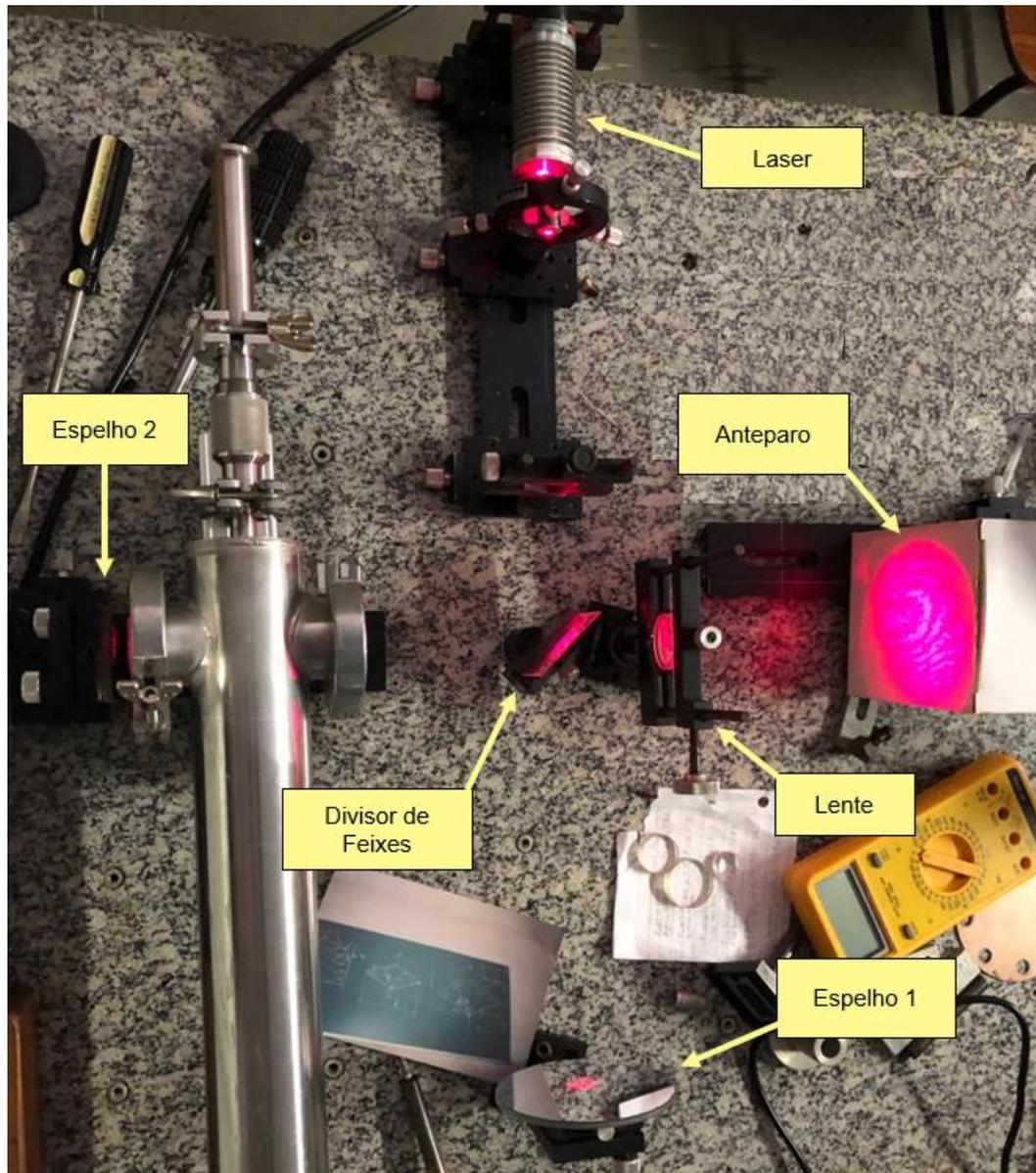
Sendo assim, ao incluímos o interferômetro de Michelson ao sistema, obtemos o seguinte arranjo experimental:

Figura 17 – Arranjo do sistema de vácuo utilizando o interferômetro de Michelson



Fonte: Autor.

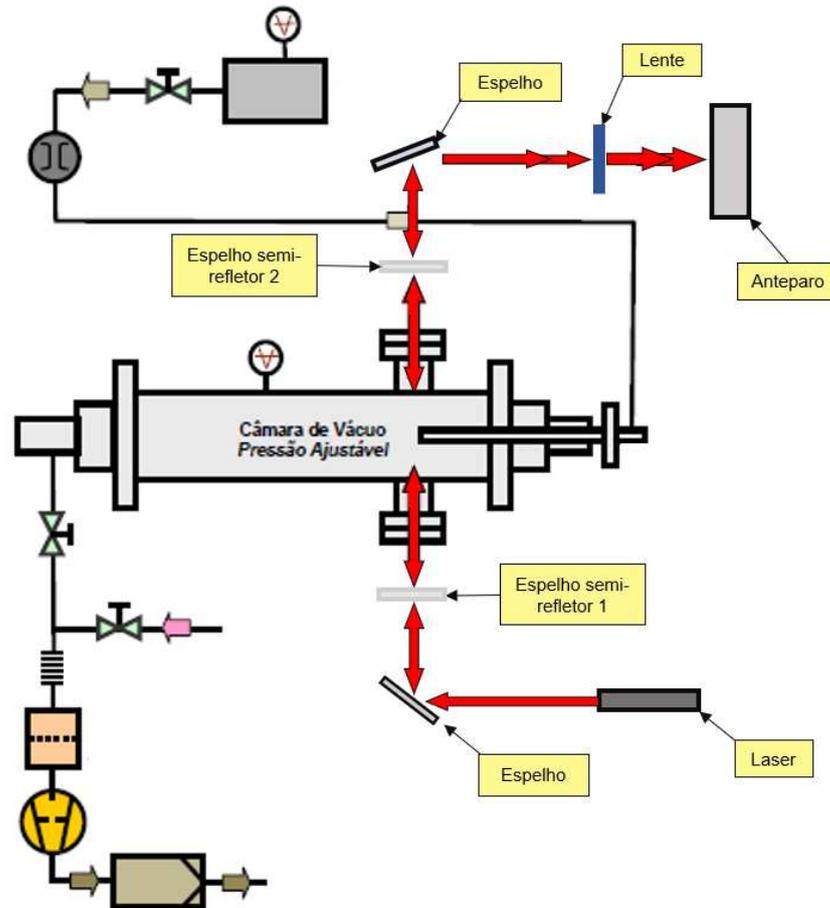
Figura 18 – Arranjo do sistema de vácuo utilizando o interferômetro de Michelson



Fonte: Autor.

A fim de buscarmos uma sensibilidade maior para o experimento, optamos por utilizar outro interferômetro, dessa vez o interferômetro de Fabry-Perot, mais sensível que o interferômetro de Michelson. Sendo assim, o seguinte arranjo experimental foi elaborado:

Figura 19 – Arranjo do sistema de vácuo utilizando Fabry-Perot



Fonte: Autor.

Lembrando que os espelhos (não semi-refletores) utilizados para este arranjo são apenas para o redirecionamento do feixe, não necessariamente afetando o experimento, logo, apenas são considerados no Fabry-Perot os espelhos semi-refletores. Em ambos os casos a cavidade de vácuo percorrida pelo feixe foi de aproximadamente 112 mm e seu comprimento de onda de 650 nm. No anteparo, foram apresentadas as franjas, que seriam posteriormente analisadas, na imagem a seguir podemos observar um exemplo do padrão de franjas apresentado durante o escoamento:

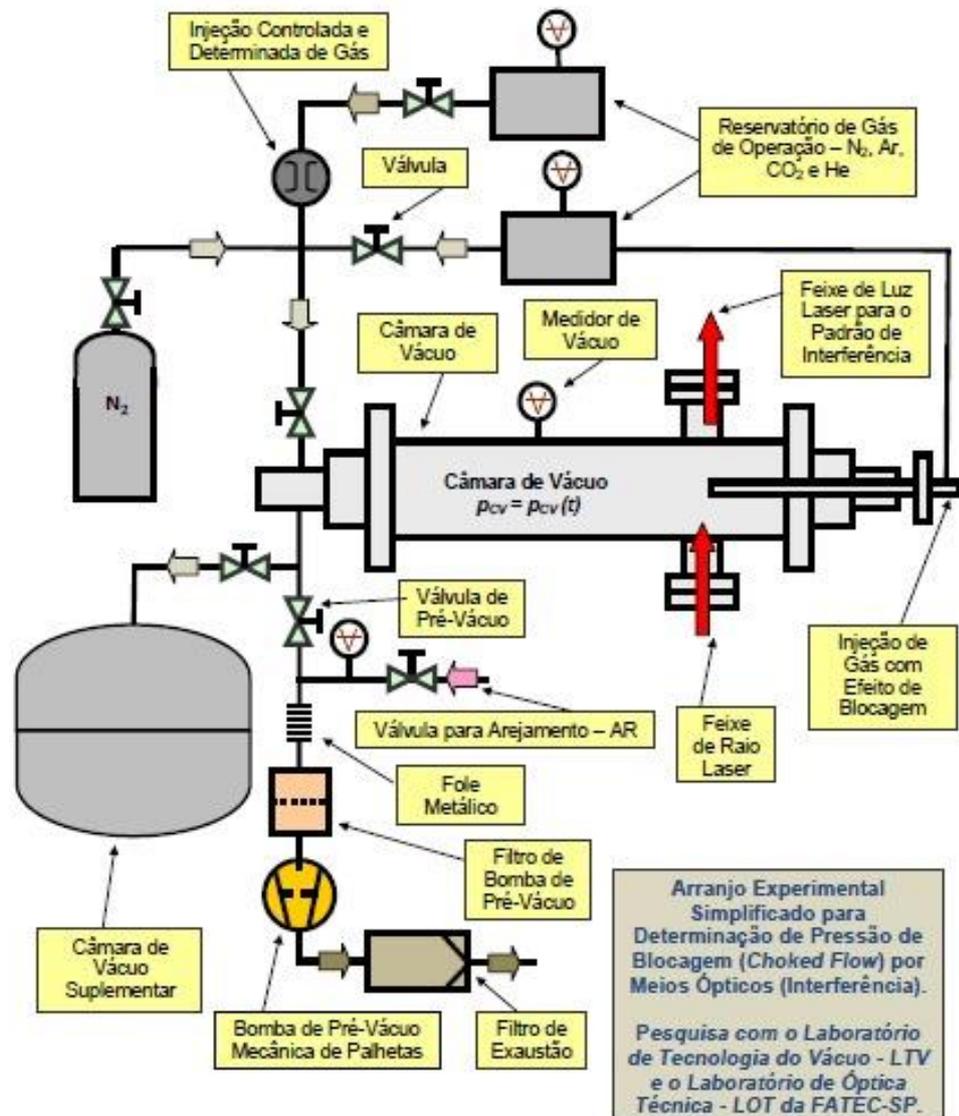
Figura 20 – Padrão de franjas apresentado durante o experimento.



Fonte: Autor.

Também vale realçar que para a continuidade e experimentos futuros deste trabalho teremos o seguinte arranjo do sistema de vácuo localizado na figura 19, sendo um sistema mais complexo e mais trabalhado, podendo ser utilizados outros tipos de gases para o processo:

Figura 21 – Arranjo experimental para modelagem e análise detalhada de sistemas de vácuo



Fonte: Autor.

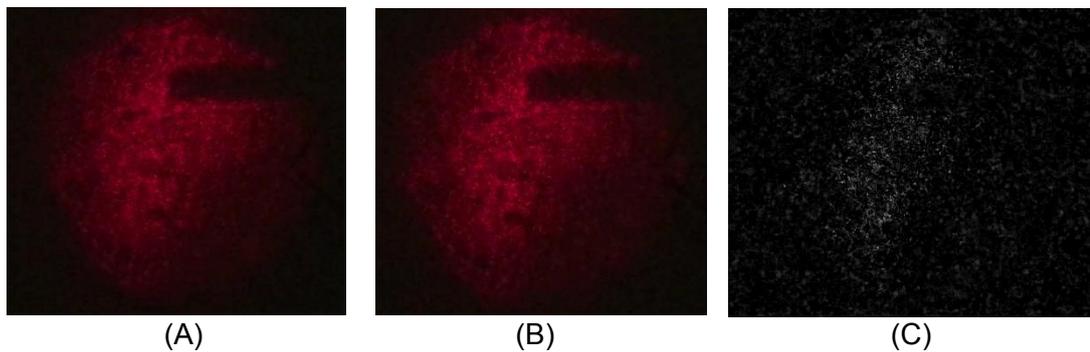
4 RESULTADOS

A análise dos resultados consiste, basicamente, na observação da variação das franjas, ao longo do experimento, essa variação foi observada por diversas vezes e constatada, a princípio, nenhuma alteração que pudessem indicar o momento de blocagem. Assim, surgiu a hipótese de que possivelmente não seria possível fazer tal observação sem algum método adicional, já que em alguns momentos as franjas possuíam interferências não constantes, mas que eram difíceis de serem visualizadas por serem pequenas e rápidas, contudo, ainda poderiam nos indicar alguma variação durante a blocagem.

A fim de analisar essas interferência não constantes que poderiam ser de utilidade para nossos resultados, o experimento foi feito mais algumas vezes e dessa vez foram feitas gravações em vídeo da variação do padrão de franjas apresentado no anteparo, os vídeos foram então separados em três etapas: antes da blocagem (pressões abaixo de 330 Torr), durante a blocagem (pressões entre 330 e 380 Torr) e depois da blocagem (pressões maiores que 380 Torr), o efeito de blocagem ocorre em aproximadamente 350 Torr, ou seja, aproximadamente metade da pressão atmosférica, mas o efeito ocorre de forma muito rápida, logo era necessário atribuir um intervalo onde poderia ocorrer alguma variação de relevância na interferência, por isso consideramos o intervalo de 330 a 380 Torr. Para cada etapa foram localizadas de uma a duas fases de variação entre as franjas, o padrão de franjas variava e se repetia periodicamente, então cada uma dessas repetições foi considerada como uma fase, essas fases foram então separadas em *frames* utilizando o aplicativo Fotos do Windows 10 para serem posteriormente tratadas e analisadas.

Após a obtenção das imagens, foram feitas diversas subtrações de imagens *pixel a pixel*, comparando as fases antes, durante e após a blocagem, onde foi utilizado o *software ImageJ* para os cálculos. Nas imagens abaixo podemos observar um exemplo de como foi feita essa análise, em (A) temos um momento localizado durante uma fase em uma das etapas mencionadas anteriormente, podemos dizer durante a blocagem, em (B) um momento equivalente na fase localizada na etapa depois da blocagem por exemplo, assim, fazemos a subtração das duas imagens e em (C) temos o nosso resultado, onde os pixels pretos indicavam uma igualdade entre as duas imagens e os pixels brancos uma diferença, neste exemplo pouco da imagem era visível, onde se sobressaíam apenas os ruídos referentes as próprias imagens e ao laser utilizado, podemos dizer então que não havia alteração entre as imagens (A) e (B).

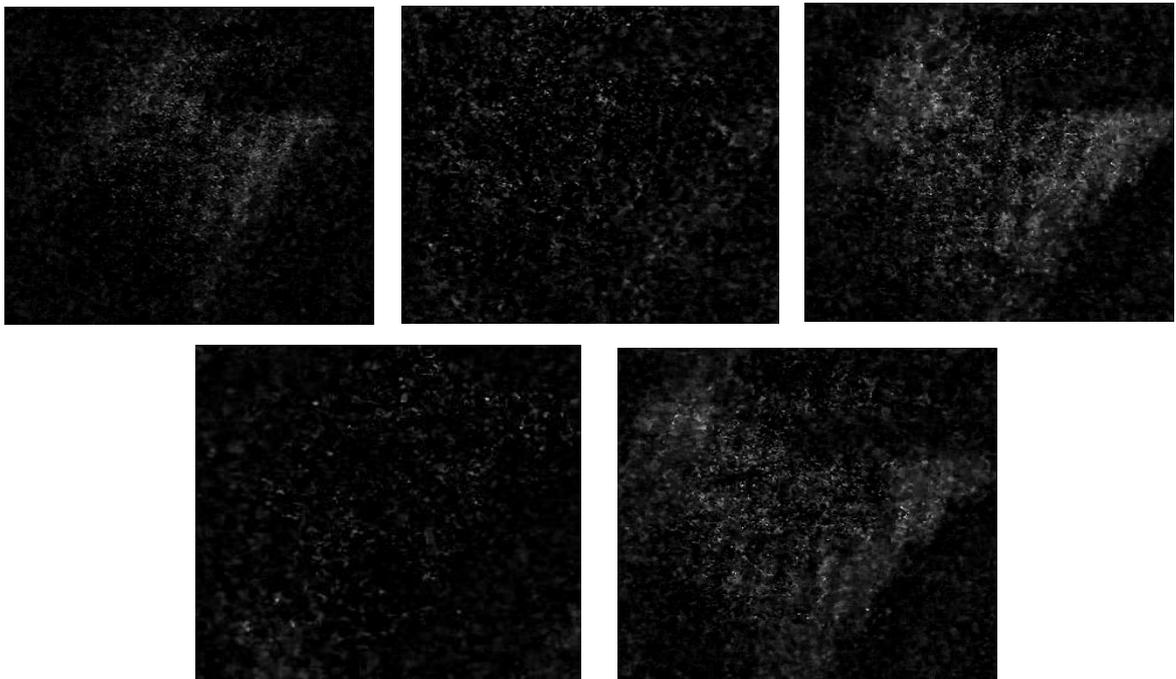
Figura 22 – Exemplo de cálculo realizado no software ImageJ



Fonte: Autor.

Primeiramente, foram feitas as comparações entre as fases localizadas nas etapas antes e durante a blocagem, contudo, o *throughput* no período anterior a blocagem era muito maior, fazendo com que o padrão de franjas variasse muito mais rápido do que em relação a fase seguinte, apresentando resultados que indicam a impossibilidade de relacionar essas duas etapas através da abordagem utilizada, como é possível visualizar nas imagens a seguir, que apresentam os resultados dessa comparação:

Figura 23 – Resultados da comparação das fases equivalentes antes e durante a blocagem.

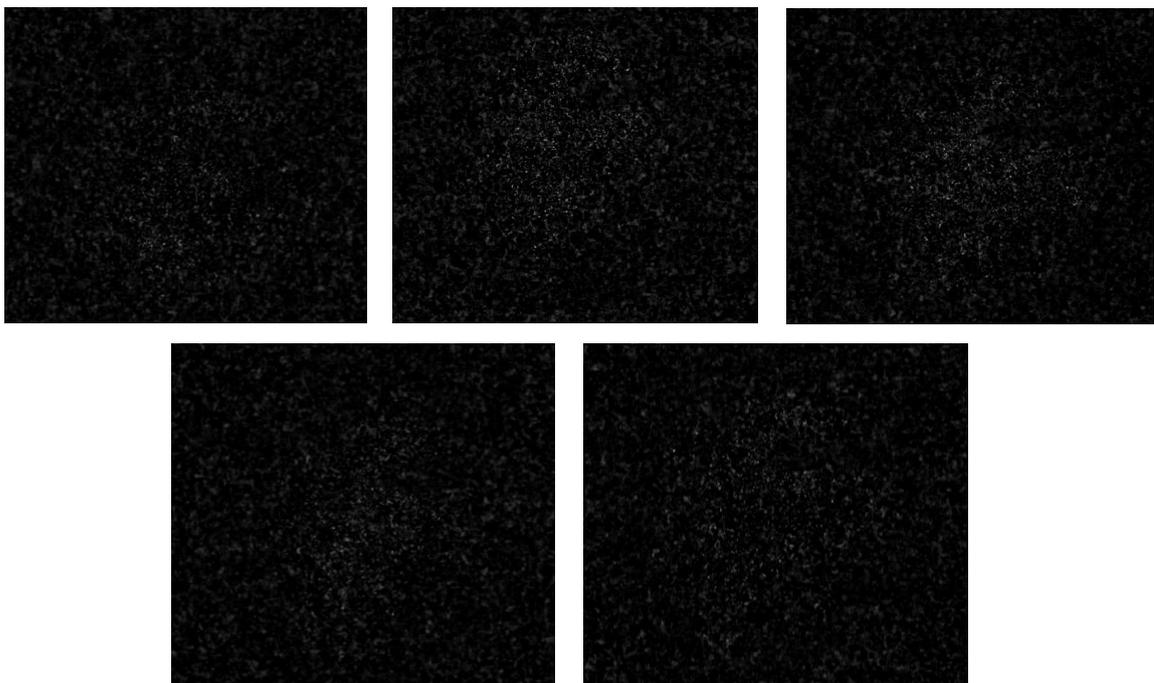


Fonte: Autor.

Como dito anteriormente, a velocidade na variação do padrão de franjas para a etapa antes da bloqueagem era muito maior, com isso, a quantidade de *frames* localizados no vídeo para o que consideramos como sendo uma fase era menor do que a quantidade de *frames* localizados para uma fase equivalente durante a bloqueagem, fazendo com que os resultados não fossem de muita relevância, apresentando apenas ruídos e diferenças de fases causadas por essa variação na quantidade de *frames*, não sendo resultados satisfatórios ou conclusivos para a pesquisa.

Após esses resultados, a etapa antes da bloqueagem foi desconsiderada, já que o problema iria se repetir já que, como mencionado anteriormente, o *throughput* nessa fase seria maior do que nas demais etapas. Em seguida, foram comparadas duas fases localizadas na etapa de bloqueagem, buscando identificar se seria possível haver uma variação durante o próprio intervalo:

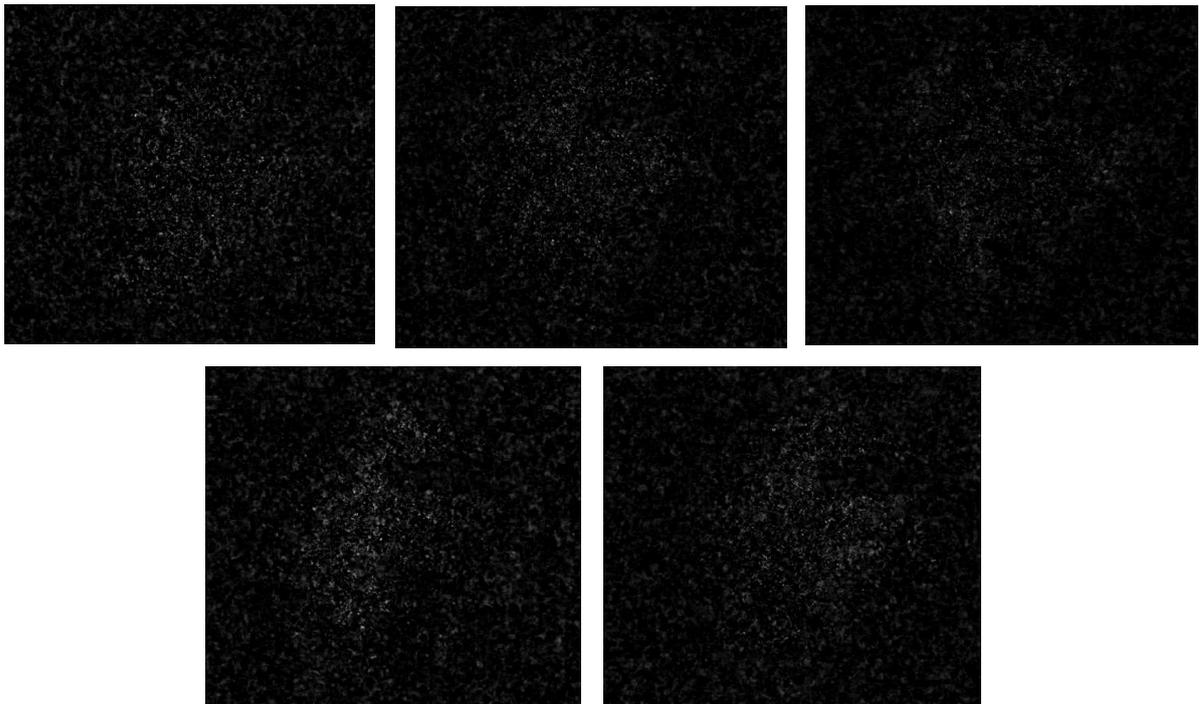
Figura 24 – Resultados da comparação de duas fases equivalentes durante a bloqueagem.



Fonte: Autor.

Como podemos observar, nenhuma alteração foi encontrada, então o mesmo procedimento foi realizado novamente dessa vez para a etapa depois da bloqueagem, comparando duas fases da mesma etapa:

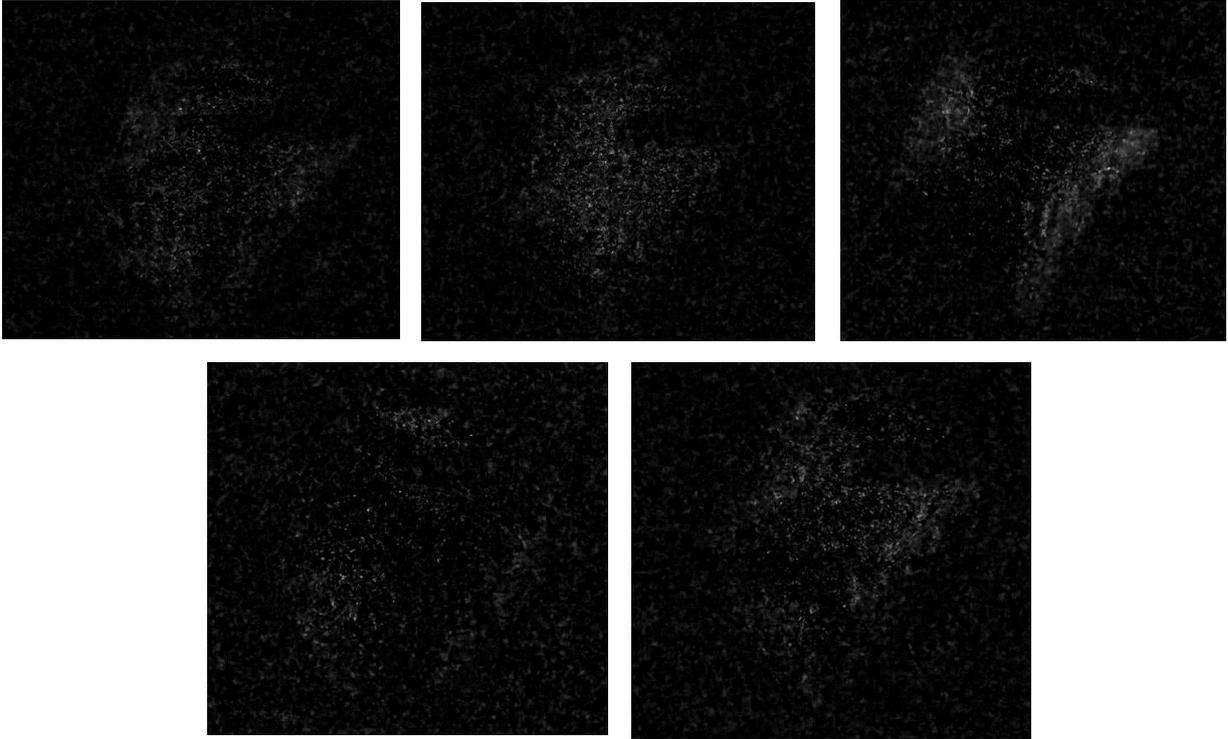
Figura 25 – Resultados da comparação de duas fases equivalentes depois da blocagem.



Fonte: Autor.

Assim como na etapa anterior, não é possível notar nenhuma variação, apenas alguns ruídos provenientes principalmente do próprio laser. Então, foram comparadas as fases localizadas durante e depois da blocagem:

Figura 26 – Resultados da comparação de fases equivalentes entre a etapa depois durante a blocagem.



Fonte: Autor.

Novamente, não é possível visualizar interferências que possam nos indicar o momento de blocagem, assim como nas imagens anteriores é possível visualizar apenas ruídos e pequenas diferenças de fase entre as franjas, causadas principalmente pela variação do *throughput*. Apesar disso, o experimento serviu para, mais uma vez, destacar a validade de se utilizar métodos de interferência de luz para a análise do *throughput* de um sistema de vácuo, já que desde o princípio foi possível relacionar a velocidade de variação do padrão de franjas com este.

Como mencionado anteriormente, foram feitos experimentos utilizando o interferômetro de Michelson, para este interferômetro a variação do índice de refração do ar local em relação ao ar do entorno do efeito de blocagem é [9]:

$$\Delta n = \Delta m \cdot \frac{\lambda}{2a} \quad (24)$$

onde Δm é o número de franjas deslocadas, λ é o comprimento de onda da fonte luminosa (o laser) e a o comprimento da cavidade percorrida pelo feixe. Podemos definir, de forma cautelosa, o $\Delta m_{\min} = 0,25$, já que foi visualizada uma variação de franjas entre uma franja clara passando para outra menos clara, mas com uma variação perceptível, se esse valor fosse de 0,50 por exemplo, a franja passaria de uma franja completamente clara, para outra completamente escura, onde a mudança seria claramente notável. Como mencionado anteriormente, a seria o comprimento da cavidade, que na câmara de vácuo era de aproximadamente 112 mm e λ seria de 650 nm. Pode-se então se estimar a mínima variação do índice de refração acumulada ao longo todo o caminho do laser como sendo:

$$\Delta n_{\min} = 0,25 \cdot \frac{650 \times 10^{-9}}{2 \times 112 \times 10^{-3}} = 7,25 \times 10^{-7}$$

logo, a menor variação do índice de refração acumulada ao longo do interferômetro de Michelson é de $7,25 \times 10^{-7}$. Como o interferômetro de Fabry-Perot permite resoluções maiores, isso significa que Δn_{\min} do sistema que usamos é menor do que o valor estimado acima, logo, podemos gerar duas hipóteses:

- 1) O efeito de blocagem produz variações locais de índice de refração menores do que o valor estimado: $\Delta n_{\min} = 7,25 \times 10^{-7}$.
- 2) A distribuição espacial do efeito de blocagem pode ser tão pequena a ponto de o sistema óptico não ser capaz de identificar.

Possíveis soluções seriam: para 1) um interferômetro de Fabry-Perot com espelhos de maior refletividade, aumentando sua resolução e o uso de fontes de luz com menores comprimentos de onda, por exemplo com lasers azuis ou violetas, mais difíceis de serem encontrados para uso, ou a utilização de alguma outra técnica óptica mais sensível. Para 2) teríamos de utilizar um sistema de microscopia para ampliação da imagem apenas da saída do capilar e de suas adjacências bem próximas.

5 CONCLUSÃO E PLANOS FUTUROS

Analisando os resultados obtidos, conseguimos constatar que não foi possível definir com precisão o momento de blocagem a partir da interferência óptica, já que não foi visualizada nenhuma alteração no padrão de franjas que fosse considerável para podermos definir esse momento, possivelmente por conta da abordagem utilizada, onde a sensibilidade do método pode não ser suficiente para esse tipo de análise.

Apesar de não ser possível identificar a blocagem, foi mais uma vez comprovada a eficiência de se utilizar métodos ópticos para a análise de fluxo de gás, já que a partir deste era possível definir o *throughput* do sistema, apesar de não ser o objetivo deste trabalho. Vale realçar que as imagens obtidas como resultado para essa pesquisa eram várias, não sendo possível inserir todas neste trabalho, sendo assim, caso seja de interesse a alguém as analisar, é possível contatar os responsáveis para solicitação do arquivo completo de imagens.

Outro ponto que podemos realçar é que existem estudos de escoamentos utilizando outros métodos ópticos, como o *shadowgraph* e *schlieren*, que utiliza a deflexão da luz com relação a variação da densidade de um meio e é analisado a partir da imagem da sombra do escoamento. Este método traz esperança para possíveis resultados favoráveis à pesquisa, principalmente por já existirem resultados que mostram a análise de escoamentos supersônicos, onde poderemos estudar se essa mesma análise pode ser utilizada para escoamentos sônicos, como no caso da blocagem. A pesquisa será continuada utilizando o arranjo do sistema de vácuo apresentado no capítulo de metodologia, mais complexo, onde será possível realizar a análise tanto no escoamento de gases atmosféricos, quanto de nitrogênio, entre outros. O objetivo continuará o mesmo: a definição da blocagem através de métodos ópticos, que ao se mostrarem eficientes, podem trazer avanços para a tecnologia do vácuo, facilitando principalmente a caracterização dos equipamentos que compõem os sistemas de vácuo, trazendo avanços tecnológicos para a área.

6 BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Costa, H. L. Fragnito. Interferômetro de Michelson. UNICAMP – IFGW. Disponível na internet em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/laboptica/files/2013/01/michelson1.pdf>>. Acesso em: 7 de abril de 2021.
- [2] ANDERSON, John. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica: Introdução ao Voo. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- [3] BARBOSA, Eduardo. Análise de misturas gasosas por refratometria. Centro Universitário FEI – Instituto de Física.
- [4] CERQUEIRA, Rafael Garcia., Medição e Análise Detalhada da Brocagem de Gás (Choked Flow of Gases) por meio da Dependência do Índice de Refração da Luz em Função da Pressão. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – Curso de MPCE. Orientadores: Eduardo Acedo Barbosa e Francisco Tadeu Degasperi. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2016. Referência básica para a continuidade desta Iniciação Científica e Tecnológica Proposta.
- [5] C. Borgnakke, R. E. Sonntag. Fundamentos da Termodinâmica. 8ª Edição. Editora Blucher, 2013.
- [6] DEGASPERI, F.T., Contribuições para a Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2006.
- [7] DEGASPERI, F.T., Modelagem e Análise Detalhadas de Sistemas de Vácuo. Tese de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2002.
- [8] E. A Barbosa, R Verzini, J. F. Carvalho, Opt. Comm. 263, (2006) 189.
- [9] E. A. Barbosa, Interferência, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, comunicação interna, 2015, https://e207aa94-f722-44d8-bb5f-1acecec7635b.filesusr.com/ugd/a3b624_62f6418b0cc24af5b725e6f3cda22360.pdf
- [10] F. T. Degasperi, A. Nardi, J. Elisondo, I. C. Nascimento. Introdução aos princípios físicos para a modelagem e procedimentos experimentais da injeção controlada de gases em sistemas de vácuo.
- [11] GOUVÊA, Miriam Tvrzská. escoamento Compressível e Incompressível. Disponível na Internet em: <http://meusite.mackenzie.com.br/miriamtg/portfolio_FT_I/portfolio_compr_cavita.pdf>.3 de março de 2021.

[12] GUSHIKEN, Natália Kazumi. Determinação experimental da velocidade de bombeamento em vácuo pelo método de escoamento em bloqueio de gases. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – Curso de MPCE. Orientador: Francisco Tadeu Degasperri. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2015.

[13] H. Onusic, N. H. Medina, R. A. Douglas. Escoamento de gases. Instituto de Física - Universidade de São Paulo. Disponível na internet em: < <https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/EscoamentoGases2017.pdf>>. Acesso em: 31 de março de 2021.

[14] Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP). Laboratório Avançado de física: Interferômetro de Fabry-Perot. Disponível na internet em: < http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApFabryPerot/FabryPerot_1.pdf>. Acesso em: 13 de junho de 2021.

[15] J. A. Maroto, J. de Dios, F. J. de las Nieves. *Utilización de un frasco de Mariotte para el estudio experimental de la transición de régimen laminar a turbulento*. Revista Española de Física, Vol-13, nº 5, págs 42-47.

[16] KIKOIN, A.K., KIKOIN, I.K., Física Molecular, 2ª Edição Revisada, 1979. Editorial MIR.

[17] LAFFERTY, J.M. , Foundations of Vacuum Science and Technology, 1998. John Wiley & Sons, Inc.

[18] M. Born, E. Wolf, “Principles of Optics”, Pergamon Press, 1988.

[19] M.A. Aegerter, M. Siu Li, A. R. Zanatta. Interferômetro de Michelson. Instituto de Física de São Carlos. Disponível na Internet em: <http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApMichelson/Michelson_1.pdf>. Acesso em: 7 de abril de 2021.

[20] MORAES, Elisângela. “Gases Reais”; Universidade de São Paulo. Disponível na Internet em: < <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817045/432/GasesReais.pdf>>. 3 de março de 2021.

[21] NIECKELE, Angela. Escoamento Compressível. Disponível na Internet em: <http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Grad_Eng1707/10-MecanicaFluidosII-IntroducaoCompressivel.pdf>. 3 de março de 2021.

[22] Notas de aula das disciplinas de óptica física do Professor Eduardo Acedo Barbosa e de tecnologia do vácuo do Professor Francisco Tadeu Degasperi.

[23] T. F. Ricci, F. Ostermann, S. D. Prado. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. 2006. Disponível na internet em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/116986/000595050.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 de junho de 2021.

[24] SANTOS, Johnes Soares. Modelagem e medição de condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar com gases diatômicos e poliatômicos bloqueados. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – Curso de MPCE. Orientador: Francisco Tadeu Degasperi. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2013.

[25] Tabor. Gases, Liquids and Solids and the other states of matter, Cambridge Press.

[26] TEIXEIRA, Bianca Almeida. Modelagem de escoamentos compressíveis: estratégias para melhorar a convergência. 2017. Disponível na internet em: <<https://www.esss.co/blog/modelagem-de-escoamentos-compressiveis-estrategias-para-melhorar-a-convergencia/>>. Acesso em: 11 de junho de 2021.

[27] Universidad de Sevilla; Departamento de física aplicada III. Número de Mach. Disponível na Internet em: <http://laplace.us.es/wiki/index.php/Número_de_Mach>. 31 de março de 2021.

[28] USP E-disciplinas. Interferência Óptica. Disponível na Internet em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/687317/mod_resource/content/1/Interferência%20óptica.pdf>. Acesso em: 3 de março de 2021.

[29] VENUTO, Edelson da Silva Procópio. Modelagem e medição de condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar com gases monoatômicos bloqueados. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – Curso de MPCE. Orientador: Francisco Tadeu Degasperi. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2013.

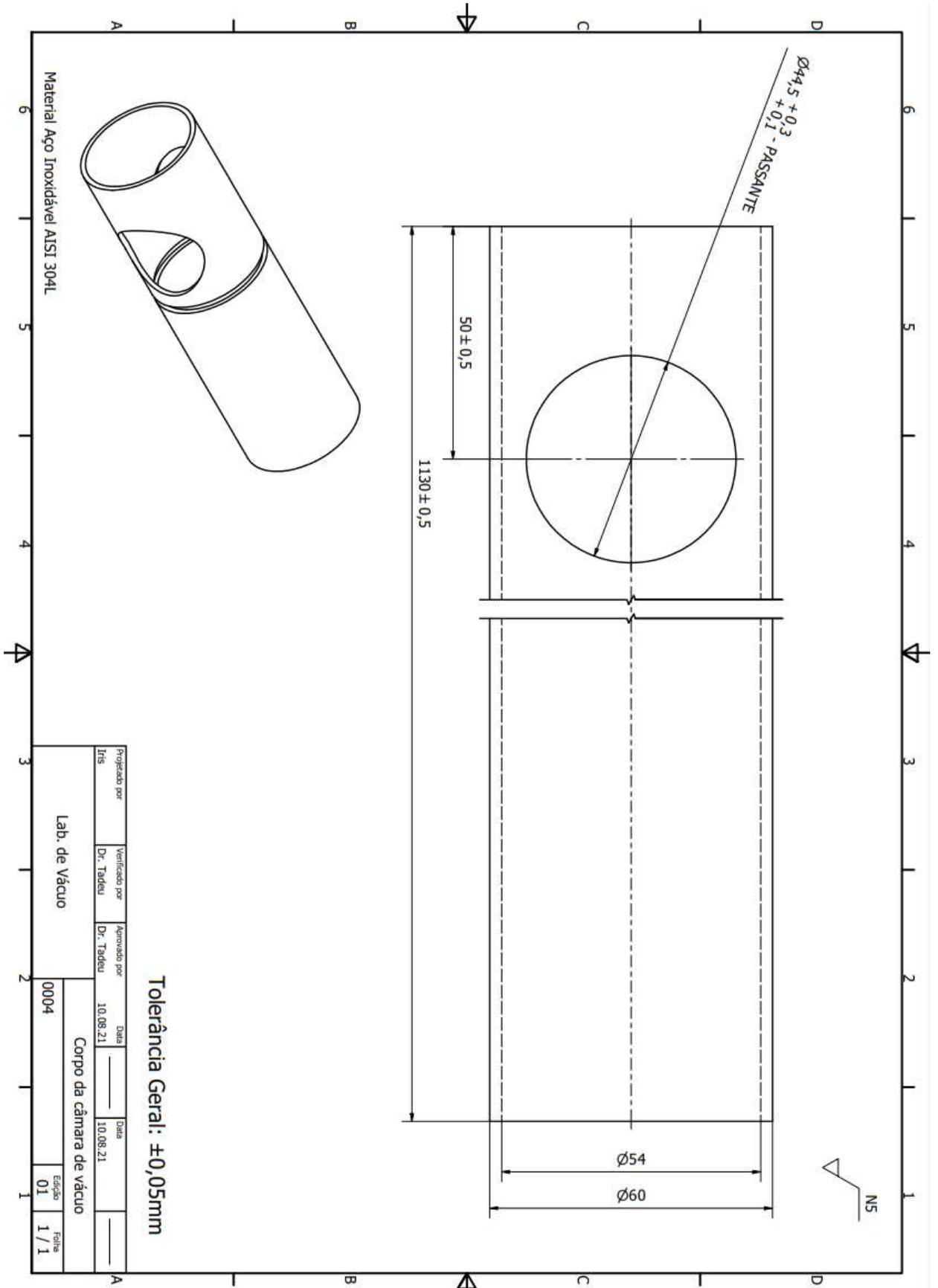
[30] WALTON, A.J., Three Phases of Matter, 2ª Edição, 1983. Oxford University Press.

7 APÊNDICE

Apêndice A – Desenhos técnicos da câmara de vácuo

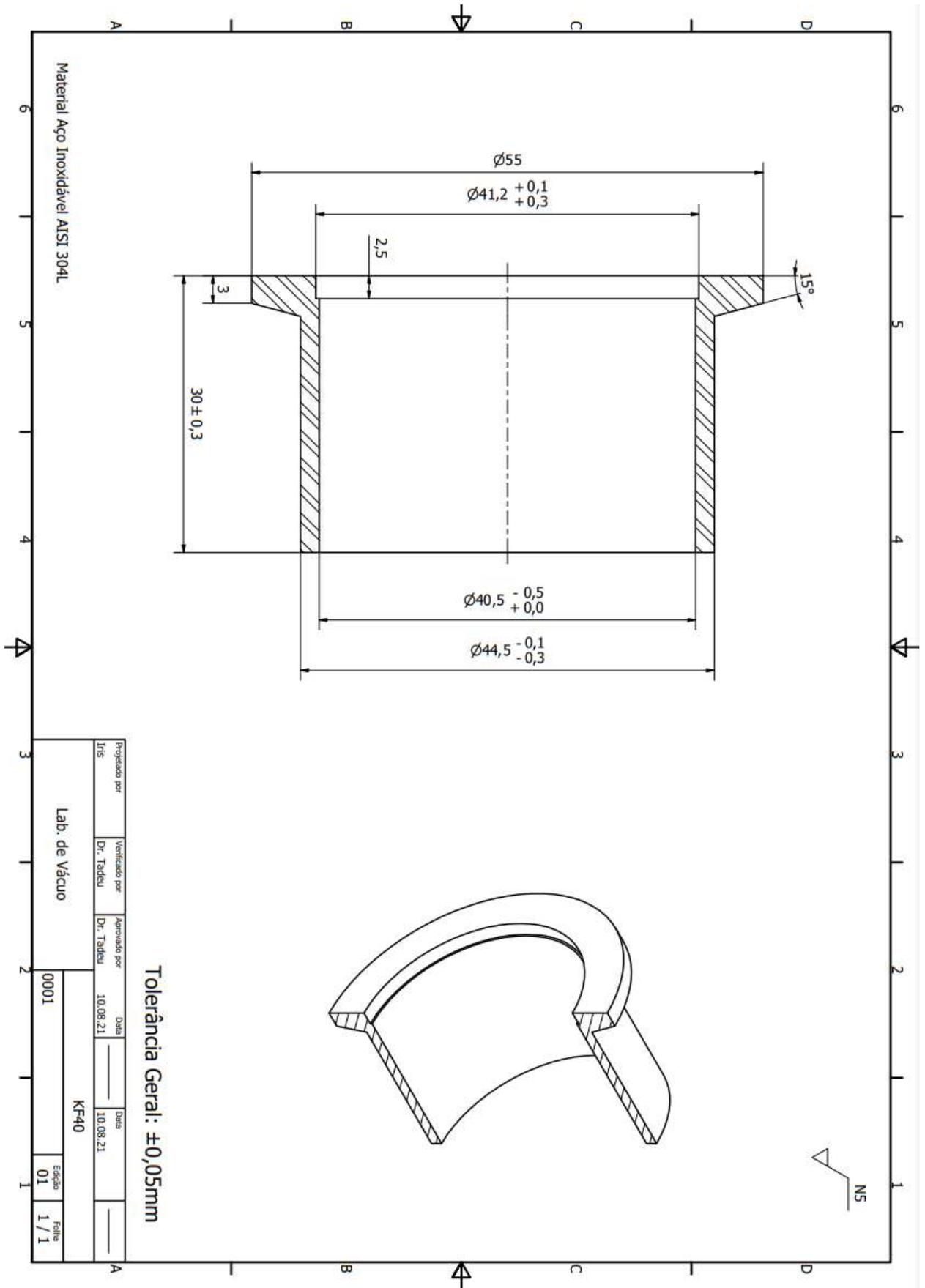
A seguir, as medidas utilizadas para a fabricação dos corpo da câmara de vácuo, das tampas KF40 utilizadas para suportar os visores e dos flanges: K10, KF25 e KF40. Além disso, também é apresentado a montagem da câmara de vácuo.

Figura 27 – Desenho técnico do corpo da câmara de vácuo



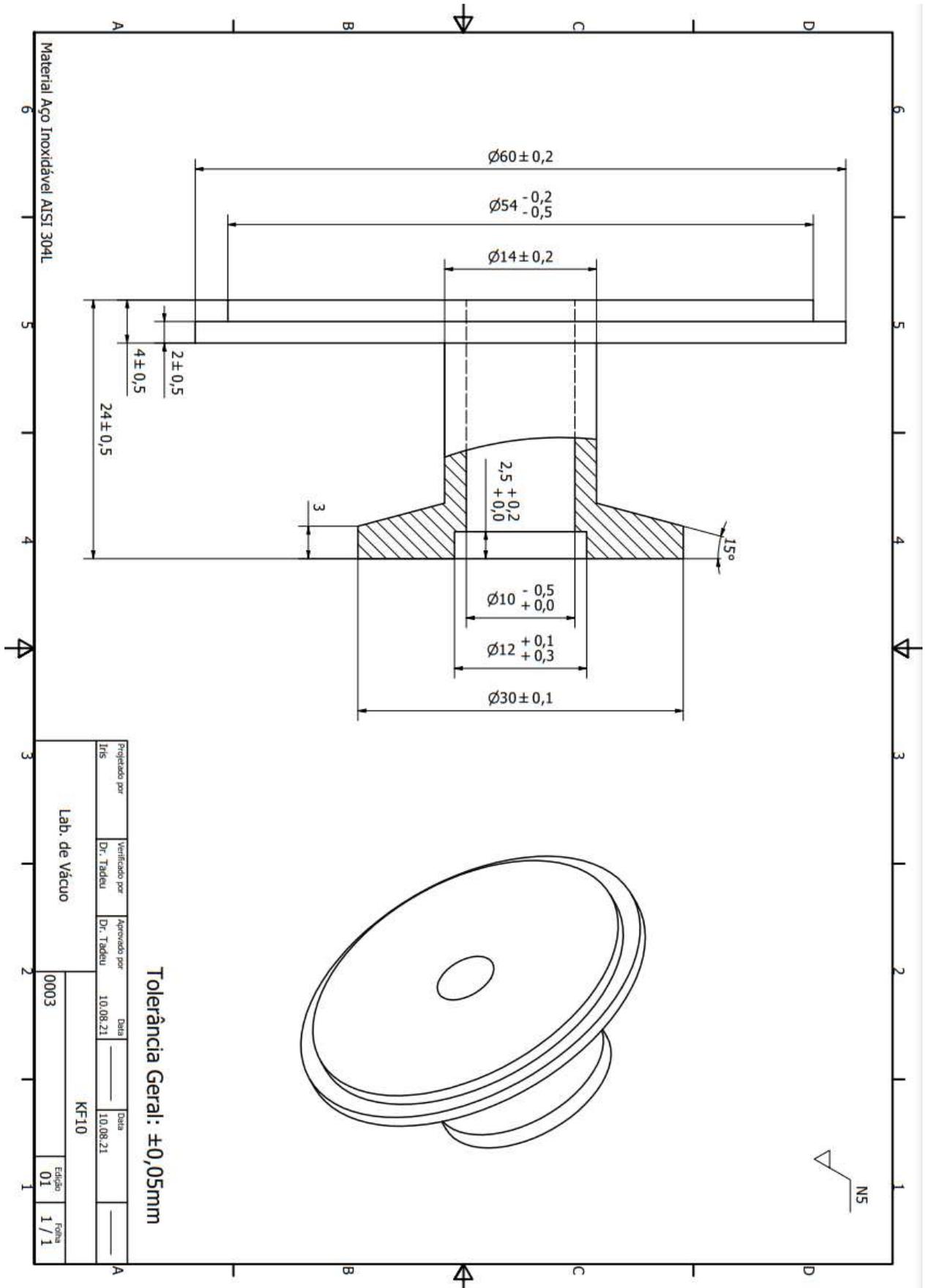
Fonte: Autor.

Figura 28 – Desenho técnico do flange KF40



Fonte: Autor.

Figura 29 – Desenho técnico do flange KF10



Fonte: Autor.

Figura 30 – Desenho técnico do flange KF25

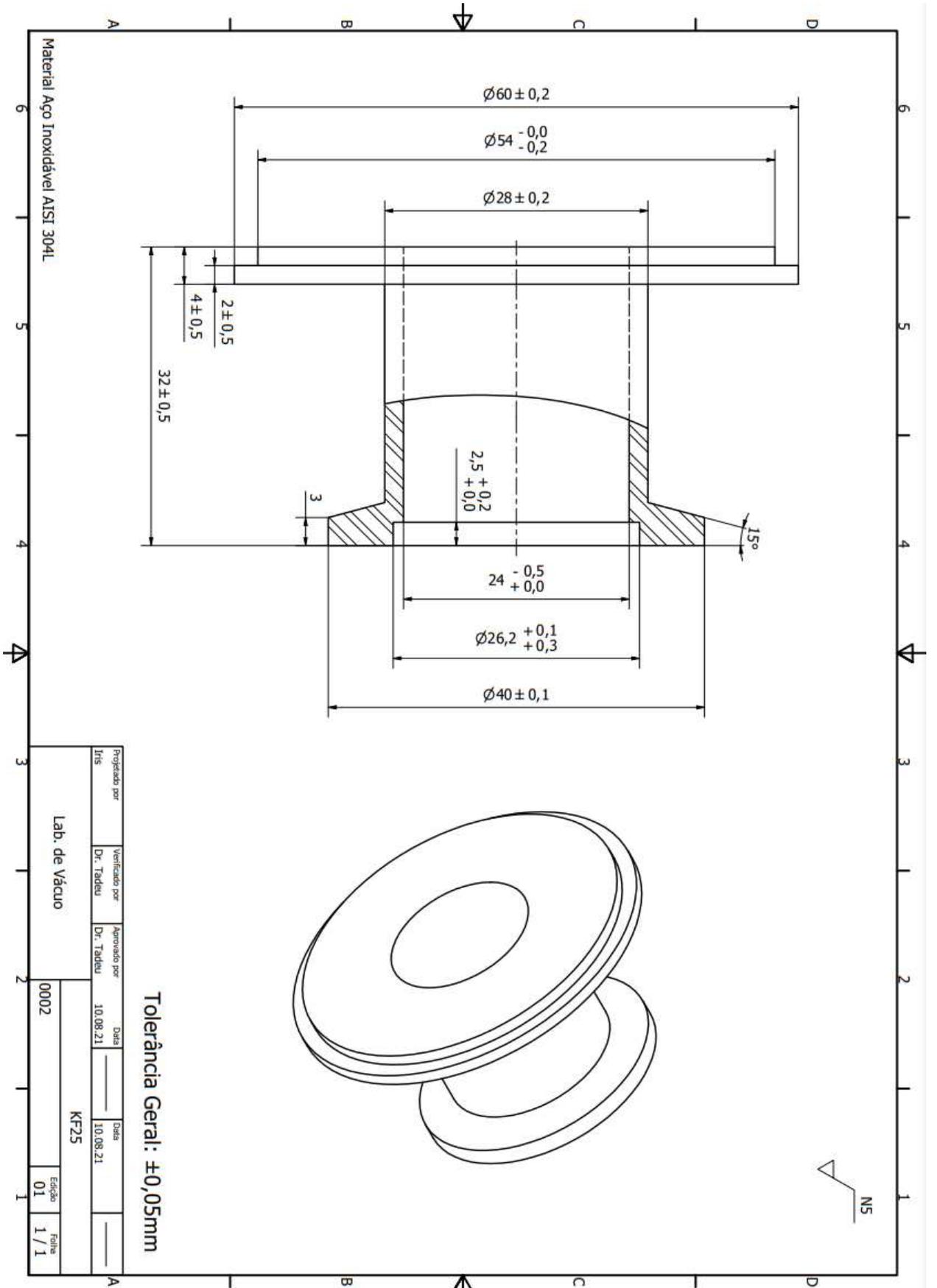
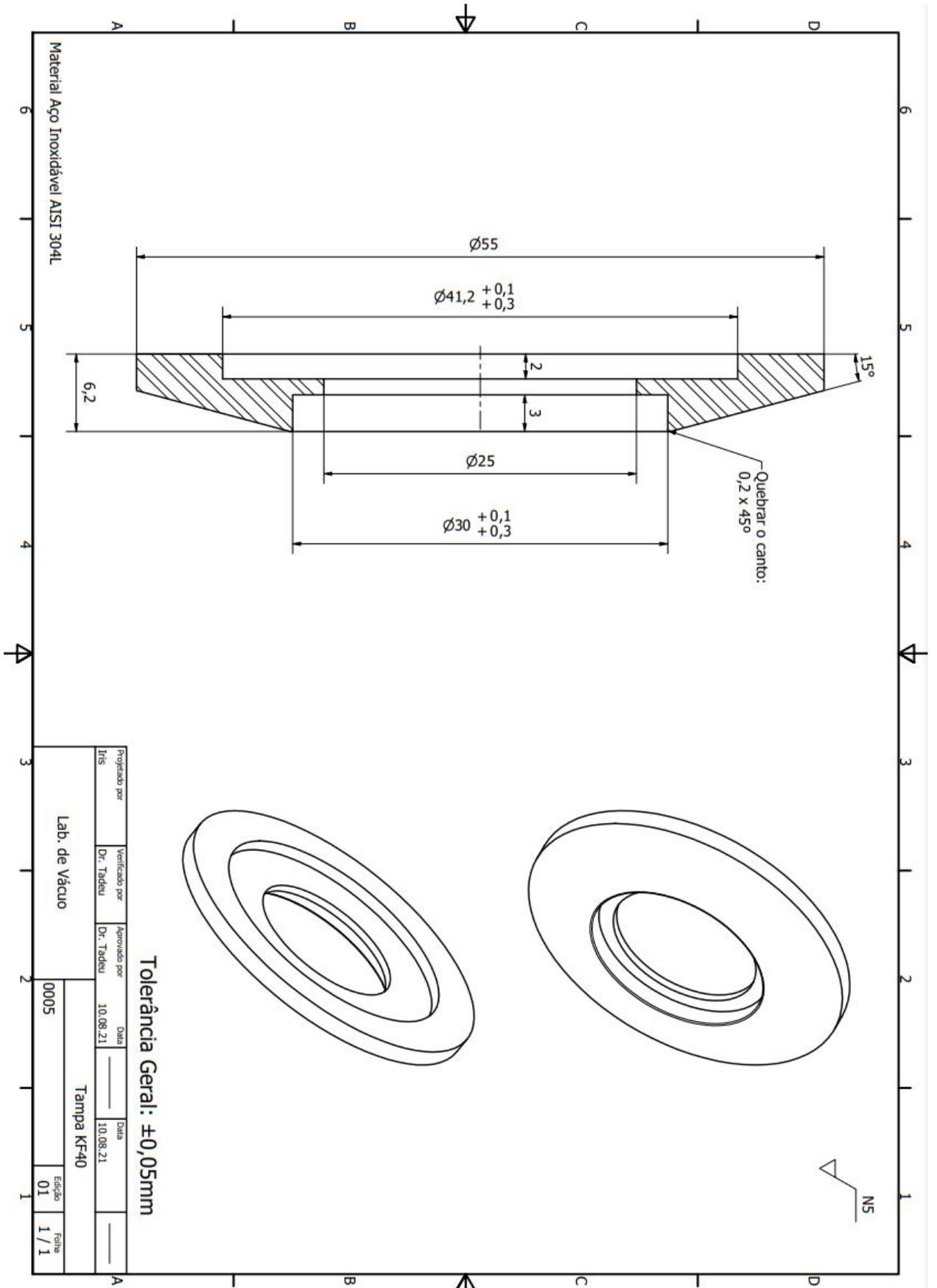
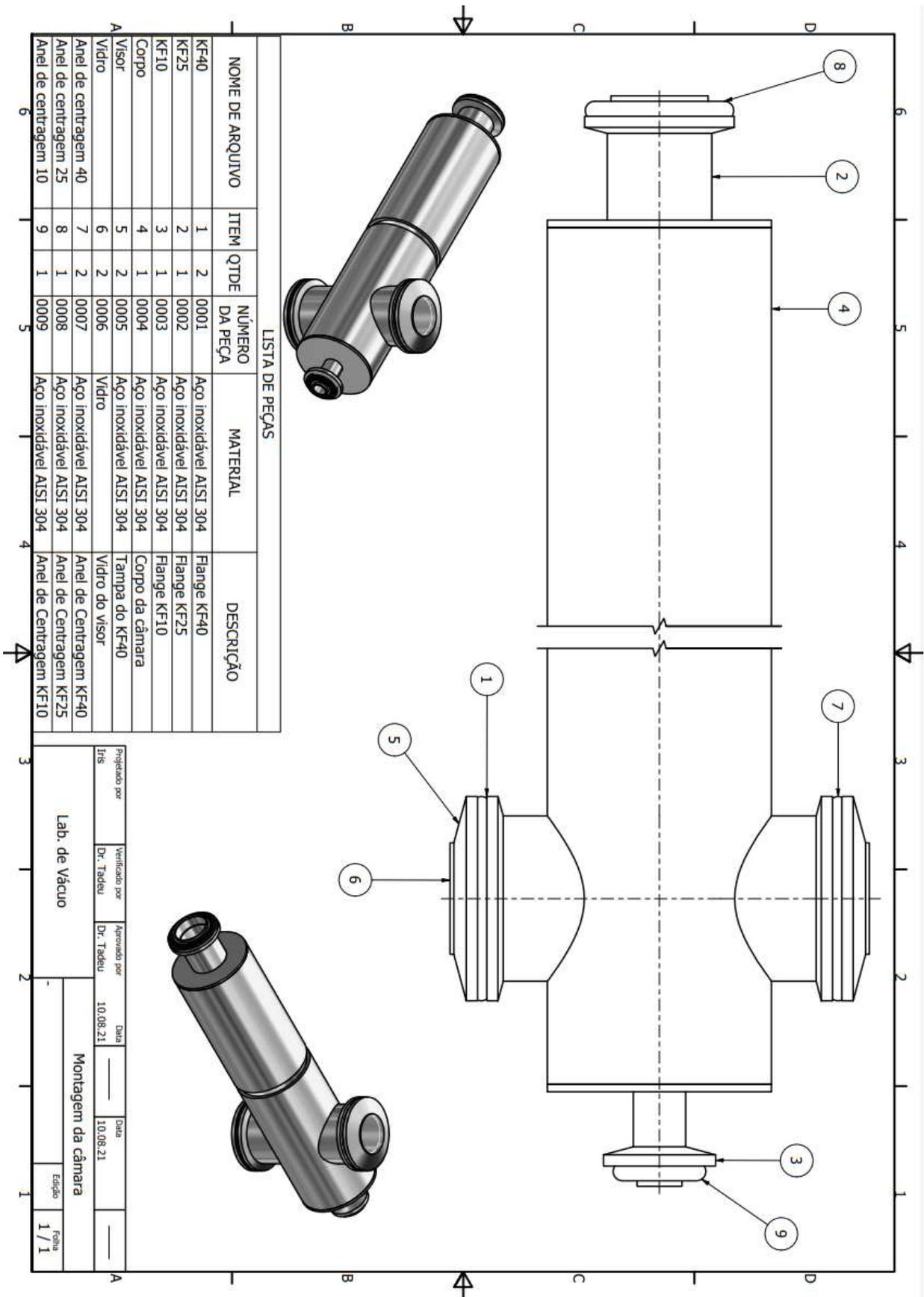


Figura 31 – Desenho técnico da tampa de KF40



Fonte: Autor.

Figura 32 – Montagem da câmara de vácuo



Projetado por: _____
 Verificado por: Dr. Tadeu
 Aprovado por: Dr. Tadeu
 Data: 10.08.21
 Data: 10.08.21
Lab. de Vácuo
Montagem da câmara
 Edição: _____
 Folha: 1 / 1

Apêndice B – Artigos Publicados Durante a Graduação

Artigos apresentados durante a graduação no curso de Microeletrônica:

1º) Artigo apresentado ao 23º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT 2021), cujo tema do trabalho foi “MODELAGEM COM PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ÓPTICOS DO EFEITO DE BLOCAGEM DE GASES”;

2º) Artigo apresentado ao XLII CBrAVIC (2021), cujo tema foi “MODELING WITH OPTICAL EXPERIMENTAL PROCEDURES OF THE CHOKED FLOW EFFECT IN VACUUM SYSTEMS”.

1º) Artigo SICT 2021

MODELAGEM COM PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ÓPTICOS DO EFEITO DE BLOCAGEM DE GASES

Iris del Carmen Claudino Flores¹, Eduardo Acedo Barbosa², Francisco Tadeu Degasper³

^{1, 2, 3} Faculdade de Tecnologia de São Paulo

irisflores746@gmail.com; ftd@fatecsp.br; ebarbosa@fatecsp.br

1. Introdução

O índice de refração é muito utilizado para análises de resultados já que é um parâmetro óptico básico dos materiais e de grande precisão, por isso é de extrema importância em várias áreas da ciência e tecnologia, principalmente por seu caráter não interferente. O índice de refração de um gás é dependente da sua densidade, com isso é possível medir a pressão do gás através deste parâmetro. [1]. Sendo assim, o atual projeto tem como objetivo estudar experimentalmente a variação do índice de refração da luz que interage em um gás pela variação de pressão (variação da densidade do gás) em uma câmara de vácuo, buscando determinar com precisão o ponto de bloqueio (*choked flow*) de um gás, ou então, quando o *throughput* (taxa de transferência de um gás no processo de escoamento) deixa de ser constante, podendo ser útil na calibração de equipamentos que compõem os sistemas de vácuo.

2. Proposta de Projeto

O experimento consistirá em uma análise óptica dos gases que passarão pela câmara de vácuo, sendo este método baseado na interferência de luz, o interferômetro a ser construído deverá ser sensível ao índice de refração do gás (Figura 1), onde inicialmente utilizaremos um interferômetro de Michelson, podendo este ser futuramente substituído por outro. Então, será estabelecida uma relação experimental entre índice de refração de um gás e a sua pressão, que serão posteriormente comparados com expressões teóricas.

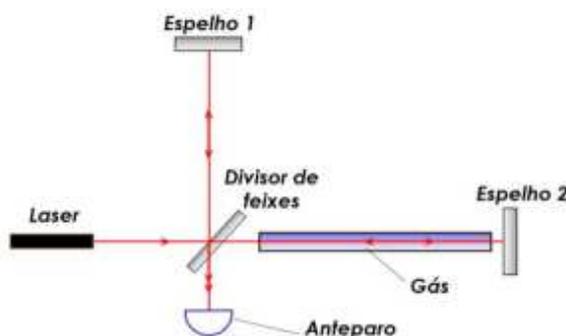


Figura 1 – Arranjo óptico. [1]

Durante a realização do experimento será analisado o padrão de franjas apresentado no anteparo do arranjo óptico, a partir deste buscaremos um momento no qual o padrão de franjas se altera indicando o início do escoamento bloqueado do gás, ou seja, onde há uma variação específica de seu índice de refração.

A câmara de vácuo a ser construída será feita de aço inoxidável AISI 304L e contará com dois visores nas

laterais por onde será feita a passagem do feixe de luz do interferômetro, como mostrado na figura 2, que apresenta o arranjo do sistema de vácuo:

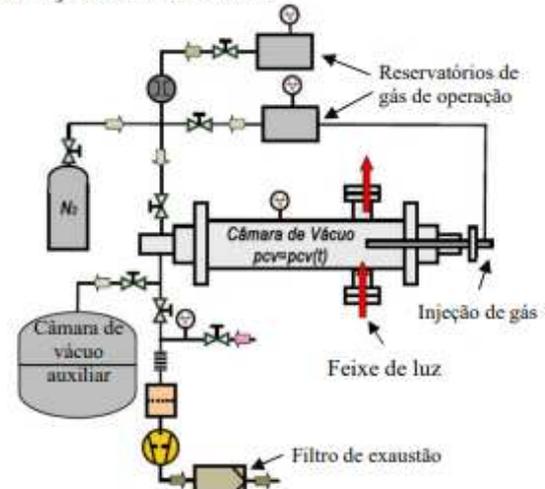


Figura 2 – Arranjo do sistema de vácuo.

3. Resultados Esperados

Espera-se a obtenção de uma variação significativa no padrão de franjas no anteparo, podemos então determinar com precisão o momento que o escoamento se torna bloqueado sendo útil posteriormente para a calibração de sistemas de vácuo. O arranjo experimental e os dados obtidos também serão posteriormente utilizados para modelagens matemáticas para condutâncias no sistema de vácuo para diferentes seções transversais de um tubo.

4. Conclusões

Os resultados ao se mostrarem eficientes poderão trazer avanços para a tecnologia do vácuo, tornando mais fácil a elaboração de sistemas de vácuo, além de aprofundar os estudos existentes sobre o comportamento dos gases em um processo de escoamento, servindo como um aprofundamento do estudo do efeito de bloqueio, já que este é um tema muito vasto e de muita importância principalmente para as áreas que englobam a mecânica dos fluidos.

5. Referências

[1] R. G. Cerqueira, Medição e Análise Detalhada da Blocação de Gás por Meio da Dependência do Índice de Refração em Função da Pressão. 2016. 41 f. TCC – Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos. FATEC-SP, 2016.

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa PIBIC.

¹ Aluna bolsista de IC, PIBIC-CNPq

2º) Artigo CBrAVIC 2021

XLII CBrAVIC –Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, December 01-03, 2021

MODELING WITH OPTICAL EXPERIMENTAL PROCEDURES OF THE CHOKED FLOW EFFECT IN VACUUM SYSTEMSIris del Carmen Claudino Flores¹, Eduardo Acedo Barbosa², Francisco Tadeu Degasper³
^{1, 2, 3} Faculdade de Tecnologia de São Paulo**1. Introduction**

The refractive index is widely used for analysis of results since it is a basic optical parameter of materials and has great precision, so it is extremely important in several areas of science and technology, mainly due to its non-interfering character. The refractive index of a gas is dependent on its density, so it is possible to measure the pressure of the gas using this parameter [1]. Thus, the current project aims to experimentally study the variation in the refractive index of light that interacts in a gas by the pressure variation (variation of gas density) in a vacuum chamber, seeking to accurately determine the start of the choked flow effect in a gas, or when the throughput is no longer constant, which can be useful in the calibration of equipment that make up vacuum systems.

2. Experimental

The experiment will consist of an optical analysis of the gases that will pass through the vacuum chamber, this method being based on light interference, the interferometer to be built should be sensitive to the refraction index of the gas (Fig. 1), where initially we will use an Michelson interferometer. Then, an experimental relation between the refractive index of a gas and its pressure will be established, which will be later compared with theoretical expressions. During the experiment, the fringes pattern presented in the bulkhead and its variations will be analyzed. The vacuum chamber to be built will be made of AISI 304L stainless steel and will have two visors on the sides through which the interferometer light beam will pass, as shown in figure 2.

3. Results and Discussions

It is expected to obtain a significant variation in the fringe pattern on the bulkhead, we can then accurately determine the moment when the throughput is no longer constant, being useful later for the calibration of vacuum systems. The experimental arrangement and the data obtained will also be later used for mathematical modeling for conductance in the vacuum system for different cross-sections of a tube, which, when shown to be effective, can bring advances to vacuum technology, serving as a further development of existing studies on the behavior of gases in a flow process, mainly in relation to the choked flow effect, a vast topic and of great importance mainly for areas that include fluid mechanics.

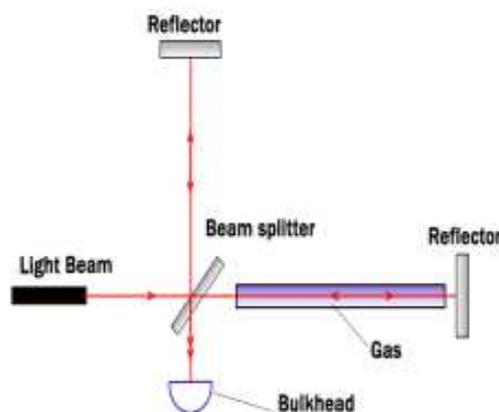


Fig. 1. Optical System Arrangement

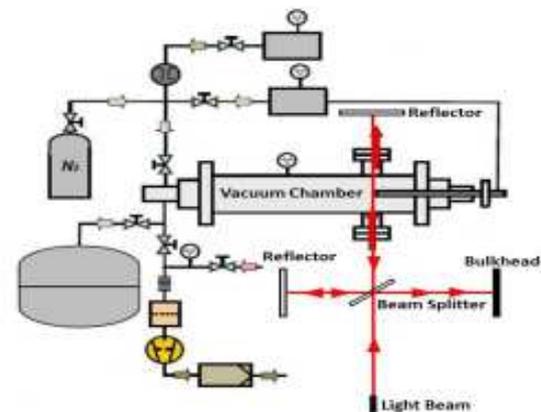


Fig. 2. Optical and Vacuum Systems Arrangement.

4. References

[1] R. G. Cerqueira, *Medição e Análise Detalhada da Blocação de Gás[...]*. 2016. 41 f. TCC – Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos. FATEC-SP, 2016.

Acknowledgments

To my teachers and my family for their support and to CNPq for the PIBIC scholarship.
Irisflores746@gmail.com