

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP**  
**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS – DSE**

TIAGO LO SCHIAVO BRAGLIA

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE GÁS COM A  
TECNOLOGIA DO VÁCUO E A MECÂNICA DOS FLUIDOS

São Paulo

2022

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP**  
**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS – DSE**

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE GÁS COM A  
TECNOLOGIA DO VÁCUO E A MECÂNICA DOS FLUIDOS**

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-sp) para obtenção do título de Tecnólogo em Microeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo

2022

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, em especial, à minha mãe, por me fornecer todo o suporte emocional e pela confiança nas minhas capacidades.

Gostaria de agradecer, também, imensamente ao professor Francisco Tadeu Degasperi, por sua incrível personalidade, pela sua compreensão, pelo incentivo ao desenvolvimento científico e de pesquisa e pelo apoio nos momentos de dificuldade.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa de iniciação científica concebida.

## Resumo

Este trabalho objetivou correlacionar a Tecnologia do Vácuo (campo que estuda as partículas suspensas no ambiente) com a Mecânica dos Fluidos (campo que estuda o comportamento tanto estático quanto dinâmico dos fluidos existentes) por meio das grandezas *throughput* e *vazão*. Inicialmente, foi abordado o surgimento, debate e validação do conceito de vácuo a partir da contextualização histórica desse tema. A seguir, foram detalhados cada uma das grandezas e cada um dos princípios fundamentais de cada uma dessas áreas de estudo. No caso da Tecnologia do Vácuo, foram abordadas também algumas das instrumentações comumente utilizadas.

Após esse detalhamento, foram realizadas duas modelagens de um mesmo sistema de vácuo. A primeira foi feita com base nos métodos de modelagem da Tecnologia do Vácuo e a outra, a partir dos métodos de modelagem da Mecânica dos Fluidos. Esses modelamentos permitiram realizar diversos tipos de correlação entre ambos os campos do conhecimento e determinar um modelo de validação empírica dessa correlação, o que trouxe algo completamente novo para o campo da Tecnologia do Vácuo. Esse modelo experimental permitiu que fosse possível realizar a mensuração da velocidade de bombeamento de uma bomba de pré-vácuo a partir da velocidade de escoamento do fluido gasoso utilizado no sistema, no caso, do ar atmosférico. A mensuração foi feita por meio do dispositivo denominado anemômetro digital MDA-20, fabricado pela empresa Minipa. Os flanges do arranjo experimental foram produzidos com utilização da tecnologia de impressão 3-D.

Neste trabalho, de forma resumida, foi realizada a correlação entre as duas áreas do conhecimento tanto por meio da manipulação algébrica das grandezas de cada uma delas quanto pela criação e validação do modelo de determinação da velocidade de bombeamento da bomba de pré-vácuo por um método novo.

A partir deste trabalho, foi possível identificar novas oportunidades de pesquisa que abrangem diversos campos, tais como: o setor de ensino, através da utilização de um gás colorido no experimento, o setor de pesquisa/indústria, pela elaboração de um equipamento de medição próprio para a Tecnologia do Vácuo (baseado no princípio de funcionamento do modelo criado), além dos outros campos abordados na seção de “Resultados e Conclusões” deste documento.

**Palavras-chave:** Mecânica dos Fluidos, Tecnologia do vácuo, *throughput*.

## **Abstract**

This work aimed to correlate Vacuum Technology (a field that studies particles suspended in the environment) with Fluid Mechanics (a field that studies both the static and dynamic behavior of existing fluids) through throughput and flow rates. Initially, was addressed the emergence, debate, and validation of the concept of vacuum from the historical contextualization of this theme. Next, were detailed in each of the magnitudes and each of the fundamental principles of each of these areas of study. In the case of Vacuum Technology, some of the commonly used instruments were also discussed.

After this detailing, two models of the same vacuum system were performed. The first was based on Vacuum Technology modeling methods and the other was based on Fluid Mechanics modeling methods. These models made it possible to carry out different types of correlation between both fields of knowledge and to determine an empirical validation model for this correlation, what was bring something completely new to the field of Vacuum Technology. This experimental model made it possible to measure the pumping speed of a pre-vacuum pump based on the flow speed of the gaseous fluid used in the system, in this case, atmospheric air. The measurement was performed using a device called the MDA-20 digital anemometer, manufactured by Minipa's company. The experimental arrangement flanges were produced using 3-D printing technology.

In this work, in short, was carried out the correlation between the two areas of knowledge both through the algebraic manipulation of the magnitudes of each of them and through the creation and validation of the model for determining the pumping speed of the pre-vacuum pump by a new method.

From this work, it was possible to identify new research opportunities that cover several fields, such as: the education sector, through the use of a colored gas in the experiment, the research/industry sector, by the elaboration of its own measuring equipment for Vacuum Technology (based on the working principle of the model created), in addition to the other fields addressed in the "Results and Conclusions" section of this document.

**Keywords:** Fluid Mechanics, Vacuum Technology, *throughput*.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 - Barômetro de Torricelli .....	14
Figura 2 - Fotografia do monte Puy-de-Dôme .....	16
Figura 3 - Ilustração do experimento realizado por Otto Von Guericke na tentativa de rompimento do vácuo criado, com o auxílio de dezesseis cavalos .....	18
Figura 4 - Diagrama esquemático do arranjo experimental .....	19
Figura 5 - Tipos básicos de estados físicos da matéria .....	20
Figura 6 - Princípio de Arquimedes .....	26
Figura 7 - Exemplo para dedução e validação, por meio das Leis de Newton, do Teorema de Stevin .....	26
Figura 8 - Lei de Pascal atuando em um frasco de vidro .....	27
Figura 9 - Exemplo para explicação do funcionamento da prensa hidráulica .....	28
Figura 10 - Representação do escoamento de um fluido qualquer .....	29
Figura 11 - Ilustração da definição da linha e do tubo de corrente .....	30
Figura 12 - Regime de escoamento do tipo laminar .....	31
Figura 13 - Regime de escoamento do tipo transitório .....	31
Figura 14 - Regime de escoamento do tipo turbulento .....	32
Figura 15 - Exemplo de tubo cônico para a análise do princípio de continuidade .....	33
Figura 16 - Representação das colisões e do livre caminho médio de uma molécula .....	36
Figura 17 - Regimes de escoamento existentes .....	37
Figura 18 - Exemplo de condutâncias em série .....	39
Figura 19 - Exemplo de condutâncias em paralelo .....	39
Figura 20 - Divisão geral dos medidores de pressão .....	44
Figura 21 - Medidores e suas diferentes faixas de operação .....	45
Figura 22 - Medidor Bourbon .....	46
Figura 23 - Medidor de membrana capacitiva .....	46
Figura 24 - Vacuômetro Pirani .....	47
Figura 25 - Circuito eletrônico da Ponte de Wheatstone utilizada na medição da variação da resistência do filamento do medidor Pirani .....	48
Figura 26 - Divisão das bombas de vácuo pelos seus princípios de funcionamento ....	49
Figura 27 - Classificação das bombas de vácuo em relação as suas faixas de pressão de operação .....	50

Figura 28 - Perspectiva em corte transversal de uma bomba mecânica de palhetas (a) e uma bomba de pistão rotatório (b) .....	51
Figura 29 - Bomba mecânica de palhetas em vista explodida .....	51
Figura 30 - Funcionamento do processo de bombeamento de uma bomba mecânica de palhetas .....	52
Figura 31 - Representação do processo de bombeamento de uma bomba mecânica com (b) e sem (a) lastro de gás .....	54
Figura 32 - Bomba roots com vista em corte .....	55
Figura 33 - Mecanismo de funcionamento da bomba roots .....	55
Figura 34 - Ilustração de alguns tubos de acrílico .....	57
Figura 35 - Fotografia do flange de acomodação do anemômetro .....	57
Figura 36 - Fotografia do flange de acoplamento .....	58
Figura 37 - Fotografia do suporte mecânico dos tubos de acrílico .....	58
Figura 38 - Fotografia do fole metálico .....	59
Figura 39 - Exemplos de anéis de vedação do tipo O'rings .....	59
Figura 40 - Anemômetro digital Minipa MDA-20 .....	60
Figura 41 - Fotografia da bomba mecânica de palhetas selada a óleo utilizada nesse projeto .....	60
Figura 42 - Medidor de pressão de membrana capacitiva Brooks .....	61
Figura 43 - Sistema de vácuo modelado a partir da Tecnologia do Vácuo .....	62
Figura 44 - Sistema de vácuo modelado a partir da Mecânica dos Fluidos .....	62
Figura 45 - Representação do campo de velocidades de acordo com a equação de Poiseuille-Hagen .....	67
Figura 46 - Fotografias em perspectiva do arranjo experimental .....	76
Figura 47 - Fotografia do arranjo do protótipo de testes .....	77
Figura 48 - Fotografia do orifício da linha de bombeamento aberto .....	77
Figura 49 - Exemplo de tubos flexíveis .....	78
Figura 50 - Flange cego com o primeiro furo para a tomada de dados .....	78
Figura 51 - Catálogo de bombas seladas a óleo da fabricante Leybold Vacuum, ampliado .....	80

# Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>10</b>
1.1. Contextualização Histórica.....	10
1.1.1. A resposta.....	12
1.1.1.1. Barômetro de Torricelli .....	14
1.1.1.2. Pascal, a experiência decisiva e o nivelamento barométrico.....	15
1.1.1.3. A bomba de Von Guericke.....	17
<b>2. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>20</b>
2.1. Mecânica dos Fluidos .....	20
2.1.1. Tipos de Fluidos.....	20
2.1.2. Características dos Fluidos .....	21
2.1.3. Hidrostática .....	25
2.1.3.1. Princípio de Arquimedes .....	25
2.1.3.2. Teorema de Stevin .....	26
2.1.3.3. Lei de Pascal .....	27
2.1.4. Hidrodinâmica .....	29
2.1.4.1. Vazão .....	29
2.1.4.2. Campo de Velocidades .....	30
2.1.4.3. Linhas e Tubos de Corrente.....	30
2.1.4.4. Regimes de Escoamento .....	31
2.1.4.5. Equação da Continuidade.....	33
2.1.4.6. Teorema de Bernoulli.....	34
2.2. Tecnologia do Vácuo .....	34
2.2.1. Tipos e Escalas de Pressão .....	34
2.2.1.1. Pressão Atmosférica.....	34
2.2.1.2. Pressão Manométrica ou Relativa.....	35
2.2.1.3. Pressão Absoluta .....	35
2.2.2. Grandezas Fundamentais.....	36
2.2.3. Equação Geral dos Gases Perfeitos .....	42
2.2.4. Medidores de Pressão.....	43
2.2.4.1. Vacuômetro de Bourbon.....	45
2.2.4.2. Vacuômetro de Membrana Capacitiva .....	46
2.2.4.3. Medidor Pirani.....	47
2.2.5. Bombas de Vácuo.....	48
2.2.5.1. Bomba Mecânica de Palhetas .....	50
2.2.5.2. Bomba <i>Roots</i> .....	54

<b>3. Procedimento Experimental .....</b>	<b>57</b>
3.1. Materiais Utilizados.....	57
3.2. Instrumentação Utilizada .....	60
3.3. Métodos .....	61
3.3.1. Metodologia Teórica .....	61
3.3.2. Metodologia Empírica .....	75
3.3.2.1. Aquisição dos Dados Experimentais.....	76
<b>4. Resultados e Conclusões .....</b>	<b>79</b>
4.1. Protótipo de Testes .....	79
4.2. Linha de Bombeamento Aberta ao Ambiente .....	79
4.3. Linha de Bombeamento Conectada à Câmara de Vácuo .....	81
4.4. Método de Variação do Diâmetro do Orifício de Entrada .....	81
4.5. Conclusões Finais .....	83
<b>5. Referências .....</b>	<b>85</b>

## 1. Introdução

Com o avanço da história e do conhecimento, a humanidade vem cada vez mais evoluindo e aprimorando suas técnicas e tecnologias. Em decorrência disso, devido ao aumento da complexidade, a demanda para a realização de processos mais controlados e que garantam maior qualidade vem crescendo de maneira exponencial. No setor de eletrônica, por exemplo, um dos fatores fundamentais para a obtenção de produtos com qualidade elevada é a minimização de contaminantes, pois estes geram comportamentos não desejáveis como o mal funcionamento dos componentes eletrônicos.

Visando garantir uma confiabilidade e performance mais elevada dos produtos finais fabricados, é de importância fundamental que haja um controle dos contaminantes particulados suspensos no ambiente. A partir desse conceito, é explicitamente notável a necessidade do aprimoramento desse setor do conhecimento humano, a Tecnologia do Vácuo. Se não houvesse desenvolvimento nessa área, seria impossível atingir o patamar de desenvolvimento tecnológico como é conhecido atualmente e será, para futuras conquistas e descobertas, um fator limitante se não houver mais estudos referentes a esse setor da tecnologia.

A partir disso, a fim de “preparar o terreno” para as ideias que serão abordadas neste trabalho, abaixo serão apresentadas algumas das definições do conceito de vácuo e o processo histórico do surgimento e validação desse conceito.

### 1.1. Contextualização Histórica

De acordo com o dicionário da *Oxford Languages*, presente no Google, **vácuo** significa “absolutamente vazio, vaziez espacial”. Isso significa, simplificada, ausência de matéria em um determinado espaço/volume.

Ao longo dos séculos da existência humana, o conceito de vácuo foi sendo discutido e debatido das mais diversas maneiras. De forma mais minuciosa, ao analisar a história, é possível identificar o surgimento de uma primeira tentativa sistemática de se interpretar, de modo racional e lógico, os fenômenos físicos e naturais do universo. O surgimento dessa primeira tentativa se deu na Grécia Antiga por um filósofo grego da região de Eleia, Parmênides. Segundo ele, o universo era preenchido integralmente pela presença do *eon*, o “ser”, o que dá sentido de existência às coisas materiais, que, seguindo essa linha de raciocínio, faz com que a ideia de vácuo absoluto seja uma contradição lógica. Além de Parmênides, outros dois gregos relativamente contemporâneos a ele, Demócrito e seu mentor Leucipo, possuíam ideias muito diferentes a respeito do comportamento e dos mecanismos de funcionamento do universo. Bastante semelhante com as ideias modernas da Física atual, ambos pensadores propunham uma teoria baseada no conceito de átomos. Para eles, todo o universo seria composto por átomos que teriam existido desde sempre e teriam permanecido inalterados, diferenciando-se entre si somente por suas formas geométricas. Ainda dentro desse raciocínio, para Demócrito e Leucipo, esses átomos teriam se reunido e constituído a matéria por acaso. Entretanto, entre os átomos, com a matéria já formada, não haveria nada, existiria o vácuo propriamente dito (STEMPNIAK, 2002).

Neste ponto é importante e necessário destacar o quão impressionante, dada às limitações da época, a visão de ambos os pensadores a respeito do funcionamento do universo. Como já mencionado, a teoria atômica elaborada por esses dois filósofos gregos se assemelha muito com as ideias modernas atualmente aceitas. Apesar disso,

essa ideia não foi muito bem recebida por seus contemporâneos e por alguns dos pensadores subsequentes.

Um dos opositores e de maior relevância foi outro filósofo grego, Aristóteles. Baseado no comportamento de queda dos corpos, Aristóteles considerava a existência do vácuo algo ilógico. Na perspectiva dele, se a teoria de Demócrito e Leucipo estivesse correta, um corpo em queda livre atingiria velocidades infinitas. Já que esse não enfrentaria qualquer resistência, em relação ao seu movimento, provinda do meio em que esse corpo estaria inserido. Ainda, de acordo com Aristóteles e como, de certa forma, também é sabido atualmente, diferentes meios produzem diferentes intensidades de resistência no deslocamento de um corpo. Entretanto, apesar de estar parcialmente correto, Aristóteles não entendeu que o conceito de vácuo também se encaixa na própria teoria da queda dos corpos. O grande problema disso é que, devido à sua influência e importância na síntese e desenvolvimento do conhecimento humano, ele acabou influenciando diversos outros pensadores, propagando, até a época do Renascimento, uma frase que lhe foi atribuída: “A natureza tem horror ao vácuo”. Essa frase ou conceito foi utilizado para explicar todos os fenômenos que estão relacionados com a ideia do vácuo. Segundo essa premissa, ao ser realizada a “sucção” (entre aspas, pois esse termo não é adequado para se referir ao fenômeno que ocorre na realidade) do ar no interior de um canudo presente no interior de um copo, o líquido naturalmente subiria ao longo do comprimento do canudo para preencher o vazio gerado, para que assim não houvesse a existência do vácuo (STEMPNIAK, 2002).

O interessante do pensamento de Aristóteles é que o modo como, por exemplo, ocorre o fenômeno do canudo na realidade é quase condizente com o que ele pensou. O líquido presente no interior do copo realmente preenche o espaço deixado pela massa de ar “sugada”. Entretanto, não é por “horror ao vácuo” que isso acontece, mas sim por um ponto fundamental: o líquido só preenche o espaço interno do volume do canudo pela ação do ar externo ao canudo. Esse fenômeno se dá por efeito probabilístico de deslocamento de matéria, devido à diferença de pressão presente no interior do canudo, após a “sucção”, e o meio externo.

Ao analisar o parágrafo anterior, é possível pré-visualizar o momento em que de fato começou a se entender e aceitar o conceito de vácuo. Foi na descoberta da pressão exercida pelo peso do ar atmosférico, a **pressão atmosférica**. Todavia, antes de adentrar nesse assunto, é de interesse narrativo continuar com a contextualização histórica do período de polarização intelectual acerca do conceito da existência ou inexistência do vácuo.

Pois bem, dando continuidade, como já mencionado, Aristóteles foi um dos, se não o, principais opositores da ideia da existência do vácuo. O grupo de pensadores que seguiram as ideias do renomado filósofo grego ficou conhecido como **pensadores aristotélicos**. O grupo em que Demócrito, Leucipo e os outros pensadores que compartilhavam dos mesmos ideais a respeito desse tema ficou conhecido como **os atomistas**.

Ambos afirmavam suas ideias por meio de um ponto em comum, o deslocamento/movimento dos corpos. Para os atomistas, a existência do vácuo era fundamental para que houvesse o movimento, pois, sem ele, os corpos não teriam espaço para se deslocarem, já que a matéria estaria totalmente compactada. Segue texto do atomista Epicuro acerca da ideia do movimento dos corpos e do vácuo.

Se não existisse aquilo que chamamos de vazio ou espaço ou natureza intangível, os corpos não teriam onde estar nem através do que se mover, como se vê que eles se movem. (EPICURO, La lettre d'Épicure, 40 – pág. 79) Apud (D. SILVA, A natureza tem horror ao vácuo? Uma reflexão sobre o estabelecimento do peso do ar e a definição de pressão atmosférica – pág. 10)

De acordo com o texto de D. Silva (2013), ao olhar para a outra porção do espectro das ideias acerca desse tema, no caso, para a perspectiva dos aristotélicos, encontrou-se uma reflexão feita por Aristóteles, presente no seu livro *Física*, onde ele aborda o problema da existência do vácuo. No trecho extraído de seu livro, Aristóteles diz que:

Enquanto alguns afirmam a existência do vácuo como condição necessária para o movimento, o que acontece é exatamente o contrário: que nada poderia se mover se existisse o vácuo. Porque assim como alguns afirmam que a Terra está em repouso pela sua homogeneidade, assim também no vácuo seria inevitável que um corpo estivesse em repouso, pois não haveria um mais ou um menos para o qual as coisas se movessem, já que no vácuo não existem diferenças. Além disso, todo movimento é ou por violência ou por natureza. Mas se há um movimento violento, então tem que haver também um movimento natural (porque o movimento violento é contrário à natureza e o movimento contrário a natureza é posterior aquele segundo a natureza, de modo que, se não houvesse um movimento segundo a natureza em todos os corpos naturais, não haveria tampouco nenhum dos outros movimentos). Mas como poderia haver um movimento natural se não existe nenhuma diferença no vácuo e no infinito? Porque no infinito não há acima nem abaixo nem centro, e no vácuo, o acima não difere em nada do abaixo (porque assim como no nada não há diferenças, tampouco há no vácuo, pois se pensa que o vácuo é um certo não ser e uma privação). Mas o deslocamento natural é diferente, de modo que há diferenças nas coisas que são por natureza. Assim, pois, ou não há nenhum deslocamento natural em nenhuma parte e para coisa nenhuma, ou, se há, o vácuo não existe. (ARISTÓTELES, Física, Tradução e notas: GUILHERMO R. DE ECHANDÍA-p.138-139) Apud (D. SILVA, A natureza tem horror ao vácuo? Uma reflexão sobre o estabelecimento do peso do ar e a definição de pressão atmosférica – pág. 11)

Nessa passagem é possível visualizar a engenhosidade, segundo D. Silva (2013, pág. 11), da argumentação de Aristóteles. De acordo com o autor: “Vemos na citação acima, que Aristóteles, valendo-se de uma lógica incrível, refuta o que era afirmado pelos atomistas no que diz respeito ao vácuo ser necessário para que o movimento dos corpos fosse explicado.”.

De fato, Aristóteles possuía uma capacidade de construção argumentativa muito desenvolvida e articulosa. Não é por menos que o filósofo foi um dos principais precursores e influenciadores do desenvolvimento do pensamento e do método científico. Entretanto, como já abordado anteriormente neste texto, justamente por esse fator o conceito da natureza ter “horror ao vácuo” se tornou mais homogêneo na sociedade durante um longo período e adiou, talvez, o entendimento do seria o vácuo e o desenvolvimento das tecnologias atreladas a ele.

### **1.1.1. A resposta**

Retomando a ideia apresentada anteriormente, o início da verificação e validação do conceito de vácuo se deu no período da descoberta da existência da pressão atmosférica. Com base nos trabalhos de Stempniak (2002) e D. Silva (2013), a descoberta do efeito das colunas de ar atmosférico, que possibilitou o entendimento da ideia de vácuo, começou por volta do ano de 1640. Nesse período, o físico-astrônomo italiano Galileu Galilei foi convidado para tentar solucionar um problema da época que estava deixando os cientistas intrigados. As bombas de “sucção” e de êmbolos, utilizadas na elevação da água para o abastecimento de reservatórios e no

preenchimento de cisternas, não conseguiram elevar a água para níveis maiores do que 10,3 m. De primeira instância, Galileu atribuiu esse fato a um mau funcionamento das bombas e até solicitou uma revisão de um operário para realizar o conserto do equipamento. O operário, após sua análise, afirmou que o problema não estava na bomba, mas sim no nível de água presente no interior da cisterna. Para entender melhor esse fenômeno, o físico-astrônomo realizou um experimento. Esse experimento consistiu na pesagem de dois balões de vidro, um na temperatura ambiente e o outro previamente aquecido. Com esse experimento, ele percebeu que o balão que fora aquecido possuía peso menor do que o não aquecido. Aparentemente, o ar tinha peso. Apesar disso, Galileu não chegou a desenvolver nenhum trabalho nesse ramo, concluindo que o problema das bombas de “sucção” e de êmbolo estava atrelado à instabilidade provocada pelo peso da própria coluna de água, o que, segundo ele, não permitia que ela ultrapassasse a marca dos 10,3 m de altura.

É importante destacar que nessa época a base ideológica para explicar o funcionamento das coisas estava bastante fundamentada nos ideais aristotélicas, pela explicação teleológica. A **teleologia** é um tipo de método de teorização utilizado para formular modelos capazes de auxiliar na compreensão dos mecanismos de funcionamento do universo por meio do fim, da finalidade. Com o movimento de elaboração da nova física mecânica no século XVII, optou-se por descartar as explicações baseadas na teleologia e aderir às explicações que seguiam a linha lógica de construção do raciocínio a partir das causas físicas imediatas, elevando assim o nível de complexidade e profundidade das explicações do ponto de vista científico. Outra questão que vale ressaltar é que o problema das bombas de “sucção” e de êmbolo acabou estimulando os cientistas da época a entender o porquê de haver um limite na elevação da água por meio das bombas e do mecanismo de funcionamento delas.

Um dos cientistas foi aluno de Galileu, o físico e matemático italiano Evangelista Torricelli. Observando o problema das bombas de “sucção” e de êmbolo, Torricelli suspeitou que essa limitação estaria atrelada à pressão atmosférica. O fenômeno do efeito da força gerada pelo peso das colunas de ar, a pressão atmosférica, já era afirmado por vários de seus predecessores. Entretanto, Torricelli foi além.

O arranjo experimental proposto por Torricelli para comprovação da teoria da pressão atmosférica é, de certo modo, simples. Primeiramente, ele pensou qual seria a magnitude de elevação se fosse utilizado um líquido mais denso que a água. Visando facilitar a reprodução do experimento em ambiente laboratorial, o líquido escolhido foi o **mercúrio**. Por ser um material de alta densidade e de estar no estado líquido na temperatura e pressão ambiente, o mercúrio era de fato uma ótima opção. Com o mercúrio líquido, Torricelli testou inicialmente o fluido nas bombas utilizadas para o abastecimento de água nos reservatórios. Ao realizar esse teste, ele notou que a altura da coluna de mercúrio erguida pela bomba de “sucção” foi de somente 0,76 m. Essa diferença, do tamanho da coluna de mercúrio em comparação com o da coluna de água, é diretamente proporcional à densidade relativa do mercúrio em relação à água. No caso, 13,6 vezes menor. Vendo isso, o físico e matemático italiano propôs um experimento que ficaria conhecido como o **barômetro de Torricelli**.

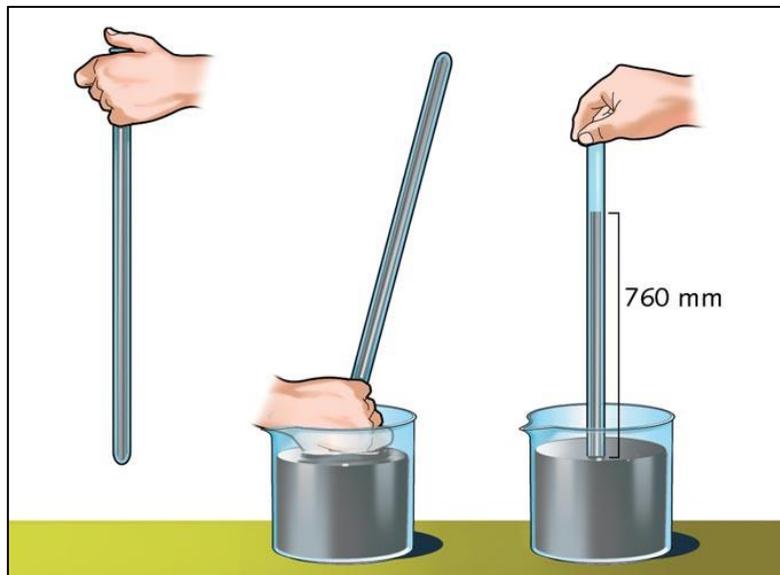
### 1.1.1.1. Barômetro de Torricelli

A instrumentação idealizada e utilizada por Torricelli para a montagem do arranjo experimental será descrita a seguir:

- 1 (um) tubo de vidro vazado com uma das extremidades vedada e com comprimento superior a  $0,76\text{ m}$ ,
- 1 (uma) bacia de vidro para deposição do mercúrio líquido e
- quantidade necessária de mercúrio para preencher totalmente tanto a bacia quanto o tubo de vidro.

A partir desses materiais, Torricelli executou o processo experimental para determinação e validação empírica do conceito de pressão atmosférica. Para isso, ele, primeiramente, preencheu a bacia de vidro com o mercúrio líquido até aproximadamente metade do volume total interno da bacia e preencheu completamente o volume interno do tubo de vidro com o mercúrio. Ao preencher esses dois recipientes com o fluido, ele tampou a extremidade aberta do tubo, virou dentro da bacia, submergindo o bocal de abertura do recipiente cilíndrico, e, com o bocal totalmente submerso, abriu novamente a extremidade do tubo de vidro que tinha sido previamente tampada. Após aguardar alguns segundos, a altura da coluna de mercúrio presente no interior do tubo se estabilizou na faixa de, justamente,  $0,76\text{ m}$  em relação à superfície do mercúrio líquido exposta ao ar atmosférico na bacia (Figura 1). Visto o procedimento experimental realizado por Torricelli em seu barômetro, agora, deverão ser destrinchados os fenômenos físicos por trás desse ensaio e a correlação desse com a pressão atmosférica e com o vácuo.

Figura 1. Barômetro de Torricelli.



Fonte: <https://profes.com.br/Rafaela.a.f/blog/experimento-de-torricelli>.

Observando a ilustração acima, é possível realizar duas considerações. A primeira é que, após sua estabilização, a coluna de mercúrio é sustentada pelo peso da coluna de ar, pressão atmosférica, que exerce uma força sobre a superfície livre do fluido. A outra consideração a ser feita é que, como pode-se observar na terceira parte (da esquerda para a direita) da figura, há uma região com ausência de mercúrio no interior do tubo de vidro. Essa região é uma região de baixa pressão, um vácuo parcial, criado após a estabilização do nível da coluna de mercúrio. O vácuo é parcial, pois, apesar de

mínima, existe uma presença de mercúrio volatilizado devido à pressão de vapor do líquido. Com isso, devido à diferença de pressão entre o meio externo e a região acima do mercúrio presente no interior do tubo, região de baixa pressão, a coluna de mercúrio consegue se manter erguida na faixa de 0,76 m de altura.

O interessante desse experimento é que, além da consolidação do fenômeno da pressão atmosférica, essa é uma das primeiras vezes em que foi gerado vácuo artificialmente e, inclusive, de boa qualidade. Algo fundamental que deve ser pontuado neste momento é que é impossível gerar um vácuo absoluto de maneira artificial. Por se tratar de um efeito probabilístico de deslocamento de matéria e também pela existência de vazamentos (o que, inclusive, é um fator fundamental em qualquer sistema de vácuo) e não de atração, como se é induzido a pensar quando se utiliza o termo “sucção”, sempre haverá um mínimo resquício de matéria no interior do ambiente ao qual se almeja gerar o vácuo. Entretanto, isso não é algo que deve ser considerado como um problema, já que atualmente a humanidade possui capacidade de gerar vácuo com magnitudes extremamente elevadas, cerca de **14 ordens de grandeza** de diferença em relação à pressão ambiente.

Dando continuidade, além desse último, Torricelli realizou diversos outros experimentos nessa área. Um dos quais foi colocar um bulbo no lugar da parte vedada do tubo de vidro, para que assim fosse possível inserir objetos pequenos. Fazendo isso ele verificou que os objetos se locomoviam mais rápido no interior do bulbo do que no ambiente externo, o que confirmava ainda mais a existência do vácuo.

Apesar de todas essas descobertas, grande parte da comunidade científica contemporânea a ele permaneceu muito receosa, já que, como mencionado, os resultados e validações atingidos por Torricelli iam de encontro a tudo que havia sido estabelecido até então. Além disso, existia outro fator: a **Inquisição**. A Inquisição foi uma instituição da Igreja Católica que tinha por finalidade julgar e punir pessoas que tinham condutas fora do padrão estabelecido por ela, o que fazia com que os pesquisadores se sentissem intimidados e desencorajados para propor ideias e conceitos e apresentar descobertas que contrariassem os padrões da época.

Contudo, por mais que tenha havido limitação na divulgação do conhecimento descoberto por Torricelli, outra figura importantíssima para o desenvolvimento do método científico e do saber humano no campo dos fluidos soube dos experimentos realizados por Torricelli. Essa figura foi Blaise Pascal, físico e matemático francês, que posteriormente teria seu sobrenome adotado como unidade de medida da grandeza pressão.

#### **1.1.1.2. Pascal, a experiência decisiva e o nivelamento barométrico**

As contribuições de Pascal para o mundo científico foram inúmeras. Ele realizou diversos outros experimentos na área dos fluidos utilizando tubos de formatos variados, foles, seringas e até outros tipos de líquidos (como o vinho, por exemplo). Um dos experimentos que contribuiu para a validação do conceito de vácuo é o experimento realizado no monte Puy-de-Dôme (Figura 2), que será detalhado a seguir.

Figura 2. Fotografia do monte Puy-de-Dôme.



Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Puy\\_de\\_Dôme](https://en.wikipedia.org/wiki/Puy_de_Dôme).

Localizado na cordilheira *Chaîne des Puys* e a 10 km da cidade de Clermont-Ferrand (Auvergne, França), esse monte, que na verdade é um vulcão, com altitude de 1 464 m foi escolhido para a execução de uma experiência que, segundo Pascal em uma carta enviada ao seu cunhado, Florin Périer, determinaria a existência do vácuo.

[...] Eu imaginei uma prova que — se for corretamente executada — por si só será suficiente para esclarecer aquilo que procuramos [...] Trata-se de fazer a já conhecida experiência do vácuo, inúmeras vezes num mesmo dia — usando o mesmo recipiente e o mesmo mercúrio — tanto na planície como no alto de uma montanha, para verificar se a altura do mercúrio em suspensão no tubo é igual ou diferente nas duas situações. Como você pode ver, a experiência é decisiva. Se a altura da coluna de mercúrio for menor no alto da montanha (tenho uma série de razões para acreditar que seja) se concluirá necessariamente que o peso do ar é a única causa do fenômeno e não o horror ao vácuo. E lógico que o peso do ar no pé da montanha é maior do que no alto, a não ser que se diga que a natureza abomina mais o vácuo na planície. (Apud D. SILVA, A natureza tem horror ao vácuo? Uma reflexão sobre o estabelecimento do peso do ar e a definição de pressão atmosférica – pág. 19)

Pascal solicita que seu cunhado vá até o monte realizar o experimento do barômetro de Torricelli em diferentes lugares, no topo e na base da montanha. Isso pois, como o próprio Pascal menciona, deveria haver diferença entre as alturas da coluna de mercúrio nos experimentos. O esperado era que a coluna de mercúrio com maior altura, devido à maior quantidade de massa de ar, seria aquela do experimento realizado no segundo caso, na base da montanha, e foi justamente isso que aconteceu. Em 19 de setembro de 1648, data do experimento, foi constatado que havia diferença entre as pressões exercidas pelo peso do ar na base e no cume da montanha. Além disso, foi constatado que esse peso era a única causa da elevação da coluna de mercúrio, o que, de acordo com o que foi postulado por Pascal no trecho de sua carta transcrito, expunha a contradição da ideia de que a natureza tem horror ao vácuo. Pascal, após o recebimento da resposta de Périer sobre o experimento, até confessa ter ficado contente com os resultados atingidos.

A partir desse momento, a existência da pressão atmosférica deixou de ser uma hipótese e passou a ser um fato possível de se verificar por meio de um procedimento empírico.

Apesar do curto período entre as realizações dos experimentos de Torricelli e de Pascal, cerca de 4 anos, o entendimento científico e o desenvolvimento da Ciência propriamente dita progrediu muito. Isso se deu principalmente pela quebra dos paradigmas da época na explicação dos fenômenos naturais, pela desvinculação da linha de raciocínio aristotélica na formulação da explicação dos mecanismos de funcionamento do universo.

Outra conclusão extraída do experimento de Pascal, realizado no monte Puy-de-Dôme, foi que, com o uso do barômetro de Torricelli, tornou-se possível verificar se dois lugares distintos são equidistantes em relação ao centro da Terra e que, a partir desse momento, era possível, também, determinar se uma região era mais elevada do que outra e vice-versa. Essa parametrização de altitudes, determinada pela primeira vez graças ao experimento de Pascal, é denominada **nivelamento barométrico**.

Um fator que vale ser mencionado é que a idealização desse experimento ainda é uma dúvida por parte dos historiadores. A experiência foi de fato executada por Florin Périer a mando de Pascal, entretanto, alguns indícios, segundo D. Silva (2013), apontam que a ideia partiu de Descartes. Contudo, como é possível observar pelo trecho da carta enviada a Périer, Pascal não menciona Descartes em nenhum momento, como se a ideia fosse sua.

Além desses ícones do conhecimento humano, que foram fundamentais para o desenvolvimento científico, houve outro cientista que se tornou um dos precursores de grande importância no desenvolvimento da Tecnologia do Vácuo e de grande influência no campo da eletricidade estática: Otto Von Guericke. Nascido em 30 de novembro de 1602, em Magdeburgo (na atual Alemanha), Von Guericke, físico e prefeito de sua cidade natal, desenvolveu as primeiras máquinas eletrostáticas e foi o inventor da **primeira bomba de vácuo** da qual se tem registro histórico.

#### **1.1.1.3. A bomba de Von Guericke**

De acordo D. Silva (2013), não se sabe ao certo se Von Guericke soube dos experimentos realizados por Torricelli e Pascal. O que se sabe é que ele não se interessou tanto pelos efeitos da pressão atmosférica, mas sim pela possibilidade de criar um ambiente isento, ou parcialmente isento, de matéria.

Primariamente, o intuito dele era retirar água de um recipiente (de um barril de vinho/cerveja), com o auxílio de uma bomba de pistão desenvolvida por ele, para garantir que não houvesse mais nada no interior do barril. Essa bomba foi a primeira bomba de vácuo desenvolvida na história e ficou conhecida como a **bomba de Von Guericke**. O funcionamento dela consistia, basicamente, em um cilindro oco, com um pistão e uma válvula (localizada na parte de dentro do cilindro, presente no bico da bomba) que possuía a finalidade de possibilitar a saída do fluido presente na câmara de vácuo e realizar a obstrução da reentrada desse fluido bombeado. Ao realizar o procedimento de remoção da água, ele notou que, além do processo de bombeamento ser extremamente difícil devido à força necessária, o ar ambiente adentrava o recipiente utilizado através dos poros da parede do próprio objeto.

Visando solucionar esse problema, Von Guericke idealizou um arranjo experimental com dois hemisférios, feitos de bronze ou cobre, que se encaixavam precisamente entre si e com uma vedação em couro. Esse conjunto seria a câmara de vácuo.

Como mencionado, a princípio, os experimentos eram feitos com água. Entretanto, após algumas tentativas, o fluido utilizado nesses recipientes, no interior da câmara de

vácuo, seria somente o ar atmosférico. Ao iniciar o processo de bombeamento, a água ou o ar presente na câmara de vácuo escoava para o volume interno da bomba de vácuo, no momento de puxada do pistão, devido à diferença de pressão. Após empurrado e puxado novamente ao longo de seu curso, o pistão, por ação mecânica, expulsava o fluido utilizado, da câmara interna da bomba de vácuo, e o exauria para o ambiente externo. Com isso, apesar da baixa qualidade, o vácuo gerado no interior dos hemisférios de cobre/bronze permitiu que Von Guericke realizasse diversos experimentos. Dois deles foram a verificação da não propagação de som, ao tocar um sino no interior do recipiente, no ambiente de vácuo, e da extinção/não-ignição da chama de uma vela, presente no interior da câmara de vácuo, após o processo de bombeamento.

Além desses, houve um experimento icônico e clássico da Tecnologia do Vácuo em que Von Guericke propôs o seguinte: após a confecção do vácuo no interior dos hemisférios, ele fez com que dezesseis cavalos (oito em cada lado) exercessem força para tentar romper o vácuo criado (Figura 3). Na literatura utilizada como base para esse trabalho, não fica claro se os cavalos conseguiram romper o vácuo criado. Segundo Stempniak (2002), os dezesseis cavalos já foram suficientes para realizar o rompimento do vácuo, com um enorme estrondo. Segundo D. Silva (2013), nem mesmo a ação de trinta cavalos em conjunto foi capaz de romper o vácuo criado. Por mais que exista certa ambiguidade sobre essa última questão, a importância desse experimento foi demonstrar a força de trabalho do ar atmosférico e servir como comprovação, novamente, de que a natureza não possui nenhum horror ao vácuo, é apenas a ação da pressão atmosférica.

A partir desse momento, devido a todos os experimentos realizados, é impossível afirmar que o fenômeno do vácuo não existia.

Figura 3. Ilustração do experimento realizado por Otto Von Guericke na tentativa de rompimento do vácuo criado, com o auxílio de dezesseis cavalos.



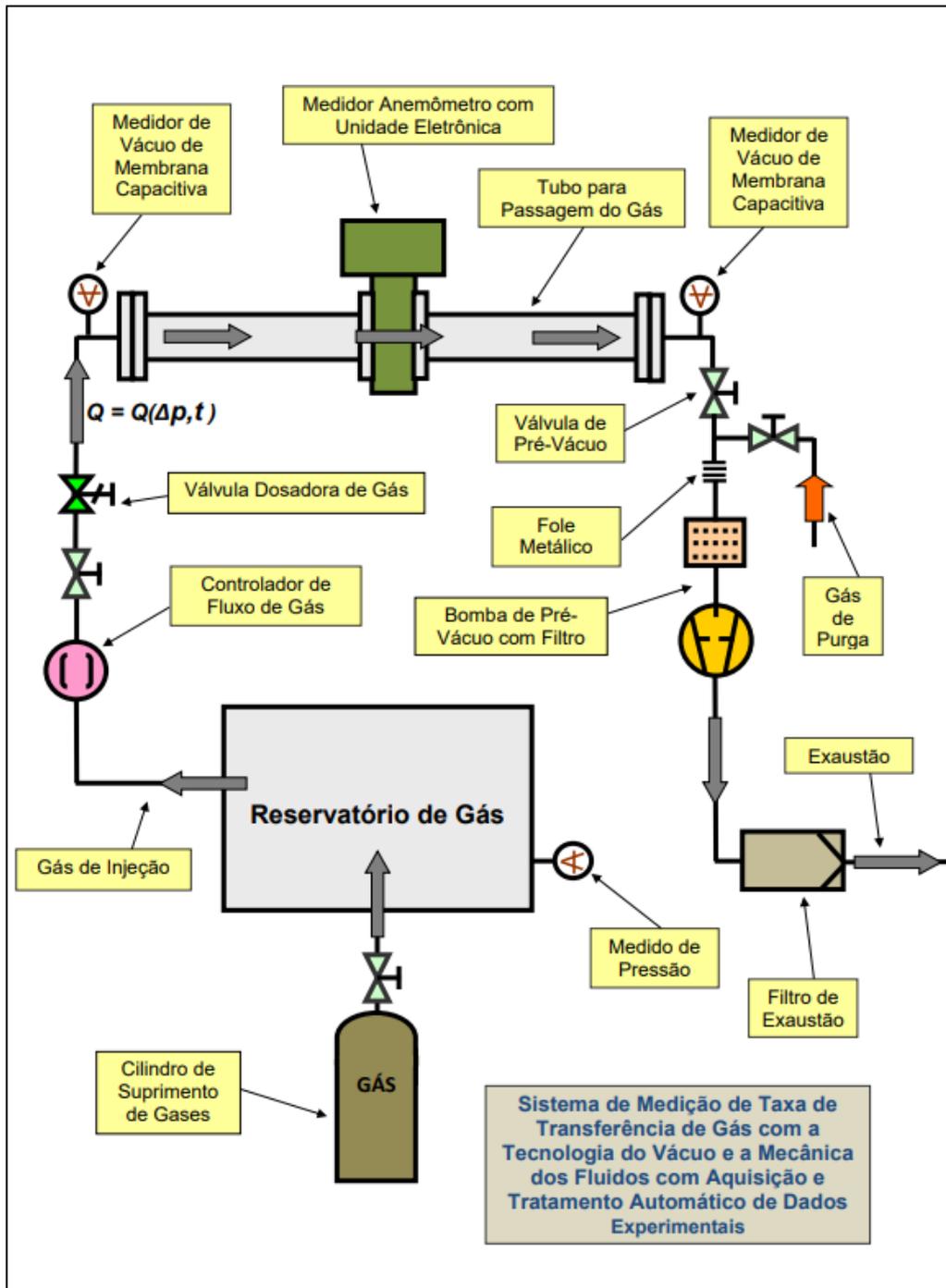
Fonte: <https://blogdaciencia.com/espeticulos-cientificos/>.

Dada toda a contextualização acerca dos debates feitos na história a respeito da tecnologia e do conceito de vácuo, é possível notar a grande relevância desse tema para a sociedade atual. Visando o aperfeiçoamento desse setor do conhecimento, esse trabalho tem por finalidade unificar e correlacionar as duas grandes áreas que envolvem tudo que foi apresentado até agora nesse documento, a **Tecnologia do Vácuo** e o campo do conhecimento que estuda o comportamento dos fluidos, a **Mecânica dos Fluidos**.

Através da modelagem de um sistema de vácuo simples, será possível correlacionar duas grandezas importantíssimas de cada uma das áreas, o *throughput* (taxa de transferência de gás), que pertence à Tecnologia do Vácuo, e a vazão, que pertence à Mecânica dos Fluidos. A partir dessas duas grandezas serão feitas manipulações algébricas para determinar uma relação matemática entre esses dois campos do conhecimento. Além disso, esse trabalho possibilitará a determinação da velocidade de

bombeamento de um sistema de pré-vácuo por meio da velocidade de escoamento do fluido utilizado, no caso, do ar atmosférico. A medição da velocidade de escoamento do fluido para a determinação da velocidade de bombeamento do conjunto de bombas do sistema de pré-vácuo servirá, inclusive, como um ponto de referência para verificar a validação dessa correlação/confiabilidade desse modelo e se dará a partir da comparação entre os dados teóricos já conhecidos, presentes no manual do fabricante da bomba de vácuo, e o arranjo experimental concebido. A ilustração abaixo (Figura 4) é referente ao arranjo experimental utilizado nesse projeto, concebido e idealizado pelo Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperri, que será melhor detalhado posteriormente.

Figura 4. Diagrama esquemático do arranjo experimental.



Fonte: autoria do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperri.

## 2. Fundamentação Teórica

A seguir serão introduzidos e detalhados, a medida do necessário e conveniente, a teoria base que será utilizada como alicerce para esse trabalho. Aqui serão demonstrados todos os conceitos teóricos individualmente para que depois seja possível abordá-los sem grandes ressalvas e detalhamentos.

### 2.1. Mecânica dos Fluidos

A Mecânica dos Fluidos é uma área da Física dedicada ao estudo das leis que regem o comportamento dos fluidos nos dois diferentes estados possíveis: em movimento, conhecido como hidrodinâmica, e em repouso, conhecido como hidrostática. Segundo a definição dada por Gomes (“s. d.”, pág. 1): “Pode-se definir **fluido** como uma substância que se deforma continuamente, isto é, escoar, sob ação de uma força tangencial por menor que ele seja.”. Esse conceito é de extrema importância, pois, como o próprio nome da área de estudo já descreve, é a base desse campo do conhecimento. Seguindo essa definição é possível separar os fluidos em dois grupos: os fluidos **compressíveis** e os **incompressíveis**. Mas, primeiramente, antes de detalhar isso, é necessário distinguir esse tipo de estado físico da matéria dos demais.

A matéria no estado de fluido se difere dos outros estados por uma característica base, nesse estado ela não possui formato definido, depende do recipiente em que está inserida. Isso é a chave do pensamento e do entendimento dos fluidos, a matéria nesse estado físico se adapta geometricamente ao lugar em que está presente (Figura 5).

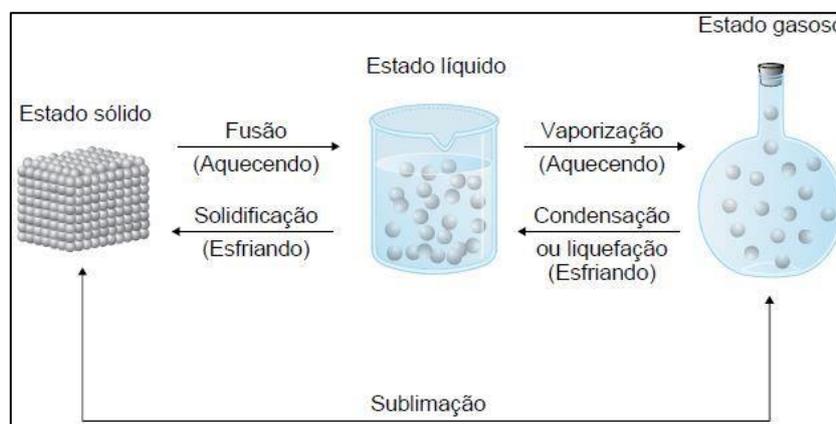
Pois bem, apresentada essa diferenciação, agora serão definidos os dois grandes grupos que abrangem os fluidos.

#### 2.1.1. Tipos de Fluidos

**Fluidos incompressíveis.** Esse tipo de fluido é aquele ao qual se é possível alterar a forma, mas não o volume, pelo menos, não de forma significativa. Ele se adapta ao formato do recipiente em que está inserido, mas preenche um volume definido. O nome dado para esse tipo de fluido é fluido líquido.

**Fluidos compressíveis.** Esse tipo de fluido também não possui formato definido, semelhante aos fluidos incompressíveis. Entretanto, ao contrário do anterior, nesse estado é possível alterar o volume ocupado para uma mesma quantidade de matéria, devido à adaptação desse, por estar nesse estado, ao volume do recipiente em que está inserido. O nome dado para esse tipo de fluido é fluido gasoso.

Figura 5. Tipos básicos de estados físicos da matéria.



Fonte: <https://www.coladaweb.com/fisica/termologia/mudancas-de-estado-fisico-da-materia>.

Além da definição dada acima, existem outros dois tipos de fluido que estão atrelados à modelagem utilizada para cada tipo de problema. Esses dois tipos são os **fluidos ideais** e os **fluidos reais**.

**Fluidos ideais.** Como apresentado no parágrafo anterior, esse tipo de fluido é um modelo que pode ser utilizado dependendo do tipo de análise que necessita ser feita em um determinado problema. O fluido ideal consiste em um fluido hipotético que não é possível encontrar na realidade. As características desse tipo de fluido são: viscosidade nula (homogêneo e não possui atrito entre as moléculas quando submetido a uma força de cisalhamento), as moléculas desse fluido não são reativas, isto é, não reagem quimicamente, e, quando colidem entre si e com as paredes do recipiente, possuem reflexão totalmente elástica.

**Fluidos reais.** Esses fluidos são justamente o oposto do anterior. Como a própria nomenclatura transcreve, esses todos os fluidos existentes na natureza e na realidade. Esses fluidos são caracterizados com viscosidade positiva, ou seja, possuem atrito, por mais que mínimo, entre as moléculas quando submetidos a uma força de cisalhamento; podem ou não serem reativos; não necessariamente possuem reflexão totalmente elástica após a colisão entre as moléculas ou entre o fluido e as paredes do recipiente em que ele está inserido.

### 2.1.2. Características dos Fluidos

Os fluidos, como qualquer outro estado físico, possuem propriedades intrínsecas a eles. Sabendo disso, a seguir serão listadas as diferentes características básicas inerentes à matéria nesse estado com base na Apostila de Mecânica dos Fluidos elaborada por Gomes (“s. d.”).

**a) Massa específica ( $\rho$ ).** Essa é uma grandeza que caracteriza a quantidade de massa de qualquer substância em relação a um determinado volume. Também denominada como densidade absoluta, sua formulação é dada pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

- “ $m$ ” é a massa total da substância.
- “ $V$ ” é o volume em que essa substância se encontra.

Unidade:

- [ $kg/m^3$ ] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [ $g/cm^3$ ], [ $kg/L$ ].

**b) Volume específico ( $\nu$ ).** O volume específico é o volume ao qual uma massa unitária de uma substância ocupa. Também podendo ser o inverso da massa específica, sua formulação é dada da seguinte forma:

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Unidade:

- [ $m^3/kg$ ] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[cm^3/g]$ ,  $[L/kg]$ .

**c) Peso específico ( $\gamma$ ).** Essa grandeza física está atrelada ao peso, isto é, a força que um corpo exerce devido à aceleração gravitacional, que um fluido gera por unidade de volume. A formulação para cada um dos tipos de fluido, para os compressíveis e para os incompressíveis, dessa grandeza é diferente em cada caso. Veja a seguir as formulações:

- para os líquidos:

$$\gamma = \frac{F_p}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (3.1)$$

- para os gases:

$$\gamma = \frac{P}{R \cdot T} \quad (3.2)$$

Onde:

- " $F_p$ " é a força peso.
- " $g$ " é a aceleração gravitacional.
- " $P$ " é a pressão absoluta.
- " $R$ " é a constante do gás.
- " $T$ " é a temperatura.

Unidade:

-  $[N/m^3]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[kgf/m^3]$ ,  $[lbf/ft^3]$ .

**d) Peso específico relativo ( $\gamma_r$ ).** O peso específico relativo é uma grandeza que correlaciona percentualmente o peso específico de uma substância em relação à outra. Geralmente atrelado à água, sua formulação é dada do seguinte modo:

$$\gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (4)$$

Unidade:

-  $[N/A]$  → (adimensional).

**e) Pressão ( $P$ ).** Por mais que essa grandeza não seja uma característica intrínseca aos fluidos, ela tem um papel importantíssimo para esse estado físico da matéria. Pois bem, de modo bastante simplificado, essa é uma grandeza que se refere à força exercida sobre uma determinada área, conforme a formulação a seguir:

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Onde:

- " $F$ " é a força exercida.
- " $A$ " é a área que está sofrendo ação da força em questão.

Unidade:

- [Pa] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [Torr], [atm], [mbar].

*Nota:* para determinar a pressão absoluta, ou seja, a pressão total, basta realizar o somatório da pressão atmosférica com a pressão efetiva realizada em questão.

$$P_{abs} = P_{ef} + P_{atm} \quad (6)$$

**f) Módulo de compressibilidade volumétrica ( $\epsilon_{vol}$ ).** A compressibilidade volumétrica de um fluido é definida pela relação entre o acréscimo parcial de pressão ( $\Delta P$ ) e o decréscimo parcial de volume ( $-\Delta V$ ). A variação de  $\Delta V$  é dependente do volume inicial  $V$ . Abaixo será descrita a equação que rege o módulo de compressibilidade volumétrica.

$$\epsilon_{vol} = -V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (7)$$

Onde:

- " $\Delta P$ " é a variação relativa ao acréscimo de pressão.

- " $\Delta V$ " é a variação relativa ao decréscimo do volume inicial.

- " $V$ " é o volume inicial do fluido.

Unidade:

- [Pa] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [Torr], [atm], [mbar].

Como já abordado no tópico anterior a esse (Tópico 3.1.1.), nos fluidos líquidos não há variações volumétricas expressivas. Apesar disso, o módulo de compressibilidade volumétrica pode sim variar, sendo mais perceptível na mudança de temperatura do que na variação de pressão. Já em relação aos fluidos gasosos é justamente o oposto, tanto a pressão quanto a temperatura influenciam diretamente na grandeza.

**g) Elasticidade ( $\Delta V$ ).** Esta grandeza se refere a capacidade de um fluido de aumentar seu volume quando diminuída a pressão exercida sobre ele. Um ponto que vale ressaltar é que essa propriedade já era amplamente conhecida para os gases. Entretanto, segundo Gomes ("s. d."), Berthelot, em 1850, descobriu que essa propriedade também é válida para os líquidos. A formulação dessa grandeza é dada pela variação volumétrica do fluido, como já mencionado, conforme a seguir:

$$\Delta V = -\frac{1}{E} \cdot V \cdot \Delta P \quad (8)$$

Onde:

- " $E$ " é o módulo de elasticidade volumétrica, dado pelo inverso da constante do gás utilizado.

$$E = \frac{1}{R_{gás}} \quad (9)$$

Unidade:

-  $[m^3]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[L]$ ,  $[cm^3]$ ,  $[ft^3]$ .

**h) Viscosidade.** Essa grandeza se refere à dificuldade ou resistência que o fluido tem, devido ao atrito entre as moléculas, de escoar. Essa resistência está muito atrelada às forças de cisalhamento, que promovem o deslizamento (escoamento) das camadas de moléculas. Portanto, com base nisso, é possível afirmar que a viscosidade é na verdade uma resistência à deformação provocada pela ação de uma força de cisalhamento.

**i) Força de cisalhamento ( $F_{cis}$ ).** Apesar de não ser uma característica intrínseca dos fluidos, será dada a definição dessa grandeza devido à relevância dela para esse estado físico da matéria. A força de cisalhamento é uma força que atua tangencialmente ao fluido, promovendo seu escoamento, e é dada pela seguinte formulação:

$$F_{cis} = \mu \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta z} \quad (10)$$

Onde:

- “ $\mu$ ” é a viscosidade dinâmica.

- “ $\Delta v$ ” é a variação de velocidade entre duas camadas.

- “ $\Delta z$ ” é a distância entre camadas adjacentes.

- “ $A$ ” é a área de superfície da porção de volume analisado.

Unidade:

-  $[N]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[kgf]$ ,  $[lbf]$ .

A partir do entendimento acerca da força de cisalhamento, agora serão apresentados, para encerrar esse tópico, os diferentes tipos de viscosidade e suas definições.

**j) Viscosidade dinâmica ou absoluta ( $\mu$ ).** É a força necessária para mover uma unidade de área a uma unidade de distância. Essa grandeza é intrínseca para cada fluido e aparece na formulação dos outros tipos de viscosidade.

Unidade:

-  $[m^2/s]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[P]$ ,  $[cP]$ ,  $[St]$ .

**k) Viscosidade cinemática ( $\eta$ ).** Essa grandeza é determinada pela razão entre a viscosidade dinâmica do fluido e sua massa específica, conforme a seguinte equação:

$$\eta = \frac{\mu}{\rho} \quad (11)$$

Unidade:

-  $[m^2/s]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[cSt]$ ,  $[P]$ .

- I) **Viscosidade específica** ( $\mu_{esp}$ ). Relação entre a viscosidade de um fluido em relação à viscosidade da água nas CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão), ou seja, a uma temperatura de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  e pressão de  $1\text{ atm}$ . Sua formulação é dada da seguinte forma:

$$\mu_{esp} = \frac{\mu_{fluido}}{\left(\mu_{\text{água}}^{20\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ atm}}\right)} \quad (12)$$

Onde:

- " $\mu_{fluido}$ " é a viscosidade dinâmica.

- " $\mu_{\text{água}}^{20\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{ atm}}$ " é a viscosidade absoluta da água nas CNTP.

Unidade:

-  $[N/A]$  → (adimensional).

Dada toda a fundamentação a respeito das características físicas intrínsecas da matéria no estado de fluido, nesse momento serão detalhados os dois tipos de comportamento em que se é possível encontrar os fluidos, o de repouso ou o de movimento. De forma inicial, para melhor construção da linha de raciocínio, é mais cabível entender o comportamento dos fluidos no primeiro estado mencionado. O nome da área que estuda as características dos fluidos e a interação deles com o meio externo quando se encontram nessa circunstância, como já mencionado anteriormente, mas de maneira breve, é denominada **hidrostática** e será detalhada a seguir.

### 2.1.3. Hidrostática

Segundo a definição dada pelo dicionário da *Oxford Languages*, presente no Google, hidrostática é a "parte da hidromecânica que estuda a pressão e o equilíbrio dos líquidos e dos gases que se submetem à ação da gravidade.". De maneira mais simples, é o estudo dos fluidos em equilíbrio. O conhecimento nessa área teve início no século II a.C. por meio do brilhante físico e matemático grego Arquimedes. Além de suas contribuições no campo da Mecânica dos Fluidos, pelo então conhecido Princípio de Arquimedes, ele também realizou diversos outros feitos, como a descoberta e determinação do número  $\pi$  (pi), que é a constante de proporcionalidade da razão entre o perímetro e o raio de uma circunferência.

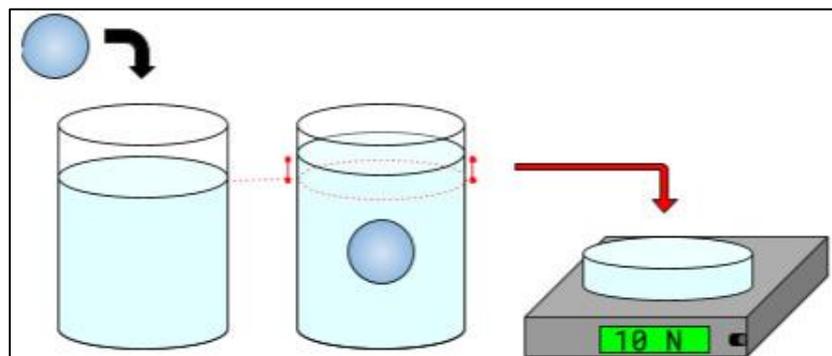
#### 2.1.3.1. Princípio de Arquimedes

Este princípio está baseado em uma grandeza que foi e é muito importante no desenvolvimento das tecnologias de transporte marinho, o **empuxo** ( $F_E$ ). Essa grandeza em questão é definida como a **força que incide em um corpo submerso, ou parcialmente submerso, de intensidade igual ao peso do volume de fluido deslocado, porém de sentido contrário a essa força peso**. É de fundamental importância o conhecimento desse fenômeno, pois é por esse princípio que as embarcações se sustentam acima da água. Além do volume de fluido deslocado, essa grandeza também muda proporcionalmente com a densidade do fluido utilizado, conforme a formulação dada a seguir:

$$F_E = \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{desloc}} \cdot g \quad (13)$$

Apresentado esse conceito, a seguir será posta uma ilustração (Figura 6) para melhor entendimento da ação da grandeza empuxo.

Figura 6. Princípio de Arquimedes.

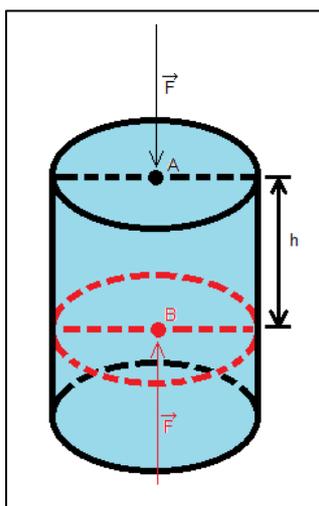


Fonte: <https://vestibulares.estrategia.com/porta/materias/fisica/principio-de-arquimedes/>.

### 2.1.3.2. Teorema de Stevin

Avançando um pouco mais na cronologia histórica, no final do século XVI, outra figura de extrema importância no entendimento do comportamento dos fluidos, o físico e matemático belga Simon Stevin, equacionou um **teorema que determina a pressão exercida por um fluido sobre um ponto a uma profundidade qualquer no interior desse fluido**. Esse teorema, como descrito no título desse item, ficou conhecido como o Teorema de Stevin e é, também, de fundamental importância no entendimento do comportamento dos fluidos. É importante ressaltar que esse teorema não depende da área do ponto em questão, depende apenas da profundidade em que ele se encontra dentro do fluido. Para fins didáticos e de enriquecimento desse trabalho, será demonstrado a seguir o processo de determinação desse teorema a partir das Leis de Newton com base em um figura exemplo (Figura 7).

Figura 7. Exemplo para dedução e validação, por meio das Leis de Newton, do Teorema de Stevin.



Fonte: próprio autor.

Com base no exemplo acima, escolhendo o ponto B como ponto de análise, é possível afirmar que a força resultante exercida nesse ponto é igual à somatória de todas as forças exercidas nele. Como é de interesse saber a força que o fluido exerce

sobre o ponto B, partindo da 2ª Lei de Newton, o equacionamento se dará da seguinte maneira:

$$F_B - F_A = m \cdot g \quad (14.1)$$

A partir do que foi apresentado na subseção anterior (subseção 2.1.2) é possível equacionar a massa do fluido, através da equação da massa específica ( $\rho$ ), como sendo o produto entre a massa específica e o volume do fluido ou, ainda, pelo produto entre a massa específica, a área da base do volume do fluido ( $A$ ) e a altura desse volume de fluido ( $h$ ). Portanto, seguindo essa lógica, a equação toma a seguinte forma:

$$F_B - F_A = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \quad (14.2)$$

Dividindo ambos os lados da igualdade pela área, já que a pretensão é determinar a pressão exercida pelo fluido, obteve-se que:

$$P_B - P_A = \rho \cdot h \cdot g \quad (14.3)$$

Com isso, considerando que  $P_A$  é igual à pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), determinou-se que, a partir da análise da equação descrita a seguir (Equação 15), a pressão exercida sobre um ponto qualquer no interior de um fluido não compressível é igual ao produto da massa específica, ou densidade, do fluido em análise, pela profundidade em que esse ponto se encontra e pela aceleração gravitacional, somado à pressão atmosférica.

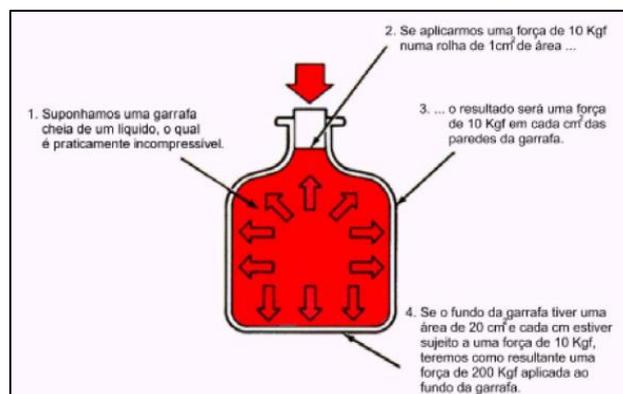
$$P_B = \rho \cdot h \cdot g + P_{atm} \quad (15)$$

### 2.1.3.3. Lei de Pascal

Nesse tópico há duas considerações a serem feitas. Além do nivelamento barométrico, como já mencionado nesse documento, Pascal realizou diversas contribuições na área do conhecimento sobre o comportamento dos fluidos. Uma dessas contribuições se tornou uma lei, a Lei de Pascal, e será detalhada a seguir.

Essa lei, segundo C. da Silva (2013, pág. 17), consiste no seguinte: “A pressão aplicada num fluido em um recipiente fechado age igualmente em todas as direções do fluido e perpendicularmente às paredes do recipiente”. Isso quer dizer que **qualquer força exercida em um fluido será distribuída de modo uniforme ao longo desse fluido** (Figura 8), para aqueles que são incompressíveis, é claro. O conhecimento dessa propriedade é importantíssimo no entendimento do comportamento dos fluidos e foi fundamental no desenvolvimento de diversas tecnologias criadas.

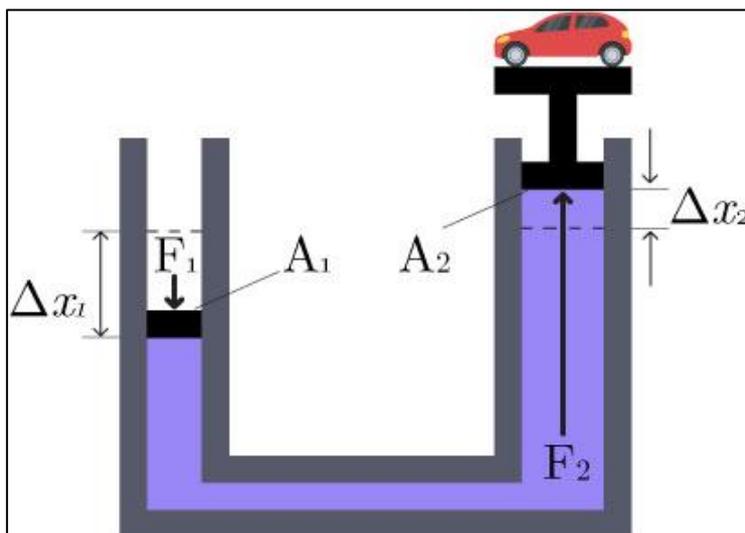
Figura 8. Lei de Pascal atuando em um frasco de vidro.



Fonte: <https://642f28a786.cbaul-cdnwnd.com/1247e655acd543d703bbdb84f1171d9b/200000382-17884197c2/Apostila%20-%20HIDRÁULICA%20GERAL.pdf>.

A partir da imagem acima, é possível notar a propriedade que proporciona um dos usos mais clássicos desse fenômeno. Como mencionado na figura, **a força que atua sobre a superfície da parede de um recipiente depende da quantidade de área que essa parede possui** e é um fator diretamente proporcional ao tamanho da área dessa superfície. Um dos usos mais básicos e utilizados na demonstração desse fenômeno é o mecanismo de funcionamento das prensas hidráulicas (Figura 9) e que, portanto, será abordado a seguir:

Figura 9. Exemplo para explicação do funcionamento da prensa hidráulica.



Fonte: <https://exatas.org/a-lei-de-pascal-aplicada/>.

Analisando a figura é possível realizar o equacionamento entre a força exercida ( $F_1$ ) e a força gerada ( $F_2$ ), através da pressão exercida, do seguinte modo:

$$P_1 = P_2 \quad (16.1)$$

Pela definição dada no capítulo referente às características dos fluidos (Capítulo 3.1.2.), a pressão exercida pode ser reescrita como:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (16.2)$$

Nesse momento, observando a expressão acima, é possível pré-visualizar a relação entre as forças 1 e 2 e suas áreas correspondentes. Manipulando algebricamente a equação, determina-se então que:

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1 \quad (17)$$

Ou seja, com base na equação acima, se aplicada uma força de 10 N na área "A<sub>1</sub>" e a razão entre a área maior e menor for de 5, por exemplo, a força "F<sub>2</sub>" será igual à 50 N, cinco vezes maior. Entretanto, algo importantíssimo deve ser ressaltado nesse momento. Nada na natureza e na realidade é criado por forma espontânea, tudo parte do princípio de conservação de energia. Desse modo, para compensar esse aumento de força, o deslocamento (representado por "Δx" na figura) da área "A<sub>1</sub>" deverá ser maior do que o deslocamento obtido na área "A<sub>2</sub>".

## 2.1.4. Hidrodinâmica

Do grego *húdor*, *hudatos*; “hidro-” exprime a ideia de água, cobra de água, algo fluido. Por outro lado, “-dinâmica”, do grego *dynamikós*, exprime a ideia de movimento e mudança. Juntando essas duas palavras e, por consequência, esses dois significados tem-se que a hidrodinâmica é a área do conhecimento que estuda o movimento dos fluidos. Tanto gasosos quanto os líquidos. Segundo a definição dada por C. da Silva (2013, pág. 33) em sua apostila, “A Hidrodinâmica é a parte da Hidráulica que estuda os fluidos em movimento.”. As definições dadas a seguir nesse capítulo serão baseadas nessa apostila e na apostila elaborada por Gomes (“s. d.”) intitulada como a *APOSTILA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS*.

### 2.1.4.1. Vazão

Essa é uma das grandezas mais importantes e fundamentais para a compreensão e o entendimento do movimento dos fluidos, pois ela é basicamente a determinação da velocidade de deslocamento desses fluidos. De modo mais direto, definindo a grandeza, **vazão** ( $Q$ ) é a quantidade, em volume ou em massa, de fluido que atravessa uma área, a área de seção transversal de seu escoamento, por unidade de tempo (Figura 10). Com base nisso, sua formulação é dada por:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \simeq \frac{m}{\Delta t} \quad (18a)$$

ou

$$Q = A \cdot v \quad (18b)$$

Onde:

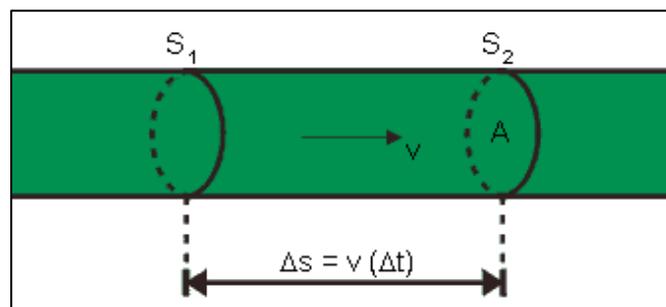
- “ $V$ ” é o volume de fluido que atravessa a área de seção transversal.
- “ $m$ ” é a massa de fluido que atravessa a área de seção transversal.
- “ $\Delta t$ ” é a variação de tempo.
- “ $A$ ” é a área de seção transversal.
- “ $v$ ” é a velocidade de escoamento do fluido ao passar pela área de seção.

Unidade:

- [ $m^3/s$ ] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [ $m^3/h$ ], [ $L/s$ ], [ $L/h$ ].

Figura 10. Representação do escoamento de um fluido qualquer.



Fonte:

[https://www.educabras.com/ensino\\_medio/materia/fisica/mecanica\\_cinematica/aulas/vazao\\_e\\_velocidade](https://www.educabras.com/ensino_medio/materia/fisica/mecanica_cinematica/aulas/vazao_e_velocidade).

### 2.1.4.2. Campo de Velocidades

De acordo com Gomes (“s. d.”, pág. 35), ao longo do volume de um fluido, cada partícula e/ou molécula pode possuir velocidades diferentes umas entre as outras. A velocidade é uma grandeza vetorial que, por definição, possui módulo, direção e sentido e é definida pela sua representação em cada um dos eixos ordenados, conforme a equação a seguir:

$$\vec{v} = v_x \cdot \vec{u}_x + v_y \cdot \vec{u}_y + v_z \cdot \vec{u}_z \quad (19)$$

Onde:

- “ $v_{x,y,z}$ ” é o módulo da projeção do vetor velocidade em cada um dos eixos.
- “ $\vec{u}_{x,y,z}$ ” é o vetor unitário correspondente a cada um dos eixos.

Unidade:

- [m/s] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

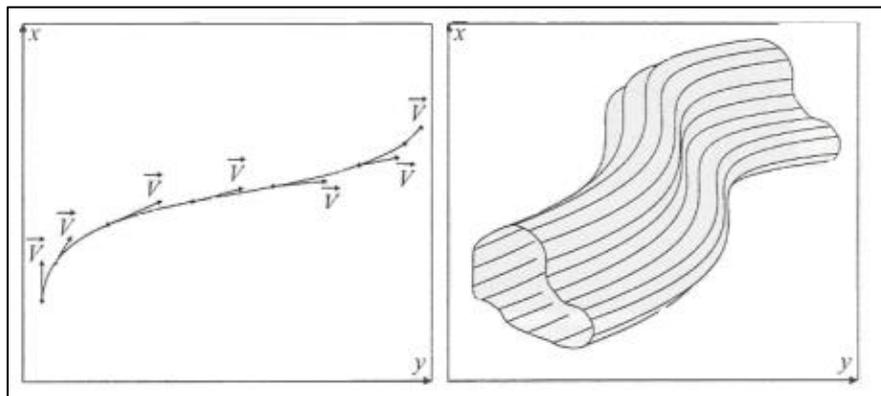
Outras unidades: [km/h], [m/h].

A partir do conhecimento da direção e da intensidade da velocidade relativa a qualquer ponto presente no interior de um fluido, de acordo com Netto (1998) Apud Gomes (“s. d.”, pág. 36), é possível determinar precisamente o movimento desse fluido em qualquer instante de tempo “t”.

### 2.1.4.3. Linhas e Tubos de Corrente

Ainda com base na apostila desenvolvida por Gomes (“s. d.”, pág. 36), a partir da definição dada por ela, as **linhas de corrente** são as linhas que definem o movimento dos fluidos por meio do tangenciamento dos vetores de velocidade de cada uma das partículas/moléculas de forma sequencial. Já os **tubos de corrente** são conjuntos de linhas de corrente que, basicamente, delimitam o volume do fluido. É importante ressaltar que tanto as linhas quanto os tubos são figuras imaginárias e possuem a propriedade de não serem atravessados por nenhuma partícula ou molécula do fluido. Outro fator importante é que não pode haver corte no trajeto de nenhuma das linhas de corrente por parte de outra e as paredes dos tubos de corrente possuem característica impermeável, ou seja, não permite que o fluido transpasse essas paredes. Abaixo será apresentada uma figura (Figura 11) que possui exemplos do que é uma linha de corrente e do que é um tubo de corrente, respectivamente.

Figura 11. Ilustração da definição da linha e do tubo de corrente.

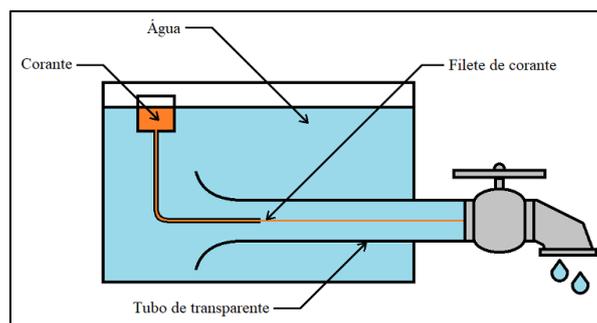


#### 2.1.4.4. Regimes de Escoamento

Ao escoarem, os fluidos possuem características diferentes de acordo com as condições de escoamento. Um fator fundamental, por exemplo, é o dimensionamento da estrutura ou as condições físicas do próprio ambiente em que o fluido está escoando. Para melhor entendimento sobre esse assunto, a seguir serão postos os tipos de regimes de escoamento em que um fluido, ao escoar, pode se encontrar. Para isso, é importante comentar que o escoamento dos fluidos pode ser separado em dois fatores: o tipo de regime de escoamento e o regime de escoamento propriamente dito. Como a Mecânica dos Fluidos, em geral, lida em suas problemáticas com pressões a partir da pressão atmosférica para cima, o regime de escoamento dos fluidos nessa área é majoritariamente **viscoso**. Com base nisso, neste momento serão definidos somente os tipos de regime de escoamento. As definições dos regimes de escoamento propriamente ditos serão apresentadas na subseção referente à Tecnologia do Vácuo (subseção 2.2).

- a) **Escoamento laminar.** Também conhecido como escoamento ordenado, o movimento do fluido nesse tipo de regime é caracterizado por um movimento uniforme e homogêneo por parte das partículas do fluido durante o escoamento. Sendo as linhas de fluxo do escoamento paralelas entre si e a velocidade das moléculas, ao longo do corpo do fluido, constante (Figura 12).

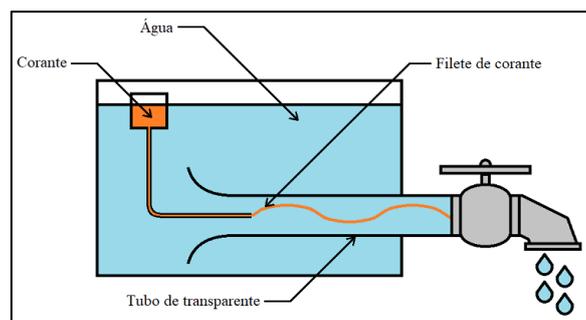
Figura 12. Regime de escoamento do tipo laminar.



Fonte: próprio autor.

- b) **Escoamento transitório ou de transição.** O movimento das partículas/moléculas do fluido nesse tipo de regime de escoamento é caracterizado por possuir uma leve variação ondulatória ao longo da tubulação, devido a uma diferença amena de velocidade entre cada uma das moléculas/partículas do fluido (Figura 13). Esse tipo de regime, como menciona o próprio nome, é um regime de transição entre o regime ordenado (laminar) e o caótico (turbulento).

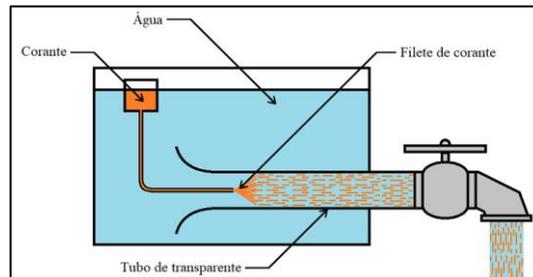
Figura 13. Regime de escoamento do tipo transitório.



Fonte: próprio autor.

- c) **Escoamento turbulento.** Conforme mencionado no item anterior (item “b”), esse tipo de regime é caracterizado pelo movimento caótico e aleatório das moléculas. Devido a essa aleatoriedade, as camadas de moléculas se embaralham entre si e promovem um movimento completamente desordenado das partículas ao longo do volume do fluido (Figura 14).

Figura 14. Regime de escoamento do tipo turbulento.



Fonte: próprio autor.

Apresentados os tipos de regime de escoamento existentes, é interessante e necessário expor o método desenvolvido por outra figura histórica importantíssima no estudo dos fluidos, Osborne Reynolds. Reynolds era um físico e engenheiro britânico do século XIX que verificou empiricamente o comportamento dos fluidos e a existência desses tipos de regimes de escoamento. O nome do estudo ficou conhecido como o **Experimento de Reynolds** e consistiu na injeção de um corante líquido no centro da área de seção transversal de um tubo cilíndrico de vidro por onde era realizado o escoamento do fluido, no caso, da água. Como visto nas imagens presentes nessa subseção (Figuras 12, 13 e 14), dependendo do tipo de regime de escoamento o corante: formava um filete retilíneo no interior do fluido (escoamento do tipo laminar, Figura 12), tomava a forma de uma onda (escoamento do tipo transitório, Figura 13) ou se misturava por completo no fluido (escoamento do tipo turbulento, Figura 14).

A determinação do tipo de regime de escoamento por meio de métodos numéricos varia conforme o dimensionamento do canal ao qual o fluido passa ao escoar. Como, em geral, as tubulações em que os fluidos escoam possuem formato cilíndrico, Reynolds determinou um parâmetro, relacionado com o diâmetro da tubulação, a velocidade de escoamento do fluido, a massa específica do fluido e a viscosidade cinemática dele, que determina em qual tipo de regime de escoamento um fluido se encontra. Esse parâmetro ficou conhecido como o **coeficiente de Reynolds** ( $Re$ ) e sua formulação é dada da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot \phi \cdot v}{\eta} \quad (20)$$

Onde:

- “ $\rho$ ” é a massa específica do fluido.
- “ $\phi$ ” é o diâmetro da tubulação.
- “ $v$ ” é a velocidade de escoamento do fluido.
- “ $\eta$ ” é a viscosidade cinemática do fluido.

Unidade:

- $[N/A] \rightarrow$  (adimensional).

A partir da formulação acima, foi obtida uma parametrização para a determinação dos tipos de regimes de escoamento (Tabela 1).

Tabela 1. Parametrização dos tipos de regime de escoamento por meio do coeficiente de Reynolds.

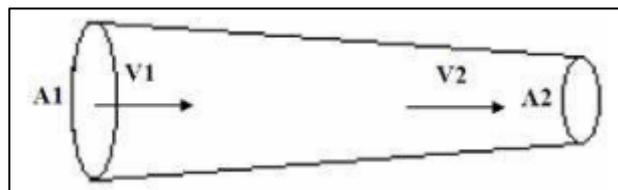
$Re \leq 2\,000$	Escoamento do tipo laminar
$2\,000 < Re \leq 4\,000$	Escoamento do tipo transitório
$4\,000 < Re$	Escoamento do tipo turbulento

#### 2.1.4.5. Equação da Continuidade

De modo geral, de acordo com Gomes (“s. d.”, pág. 39), o equacionamento do escoamento de um fluido parte de um princípio que tem por base **um volume de controle ( $V_c$ )**. O princípio mencionado é o **princípio da continuidade** que parte da premissa da invariabilidade (constância) da velocidade de um ponto qualquer no interior do volume de controle de um fluido no decorrer do tempo.

Tomando como exemplo o tubo cônico apresentado a seguir (Figura 15) e com base no princípio de continuidade e no de conservação, a vazão em cada um dos pontos deve permanecer a mesma ao longo da tubulação para que haja o escoamento do fluido.

Figura 15. Exemplo de tubo cônico para a análise do princípio de continuidade.



Fonte: <https://642f28a786.cbaul-cdnwnd.com/1247e655acd543d703bbdb84f1171d9b/200000382-17884197c2/Apostila%20-%20HIDRÁULICA%20GERAL.pdf>.

Partindo desse exemplo, é possível equacionar a relação entre os pontos 1 e 2 da seguinte maneira:

$$Q_1 = Q_2 \quad (21)$$

Substituindo as grandezas em ambas as igualdades pela definição da vazão em função da velocidade (Equação 18b) obtém-se que:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (21.1)$$

A equação descrita acima é muito importante, pois esse princípio serve como base para a formulação de um dos teoremas mais importantes da Mecânica dos Fluidos, o **Teorema de Bernoulli**. Como é possível visualizar pela figura exemplo (Figura 15), por ter havido uma diminuição na área de seção transversal da tubulação ao qual o fluido está escoando, no ponto 2 deverá haver um aumento da velocidade do fluido para que a relação de igualdade apresentada na Equação 21.1 seja mantida. Ou seja, em outras palavras, com o aumento da área de seção transversal da tubulação em que o fluido está escoando, considerando a mesma vazão, haverá uma diminuição da velocidade de escoamento desse fluido e vice-versa. Isso se dá devido ao princípio de conservação e o princípio de continuidade.

#### 2.1.4.6. Teorema de Bernoulli

Daniel Bernoulli, físico e matemático suíço do século XVIII, desenvolveu, como mencionado, um teorema importantíssimo para o estudo do comportamento dos fluidos. Esse teorema é de extrema relevância, pois ele correlaciona, em uma mesma equação, as grandezas pressão, velocidade, massa específica e altura de dois pontos distintos presentes no interior de um fluido, conforme visto a seguir:

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} \quad (22)$$

Onde:

- “ $P_{1,2}$ ” é a pressão do fluido em cada ponto.
- “ $h_{1,2}$ ” é a altura de cada ponto.
- “ $v_{1,2}$ ” é a velocidade de escoamento do fluido em cada um dos pontos.

### 2.2. Tecnologia do Vácuo

A **Tecnologia do Vácuo**, como já apresentado, é a área que estuda os fundamentos e teorias base acerca do conceito do vácuo e suas aplicações na tecnologia. O objetivo desse setor é gerar ganhos intelectuais para satisfazer determinados fins, como projetos do setor industrial e/ou acadêmico, por exemplo. Para compreender melhor essa área é necessário adentrar em alguns tópicos que são de extrema relevância no entendimento a respeito desse segmento do conhecimento humano.

#### 2.2.1. Tipos e Escalas de Pressão

O primeiro, que é literalmente a base de estudos desse setor, é o tópico referente aos conceitos dos tipos e escalas de pressão. A escala de pressão é importante e muito usada na diferenciação dos diversos instrumentos utilizados para cada caso e no grau de pureza de ambiente que se deseja atingir. A seguir será posta as escalas de pressão com as nomenclaturas utilizadas na distinção dos diferentes tipos de níveis de vácuo (Tabela 2) e, em seguida, os tipos de pressão existentes. Essa subseção será baseada na *Apostila de Hidráulica Geral* do C. da Silva (2013, pág. 20 e 21).

Tabela 2. Faixas de pressão e denominação dos níveis de vácuo.

Nomenclatura	Faixa de Pressão (Torr)	% da $P_{atm}$
Baixo vácuo ( <i>Low vacuum</i> )	760 ↔ 1	100% ↔ 0,13%
Médio vácuo ( <i>Medium vacuum</i> )	1 ↔ $10^{-3}$	$\%_{P_{atm}} < 0,13\%$
Alto vácuo ( <i>High vacuum</i> )	$10^{-3}$ ↔ $10^{-6}$	Desprezível
Altíssimo vácuo ( <i>Very high vacuum</i> )	$10^{-6}$ ↔ $10^{-9}$	Desprezível
Ultra-alto vácuo ( <i>Ultra high vacuum</i> )	$10^{-9}$ ↔ $10^{-12}$	Desprezível
Extremo ultra-alto vácuo ( <i>Extreme ultra high vacuum</i> )	$P < 10^{-12}$	Desprezível

##### 2.2.1.1. Pressão Atmosférica

Como já abordado ao longo desse documento, a **pressão atmosférica** ( $P_{atm}$ ) é a pressão referente à força peso exercida pelas colunas de ar atmosférico. Os

instrumentos de medição desse tipo de pressão geralmente são os barômetros e, devido a isso, outra expressão que pode ser usada como sinônimo de pressão atmosférica é **pressão barométrica**.

No nível do mar, a força da pressão atmosférica é equivalente ao peso de uma coluna de água com aproximadamente 10,3 m de altura. Portanto, equivalente a uma pressão de 10,3 mca (metros de coluna de água). A partir desse conceito, para simplificar, foi estabelecida que a pressão atmosférica no nível do mar é equivalente à 1 atm (atmosfera), ou 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>. A equação para a determinação da pressão em uma determinada localização é dada pela seguinte relação:

$$P_{atm_{local}} = P_{atm_{mar}} - 0,12 \cdot \frac{h_{local}}{100} \quad (23)$$

Onde:

- " $P_{atm_{local}}$ " é a pressão atmosférica local.
- " $P_{atm_{mar}}$ " é a pressão atmosférica no nível do mar.
- " $h_{local}$ " é a altitude do local tido como referência.

#### **2.2.1.2. Pressão Manométrica ou Relativa**

Esse é um tipo de pressão baseado em um referencial, geralmente na pressão atmosférica, e é normalmente mensurado a partir de instrumentos de medição denominados **manômetros**. A **pressão manométrica é a única em que os valores podem ser negativos**, entretanto, é importante salientar que não existe pressão negativa de fato, já que essa é uma grandeza escalar e não vetorial. Esse tipo de medição de pressão se torna negativo quando sua intensidade é menor do que a pressão de referência. Como, em geral, o referencial tido como comparativo nesse tipo de medição é a pressão atmosférica, quando os manômetros exibem um valor negativo de pressão (menor que o referencial) isso significa que foi gerado um vácuo naquele ambiente em questão.

Dentro desse segmento de medição de pressões relativas, existem três tipos de medidores de pressão conforme listado abaixo.

- **Manômetros.** São aqueles que indicam somente valores de pressão positiva.
- **Vacuômetros.** São aqueles que indicam somente valores de pressão negativa.
- **Manovacuômetros.** São aqueles que indicam ambas as faixas de pressão relativa, tanto a porção negativa quanto a positiva.

#### **2.2.1.3. Pressão Absoluta**

Em adição ao que foi apresentado anteriormente, a pressão absoluta é a pressão total exercida desde o vácuo absoluto. Essa grandeza é utilizada para determinar qual a intensidade total da pressão exercida em um determinado ambiente ou corpo e possui todos os seus **valores positivos**. Sua formulação, como já apresentado (Equação 6), é dada da seguinte forma:

$$P_{abs} = P_{ef} + P_{atm} \quad \{6\}$$

### 2.2.2. Grandezas Fundamentais

Assim como na Mecânica dos Fluidos, na Tecnologia do Vácuo existem diversas grandezas de extrema importância para o entendimento do comportamento dos sistemas de vácuo. Algumas delas já foram apresentadas na subseção referente às características intrínsecas dos fluidos (subseção 2.1.2), entretanto, com o intuito de enriquecer o entendimento nessa área, serão apresentadas outras das grandezas de grande relevância no estudo acerca da Tecnologia do Vácuo.

- a) **Livre caminho médio ( $\lambda$ )**. O conceito por trás dessa grandeza tem relação com as colisões que uma molécula sofre ao se deslocar e a quantidade de deslocamento dessa molécula. Em palavras mais claras e objetivas, o livre caminho médio é a distância média em que as moléculas de um fluido percorrem no intervalo entre duas colisões (Figura 16). A formulação dessa grandeza varia um pouco conforme a precisão requerida para a problemática. Uma das formulações possíveis, quando não se é almejado um resultado muito rigoroso, é dada como:

$$\lambda = \frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot \phi^2} \quad (24)$$

Essa é uma formulação menos rigorosa, pois a teoria base por trás dela considera que apenas a molécula de referência está se deslocando, as demais se encontram em regime estacionário. Para determinar o livre caminho médio com maior precisão, levando em conta o movimento relativo das outras moléculas, a equação que deverá ser utilizada possui a seguinte forma:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \phi^2} \quad (25)$$

Onde:

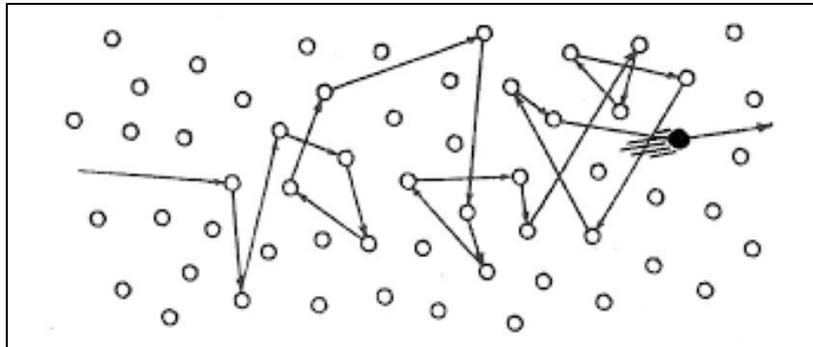
- " $\phi$ " é o diâmetro da área de seção transversal de uma linha de bombeamento cilíndrica.

Unidade:

- [m] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [cm], [ $\mu$ m].

Figura 16. Representação das colisões e do livre caminho médio de uma molécula.



Fonte: <https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/TeoriaCinetica2017.pdf>.

- b) **Número de Knudsen ( $N_k$ )**. Como apresentado na subseção 2.1.4.4, os tipos de regime de escoamento dos fluidos podem ser dividido em três segmentos diferentes.

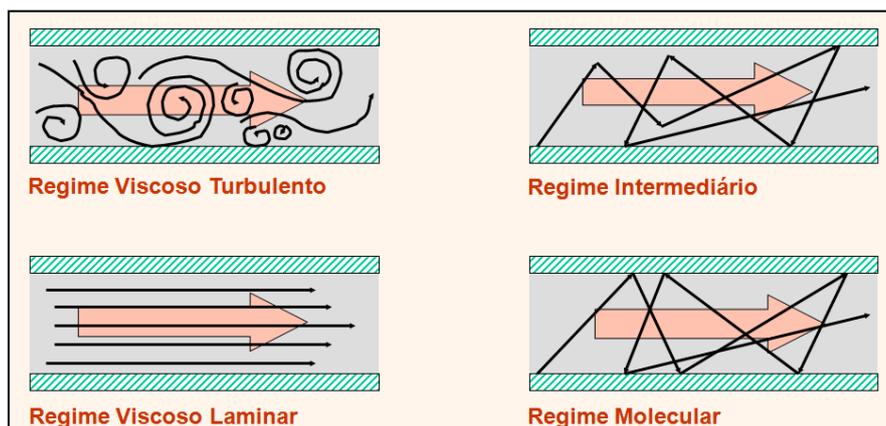
Além dessa, como mencionado na subseção destacada, existe outra diferenciação possível em relação ao escoamento dos fluidos. Essa diferenciação é baseada no **regime de escoamento** ao qual o fluido se encontra e o número de Knudsen é o fator que determina isso.

Antes de aprofundar na grandeza em questão (no número de Knudsen), primeiramente é de maior interesse efetuar a distinção entre os regimes de escoamento.

- **Viscoso.** O fluido que se encontra nesse regime possui uma interação intermolecular extremamente elevada e, devido a isso, possui uma forte ação da viscosidade, quando comparado com os demais regimes. Outra definição que pode ser dada para esse regime de escoamento é o livre caminho médio ser muito menor do que as dimensões do recipiente.
- **Intermediário.** Esse regime de escoamento é caracterizado como sendo um regime de transição entre os regimes viscoso e molecular. A interação colisional intermolecular possui certa expressividade, mas não é tão acentuada quanto no regime viscoso. O livre caminho médio nesse regime de escoamento cresce de maneira significativa.
- **Molecular.** O comportamento das moléculas do fluido quando este se encontra nesse regime é caracterizado pela quase nula colisão/choque colisional intermolecular. As moléculas nesse regime de escoamento praticamente não se chocam entre si, se chocam somente contra as paredes do recipiente em que o fluido está armazenado. A característica principal do fluido que está nesse regime é que as moléculas dele possuem um livre caminho médio muito maior do que as dimensões do recipiente em que ele se encontra.

A seguir será posta uma ilustração (Figura 17) que exemplifica de modo visual os diferentes regimes de escoamento existentes.

Figura 17. Regimes de escoamento existentes.



Fonte: material de aula do Prof. Francisco Tadeu Degasperi da disciplina de Tecnologia do Vácuo.

Ciente dos diferentes regimes de escoamento em que um fluido pode se encontrar, abaixo será descrita a formulação utilizada na determinação do número de Knudsen, na verdade, do inverso dessa grandeza, que também pode ser utilizada na determinação do regime de escoamento.

$$N_k = \frac{D}{\lambda} \quad (26)$$

Onde:

- “ $D$ ” é a dimensão de referência da linha de bombeamento (geralmente o diâmetro da tubulação).

Unidade:

-  $[N/A] \rightarrow$  (adimensional).

Como pode-se notar pela formulação acima, o número de Knudsen estabelece uma relação entre a dimensão típica da linha de bombeamento e o livre caminho médio, o que explica as definições dadas anteriormente. Além disso, semelhante ao coeficiente de Reynolds, o número de Knudsen possui uma parametrização. Essa parametrização será descrita em formato de tabela (Tabela 3) e serve para identificar, a partir da resolução da Equação 26, em qual regime de escoamento o fluido analisado se encontra.

Tabela 3. Relação entre o inverso do número de Knudsen e o regime de escoamento.

$100 < N_k$	Viscoso
$1 < N_k \leq 100$	Intermediário
$N_k \leq 1$	Molecular

**c) Velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ ).** A velocidade efetiva de bombeamento é a grandeza referente ao trabalho efetivo do sistema de bombeamento. Isso porque a velocidade de bombeamento não depende somente da bomba/sistema de vácuo, mas sim da conjuntura entre essa grandeza e a condutância total, conforme descrito na formulação abaixo.

$$S_{ef} = \frac{S_{BV} \cdot C_T}{S_{BV} + C_T} \quad (27)$$

Onde:

- “ $S_{BV}$ ” é a velocidade de bombeamento da bomba/sistema de vácuo.

- “ $C_T$ ” é a condutância total da linha de bombeamento.

Unidade:

-  $[m^3/s] \rightarrow$  Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[m^3/h]$ ,  $[L/s]$ .

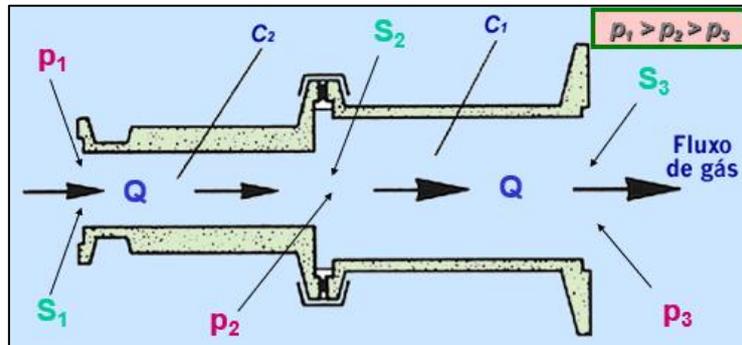
Note que, com base na análise da formulação acima, a grandeza “ $S_{ef}$ ” é limitada pela grandeza que possuir o menor valor.

**d) Condutância.** Essa é uma grandeza que está atrelada à capacidade do objeto em estudo em promover a condução de algo. Sendo uma das grandezas mais importantes e críticas nos sistemas de vácuo, a condutância é um dos fatores limitantes nesses sistemas.

Antes de apresentar os tipos dessa grandeza presentes na Tecnologia do Vácuo, é importante mostrar o efeito dela em relação aos diferentes tipos de arranjo das linhas de bombeamento.

- **Condutância em série.** Com a finalidade de promover um melhor entendimento, a seguir será posta uma figura (Figura 18) que será utilizada como exemplo nesse subitem.

Figura 18. Exemplo de condutâncias em série.



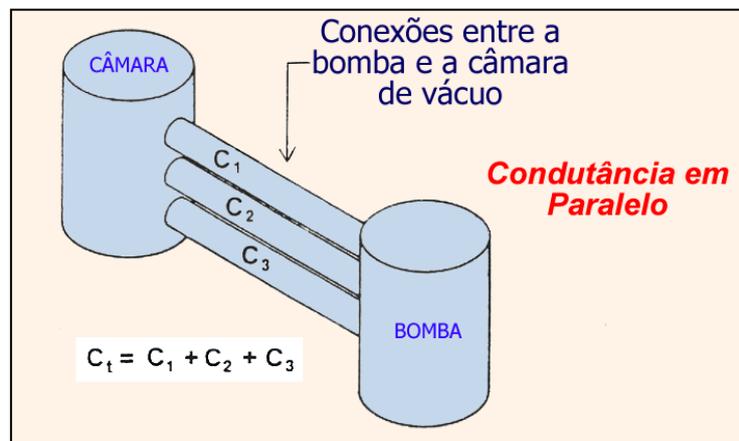
Fonte: material de aula do Prof. Francisco Tadeu Degasperri da disciplina de Tecnologia do Vácuo.

Observando o exemplo acima, é possível notar que a condutância equivalente da associação entre as condutâncias “ $C_1$ ” e “ $C_2$ ” não se complementam aditivamente. Se um volume qualquer de fluido que passa por “ $C_2$ ” necessita passar por “ $C_1$ ”, haverá, devido ao aumento de volume, um maior espalhamento do fluido durante seu escoamento. Outro exemplo que pode ser dado, considerando um fluxo de escoamento oposto, é do processo de abertura de uma torneira conectada a um reservatório de água. Ao abrir uma torneira, o volume de fluido presente no reservatório não consegue escoar de uma só vez, ele é limitado pela capacidade que a torneira tem em fornecer um caminho para esse escoamento. Entendido isso, segue a formulação que rege a associação de “ $n$ ” condutâncias em série:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (28)$$

- **Condutância em paralelo.** De modo análogo ao subitem anterior, será posta abaixo uma figura (Figura 19) com a finalidade de auxiliar no entendimento do processo de associação entre duas ou mais condutâncias em paralelo.

Figura 19. Exemplo de condutâncias em paralelo.



Fonte: material de aula do Prof. Francisco Tadeu Degasperri da disciplina de Tecnologia do Vácuo.

Visualizando a figura acima é possível notar que a associação em paralelo de condutâncias promove o inverso da associação em série. Quando realizada a conexão de duas ou mais linhas de bombeamento (“condutâncias”) em paralelo há um maior fornecimento de espaço para que um fluido possa escoar. Dessa forma, para determinar a condutância equivalente nesse tipo de associação basta realizar o somatório entre todas as “n” condutâncias em paralelo presentes no sistema.

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (29)$$

**e) Condutância total ( $C_T$ ).** A condutância total é uma grandeza que, como o próprio nome já induz a pensar, é a máxima condutância possível de ser atingida em uma dada linha de bombeamento. Sua formulação parte da associação em série de duas outras condutâncias, conforme a seguir:

$$C_T = \frac{C_{tu} \cdot C_{or}}{C_{tu} + C_{or}} \quad (30)$$

Onde:

- “ $C_{tu}$ ” é a condutância da tubulação.

- “ $C_{or}$ ” é a condutância do orifício que liga a linha de bombeamento e a câmara de vácuo.

Unidade:

- [ $m^3/s$ ] → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades: [ $m^3/h$ ], [ $L/s$ ].

**f) Condutância da tubulação ( $C_{tu}$ ).** A condutância da tubulação é, com base na definição dada no item “d” de condutância, a capacidade da tubulação em possibilitar a condução de algo. Como o escopo apresentado nesse trabalho são os fluidos, a condutância da tubulação é a capacidade que uma tubulação tem em conduzir fluido. Uma questão que deve ser pontuada é que a formulação utilizada tanto na condutância da tubulação quanto na do orifício (que será melhor abordada no item “g”, seguinte) é que ela varia dependendo do tipo de regime de escoamento em que o fluido que passará por estas regiões se encontra. Por exemplo, como nesse trabalho o regime de escoamento é viscoso a formulação da condutância da tubulação (considerando uma geometria cilíndrica) é dada da seguinte forma:

$$C_{tu} = 3,27 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\phi^4}{\eta \cdot L} \cdot \bar{P} \quad (31a)$$

Antes de detalhar as grandezas da equação acima, é necessário pontuar que está equação, segundo a referência intitulada *Capítulo II: Escoamento de Gases* (“s. d.”, pág. 8), essa equação só é válida para tubulações longas. Para tubulações curtas cilíndricas no escoamento viscoso, deverá ser atribuído um termo de correção, conforme abaixo.

$$C_{tu} = 3,27 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\phi^4}{\eta \cdot L} \cdot \left( \frac{1}{1 + 7,31 \cdot 10^4 \cdot \frac{m \cdot Q}{\eta \cdot T \cdot L}} \right) \cdot \bar{P} \quad (31b)$$

Onde:

- “ $\phi$ ” é o diâmetro da tubulação cilíndrica, [ $cm$ ].

- “ $\eta$ ” é a viscosidade cinemática do gás, [P].
- “ $L$ ” é o comprimento do tubo, [cm].
- “ $\bar{P}$ ” é a pressão média na tubulação, [Torr].
- “ $m$ ” é a massa de gás.
- “ $Q$ ” é a vazão mássica do fluido.
- “ $T$ ” é a temperatura.

Unidade resultante dessas equações: [L/s].

Nesse ponto existem duas considerações a serem feitas. A primeira consideração é que as unidades de medida de algumas grandezas não correspondem ao padrão estabelecido pelo Sistema Internacional de Unidades (S.I.), como é possível notar pelos colchetes após cada grandeza. A segunda consideração é que, segundo a referência mencionada no parágrafo anterior, a inequação que determina se um tubo é longo ou não é descrita da seguinte forma:

$$7,31 \cdot 10^4 \cdot \frac{m \cdot Q}{\eta \cdot T \cdot L} \ll 1 \quad (32)$$

Note que a expressão à esquerda do sinal de menor-maior pertence à Equação 31b. Isso é proposital, pois essa relação foi extraída dessa equação. Devido a essa expressão, quanto maior o comprimento do tubo, mais semelhantes se tornam as equações 31a e 31b, o que justifica a afirmação dada pelo autor.

**g) Condutância do orifício ( $C_{or}$ ).** De maneira análoga ao item anterior, com base na definição dada no item “d”, a condutância do orifício é a capacidade que um orifício possui em conduzir algo. No caso, de conduzir um fluido gasoso. Além disso, sobre a relação com o regime de escoamento, a condutância do orifício possui a mesma dependência da condutância da tubulação mencionada no item anterior. O tipo de formulação da condutância do orifício a ser utilizada depende do regime de escoamento em que o fluido se encontra. Como nesse trabalho o regime de escoamento é o viscoso, a formulação que poderá ser utilizada para o cálculo dessa grandeza é dada por:

$$C_{or} = \frac{9,31}{1-r} \cdot r^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot T}{m \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left(1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \cdot A \quad (33)$$

Onde:

- “ $r$ ” é a razão entre a pressão na bomba de vácuo ( $P_{BV}$ ) e na câmara de vácuo ( $P_{CV}$ ).
- “ $A$ ” é a área de abertura do orifício, [cm<sup>2</sup>].

Essa é a relação mais elementar da condutância do orifício nesse regime de escoamento. Para o ar atmosférico (gás de maior relevância na Tecnologia do Vácuo) a 20 °C, com  $\gamma = 1,44$  e  $m = 29$  g, por exemplo, a formulação da condutância do orifício no regime de escoamento viscoso se dá como:

$$C_{or}^{ar, 20^\circ C} = \frac{76,6}{1-r} \cdot r^{0,712} \cdot \sqrt{(1 - r^{0,286})} \cdot A \quad (34.1)$$

É importante destacar que essa relação só é válida para o valor de  $0,52 \leq r$ . Para o intervalo de  $0,1 \leq r < 0,52$ , deverá ser utilizada a seguinte equação:

$$C_{or}^{ar,20^\circ C} \approx 20 \cdot \frac{A}{1-r} \quad (34.2)$$

Ainda, para o caso especial de  $r < 0,1$ , a expressão que deverá ser utilizada é dada por:

$$C_{or}^{ar,20^\circ C} \approx 20 \cdot A \quad (34.3)$$

Note que somente no último caso (na Equação 34.3) a condutância do orifício não depende da pressão, ao contrário das equações 34.1 e 34.2. Outra consideração que deve ser feita é que, como no item “f”, algumas das grandezas não correspondem ao padrão estabelecido pelo Sistema Internacional de Unidades (S.I.), como pode ser visto pelo colchete presente na descrição das grandezas. Desse modo, a unidade de medida da condutância do orifício dessas expressões é, também, dada em  $[L/s]$ .

**h) Throughput ou taxa de transferência de gás (Q).** Essa grandeza é uma das grandezas mais fundamentais e importantes da Tecnologia do Vácuo e é definida como sendo a quantidade de gás que atravessa e a pressão que esse exerce em uma determinada área de seção transversal ao longo do tempo. Sua formulação é dada como:

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt} \quad (35a)$$

Em uma determinada posição ao longo da linha de bombeamento, outra equação pode ser utilizada:

$$Q = S \cdot P \quad (35b)$$

Onde:

- “S” é a velocidade de bombeamento nessa posição específica.
- “P” é a pressão nessa posição específica.

Unidade:

- $[Pa \cdot m^3/s]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Outras unidades:  $[Torr \cdot L/s]$ ,  $[mbar \cdot m^3/h]$ .

### 2.2.3. Equação Geral dos Gases Perfeitos

Baseado na definição dada na Apostila de Mecânica dos Fluidos da Prof.<sup>a</sup> Maria Helena Rodrigues Gomes (“s. d.”, pág. 5) da UFJF, essa equação é uma forma simplificada de relacionar a pressão, o volume e a temperatura de um gás. Por meio da teórica cinética dos gases, a partir da hipótese do gás perfeito, é possível estabelecer uma constante universal para os gases que possui o seguinte valor segundo o Sistema Internacional de Unidades (S.I.):

$$R = 8,314510$$

Unidade:

- $[N \cdot m \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$  → Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Essa constante é provinda da relação do produto entre a constante de Boltzmann ( $k = 1,38.10^{-23} N.m.K^{-1}$ ) e o número de Avogadro ( $N_0 = 6,02.10^{23} mol^{-1}$ ). A partir dessa relação e com base na Lei de Boyle (que determina que, a uma temperatura constante, a pressão de um gás é inversamente proporcional ao volume específico desse mesmo gás,  $V/m$ ) e na Lei de Charles (que determina que o produto da pressão de um gás pelo volume específico do mesmo é diretamente proporcional à temperatura), foi extraída a seguinte relação:

$$P \cdot \frac{V}{m} = r \cdot T \quad (36)$$

Onde:

- “P” é a pressão do gás.
- “V” é o volume ocupado pelo gás.
- “m” é a massa de gás.
- “T” é a temperatura do gás.
- “r” é a razão entre a constante universal dos gases (R) e a massa molecular do gás (M).

Aplicando a definição da grandeza “r”, a equação toma a seguinte forma:

$$P \cdot \frac{V}{m} = \frac{R}{M} \cdot T \quad (36.1a)$$

Ou, rearranjando as variáveis:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (36.1b)$$

Como a razão entre a massa específica e a massa molar de um gás é igual ao número de mols do gás, a expressão acima fica sendo como:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (36.2)$$

A equação acima é a equação conhecida como sendo a Equação Geral dos Gases Perfeitos ou Equação de Clayperon-Mendeleev.

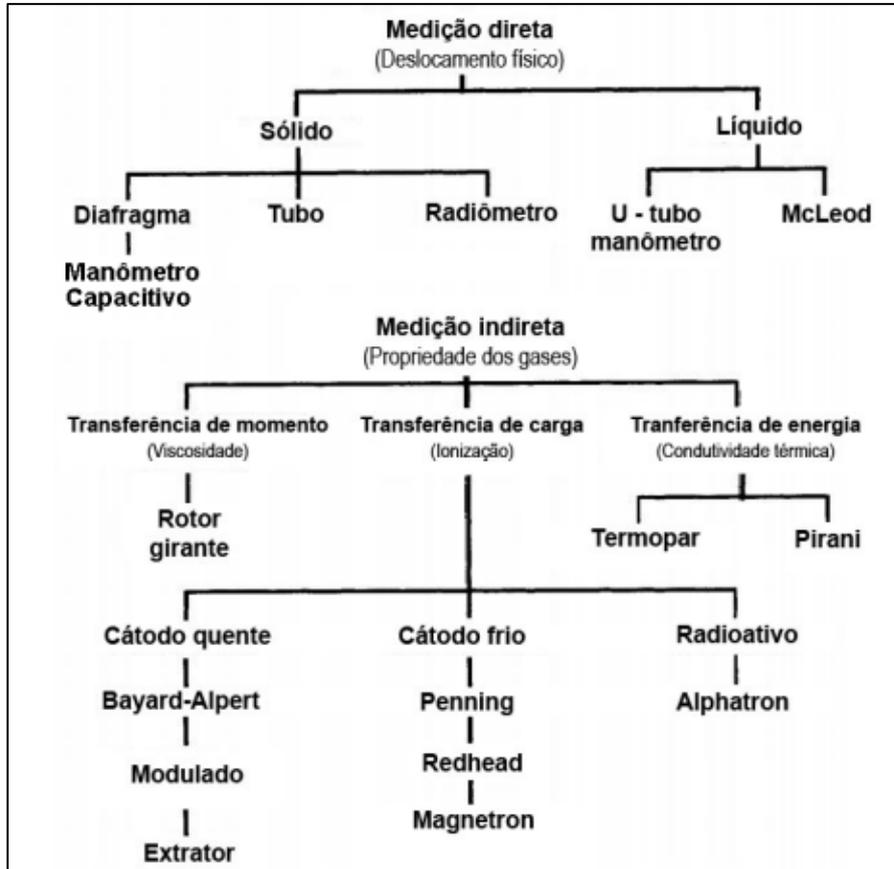
#### **2.2.4. Medidores de Pressão**

Na Tecnologia do Vácuo, como o fator que determina o termo “vácuo” (que é parte da nomenclatura desse campo do conhecimento) é o nível de pressão, é inerente a necessidade e importância de se realizar medições relacionadas a essa grandeza. Para isso, atualmente existem diversos tipos de sensores de pressão que são utilizados dependendo do nível de vácuo de gerado. É importante salientar essa última afirmação, pois os medidores funcionam em faixas de pressão específicas. Se utilizados de forma indevida, esses medidores podem gerar resultados que não condizem com a realidade, por não possuírem sensibilidade e precisão o suficiente, ou até mesmo serem danificados.

Pois bem, a primeira divisão que pode ser feita acerca desse assunto é no tipo de medição em que cada um dos medidores são baseados. Existem dois tipos fundamentais de medição: por método indireto de medida e por método direto de

medida. A fim de gerar um maior esclarecimento sobre esse tema e para apresentar de maneira mais didática o que significa esses tipos de medição e os medidores que compõe esses grupos, abaixo será posta uma figura esquemática (Figura 20) que indica justamente quais medidores pertencem a cada uma dessas categorias.

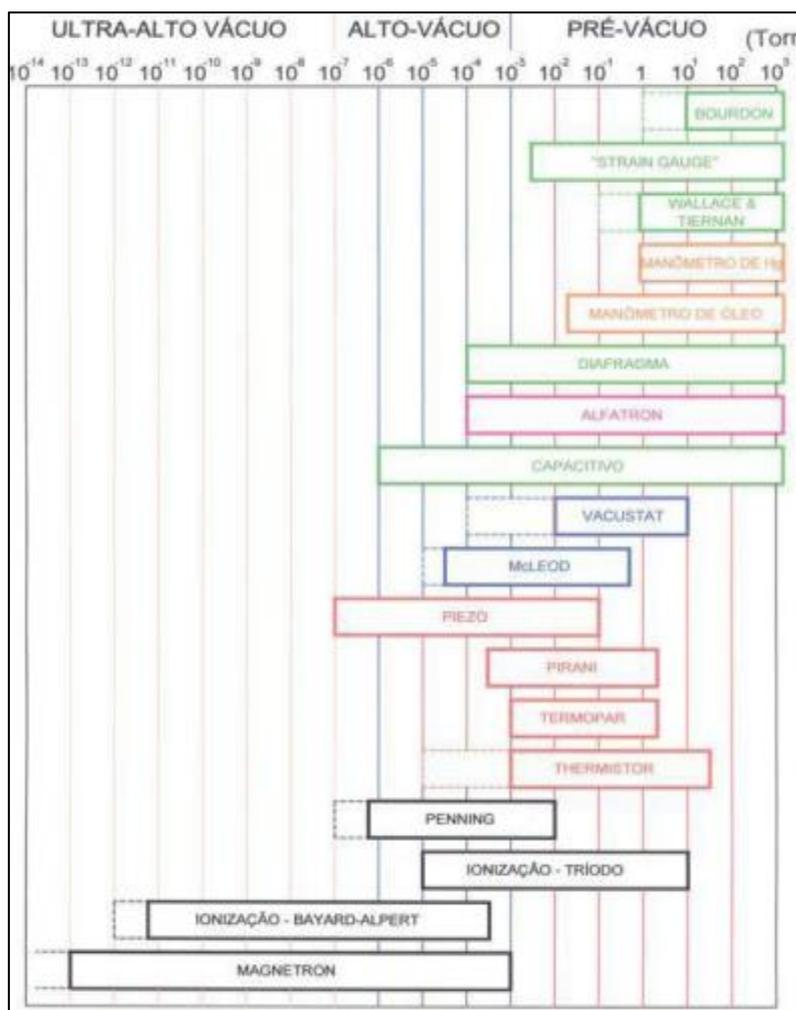
Figura 20. Divisão geral dos medidores de pressão.



Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

Além da divisão acima, outra maneira de diferenciar os medidores de vácuo (os vacuômetros), como mencionado, é por meio da faixa de pressão ao qual cada um é capaz de realizar a medição. Essa divisão está relacionada com as nomenclaturas utilizadas na subseção 2.2.1 e será descrita, a fim de dinamizar a explicação acerca desse tema, pela figura (Figura 21) a seguir:

Figura 21. Medidores e suas diferentes faixas de operação.



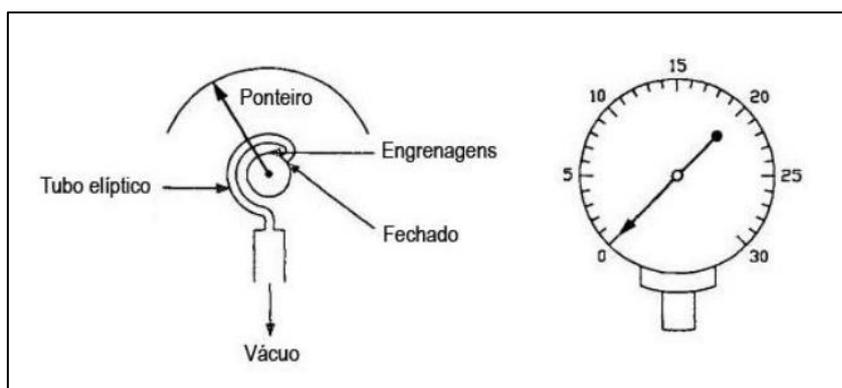
Fonte: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/49722/mod\\_resource/content/1/Aula%20Inaugural.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/49722/mod_resource/content/1/Aula%20Inaugural.pdf).

Vista as divisões acima, nas subseções seguintes, internas a essa subseção, serão abordados os tipos de medidores de pressão de uso mais corriqueiro nas aplicações em sistemas de pré-vácuo, já que este é a região de trabalho desse estudo. Além disso, é necessário salientar que as explicações sobre esses medidores foram baseadas na Dissertação de Mestrado de Paiva (2010) intitulada *Aplicação da tecnologia do vácuo em projeto de engenharia de precisão*.

#### 2.2.4.1. Vacuômetro de Bourbon

Esse medidor é baseado em um princípio de deformação de um tubo metálico fino. Como será observado na figura a seguir (Figura 22), no interior do medidor há um orifício que realiza a conexão com a câmara de vácuo, um tubo elíptico e, conectado a este, um ponteiro.

Figura 22. Medidor Bourbon.



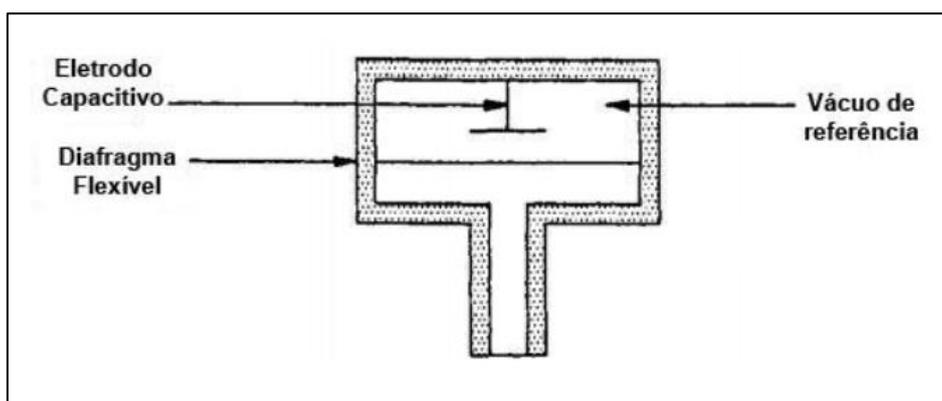
Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

Ao realizar o procedimento de evacuação, o tubo elíptico, devido à diferença de pressão entre a região conectada à câmara de vácuo e a região externa ao tubo, sofre uma deformação. Essa deformação promove o movimento angular do ponteiro, o que, conseqüentemente, realiza a indicação da pressão. Uma informação importante que deve ser destacada é que, segundo Hoffman et al. (1994) Apud Paiva (2010, pág. 53), esse medidor, devido ao seu princípio de funcionamento simples, não possui sensibilidade o suficiente para realizar medições em pressões mais baixas. Ainda, segundo Hoffman et al. (1994) Apud Paiva (2010, pág. 53), esses medidores são utilizados em geral na obtenção de pressões aproximadas, podendo ser melhorados através de um sistema mecânico mais elaborado ou até mesmo com o auxílio de circuitos eletrônicos de correção, além de, se confeccionados com os materiais certos, poderem também realizar medições em sistemas com gases corrosivos.

#### 2.2.4.2. Vacuômetro de Membrana Capacitiva

O princípio de funcionamento desse medidor é baseado no efeito de variação da capacitância e que será melhor explicado após a figura esquemática do dispositivo em corte (Figura 23) posta a seguir:

Figura 23. Medidor de membrana capacitiva.



Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

Existem dois tipos de medições possíveis de serem realizadas com esse tipo de medidor: medição da pressão absoluta e medição da pressão relativa. Antes de explicar o porquê de haver essa diferença é necessário explicar o princípio de funcionamento desse medidor. Como é possível visualizar pela figura referente ao medidor (Figura 23), o mecanismo de funcionamento desse medidor é baseado no arranjo de: uma câmara

interna (a qual a pressão local é pressão conhecida), um diafragma flexível, uma cavidade para a conexão do dispositivo com a câmara de vácuo e um eletrodo capacitivo. O diafragma flexível na verdade é uma membrana condutora que, conforme a variação da pressão, é deslocada positiva ou negativamente em relação ao eletrodo fixo. Esse deslocamento gera uma variação da capacitância desse circuito que é proporcional à variação de pressão, o que permite determinar, por meio de um sistema de leitura, a pressão do sistema de vácuo. A afirmação posta no início desse parágrafo, que menciona a capacidade do medidor de realizar dois diferentes tipos de medida, é justificada pelo seguinte: como há uma câmara interna no interior do instrumento e como a pressão nessa câmara é conhecida, é possível optar eletronicamente se será ou não considerada essa pressão, podendo assim realizar a variação do tipo de medida ao qual se deseja utilizar. Um ponto importante que deve ser mencionado é que, segundo O'Hanlon (2003) Apud Paiva (2010, pág. 54), se for mensurada a pressão, por meio desse medidor, em um ambiente em que o fluido gasoso seja um vapor orgânico pesado ou um gás ionizado poderá haver um erro de cerca de 0,5% no valor medido.

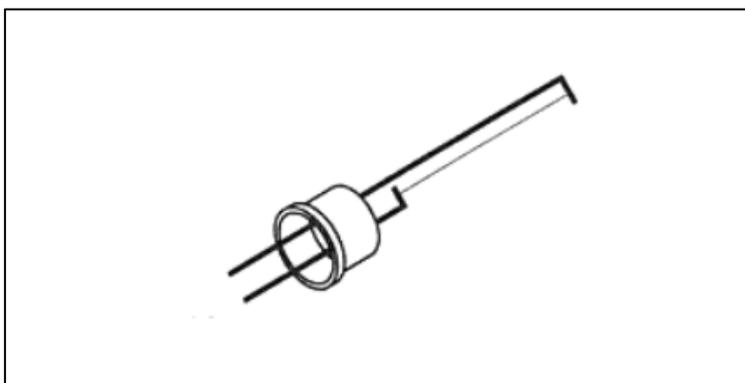
Antes de finalizar essa subseção, vale ressaltar que esse será o medidor de pressão utilizado na determinação da pressão desse trabalho.

#### **2.2.4.3. Medidor Pirani**

Os medidores apresentados até este momento são baseados no princípio de medição direta, por deslocamento físico. Entretanto, agora será apresentado um medidor, que, inclusive, é um dos mais conhecidos na realização da medição de pressão em sistemas de pré-vácuo, que utiliza o princípio de medição por via indireta, através do fenômeno de transferência de calor. Esse é o vacuômetro Pirani que mensura o valor da pressão por meio de cálculos matemáticos a partir de outras características do ambiente (PAIVA, 2010). Detalhando melhor, esse instrumento de medição é baseado na condutividade térmica do gás utilizado.

Em regimes de escoamento viscoso, em geral, a condutividade térmica é dependente apenas do grau de viscosidade do fluido. Em pressões mais baixas, por conta do aumento do livre caminho médio, a condutividade térmica passa a estar correlacionada com a pressão exercida no sistema (MOUTINHO et al, 1980 Apud PAIVA, 2010, pág. 55). Partindo desse princípio, segundo Lafferty (1998) Apud Paiva (2010, pág. 55), foi confeccionado um medidor, o medidor Pirani, que possui como estrutura de medição um filamento aquecido e um tubo que envolve lateralmente esse filamento (Figura 24).

Figura 24. Vacuômetro Pirani.

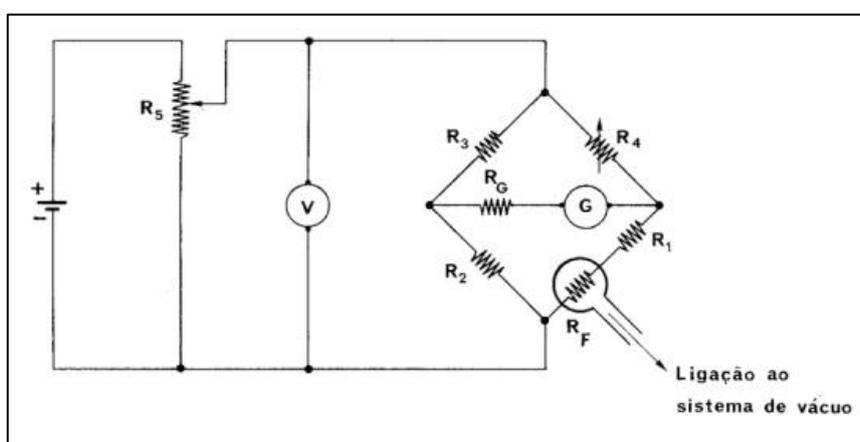


Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

A resistência desse filamento varia conforme a taxa de transferência de calor (que é dependente da quantidade de moléculas que se chocam com ele) e define a condutividade térmica do gás. Esse último ponto é importante, pois a partir dele é possível afirmar que a taxa de transferência de calor não será a mesma se o gás utilizado for alterado, devido à variação da densidade do gás etc. Como a mistura gasosa do ar atmosférico é o tipo de fluido mais comum nos sistemas de vácuo, grande parte dos equipamentos são calibrados para ele. Entretanto, junto aos medidores Pirani estão presentes fatores de conversão para o uso desse dispositivo em sistemas com outros tipos de gases.

A medição da variação da resistência do filamento aquecido é feita por meio de um circuito eletrônico baseado na Ponte de Wheatstone, onde um dos resistores é o vacuômetro Pirani (Figura 25).

Figura 25. Circuito eletrônico da Ponte de Wheatstone utilizada na medição da variação da resistência do filamento do medidor Pirani.



Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

A diminuição da pressão acarreta no aumento da resistência do filamento, e vice-versa, o que faz com que o circuito de Ponte de Wheatstone entre em desequilíbrio. Esse desequilíbrio permite com que, a partir de um valor de pressão pré-definido, seja possível determinar tanto a pressão absoluta do sistema quanto a pressão relativa à essa predeterminação (que seria, no caso, o estado de equilíbrio do circuito). O uso desse medidor é na faixa de médio vácuo.

### 2.2.5. Bombas de Vácuo

Passada a subseção dos medidores de pressão, agora será abordado outro pilar fundamental desse campo do conhecimento: o mecanismo de geração de vácuo, as bombas de vácuo. Elas estão separadas em uma divisão baseada em dois grupos operacionais: as **bombas de deslocamento de gás** (aquelas que possuem exaustão externa ao equipamento) e as **bombas de fixação** (aquelas que realizam o aprisionamento do gás em seu interior). Semelhante à anterior, essa subseção será baseada na Dissertação de Mestrado de Paiva (2010) intitulada *Aplicação da tecnologia do vácuo em projeto de engenharia de precisão* e também na apostila de Gama (2002) intitulada *Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo*.

Iniciando a explicação acerca desse tema, o primeiro grupo que rege uma porção das bombas de vácuo, o grupo das bombas de deslocamento, pode ser subdividido com base em três princípios de funcionamento diferentes:

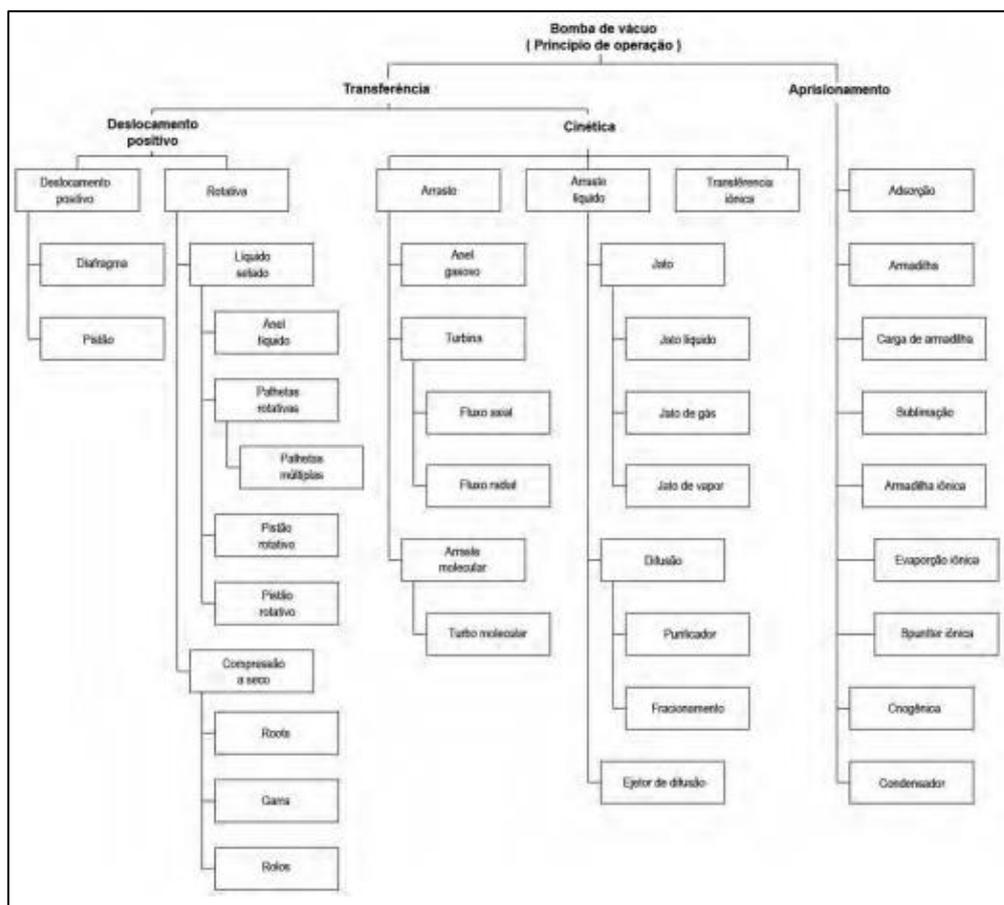
- a) **Princípio 1:** variação do volume interno da câmara de bombeamento a partir da compressão e expansão desse volume. Bombas comuns: bomba mecânica de palhetas rotativas, bomba de pistão rotatório.
- b) **Princípio 2:** transferência de gás de uma região de baixa pressão para uma região de alta pressão com volume interno fixo. Bombas comuns: bomba turbomolecular, bomba roots.
- c) **Princípio 3:** bombeamento por arrasto, viscosidade ou difusão. Bombas comuns: bombas difusoras, bombas ejetoras de vapor.

O outro grupo que abrange a porção restante das bombas de vácuo, o grupo das bombas de fixação, por outro lado, pode ser subdividido com base em somente dois princípios de funcionamento:

- a) **Princípio 1:** aprisionamento do fluido gasoso através de processos físico-químicos. Bombas comuns: bomba iônica e bomba de aprisionamento químico.
- b) **Princípio 2:** aprisionamento por meio da extrema diminuição de temperatura. Bombas comuns: bomba criogênica, bomba de adsorção.

Para abordar esse tema de maneira mais visual, abaixo será posta uma figura (Figura 26), que ilustra de forma esquemática os diferentes grupos que compõem as bombas de vácuo.

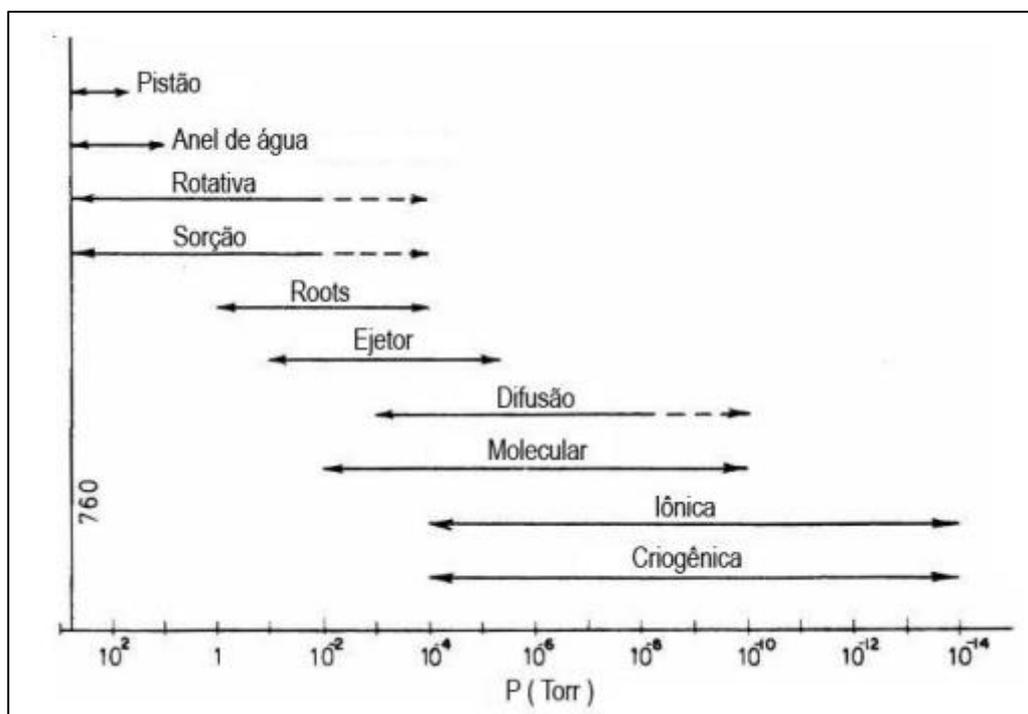
Figura 26. Divisão das bombas de vácuo pelos seus princípios de funcionamento.



Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

Além dessa, outra divisão que pode ser feita é a classificação dos tipos de bombas em relação às suas faixas de operação. Isso porque, de maneira análoga aos medidores de pressão (subseção 2.2.4), cada uma das bombas de vácuo possuem princípios de funcionamento diferentes que são dependentes, por exemplo, do regime de escoamento em que o fluido gasoso se encontra. Segue abaixo a figura referente a esse tipo de classificação (Figura 27).

Figura 27. Classificação das bombas de vácuo em relação as suas faixas de pressão de operação.



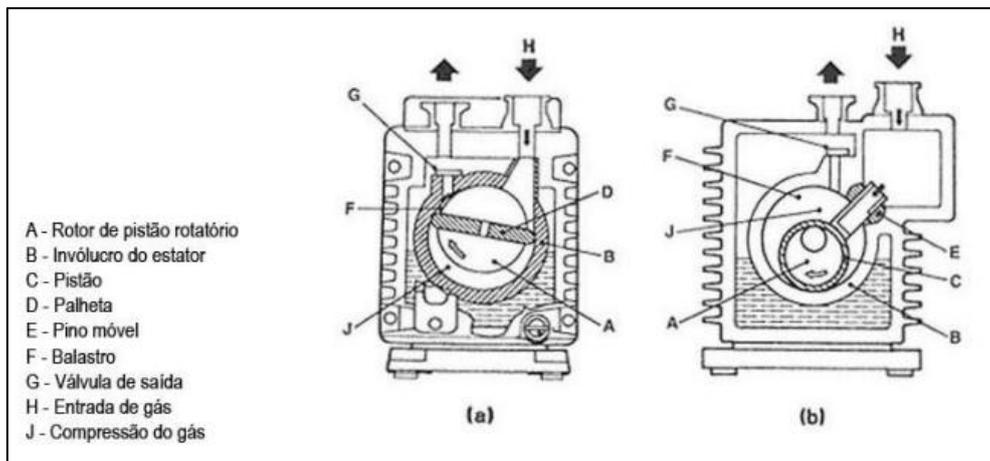
Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

A fim de adentrar um pouco mais nos mecanismos de funcionamento individuais de cada uma das bombas de vácuo, nas subseções seguintes, intrínsecas a essa, serão detalhadas as bombas de pré-vácuo mais comuns e utilizadas na indústria.

### 2.2.5.1. Bomba Mecânica de Palhetas

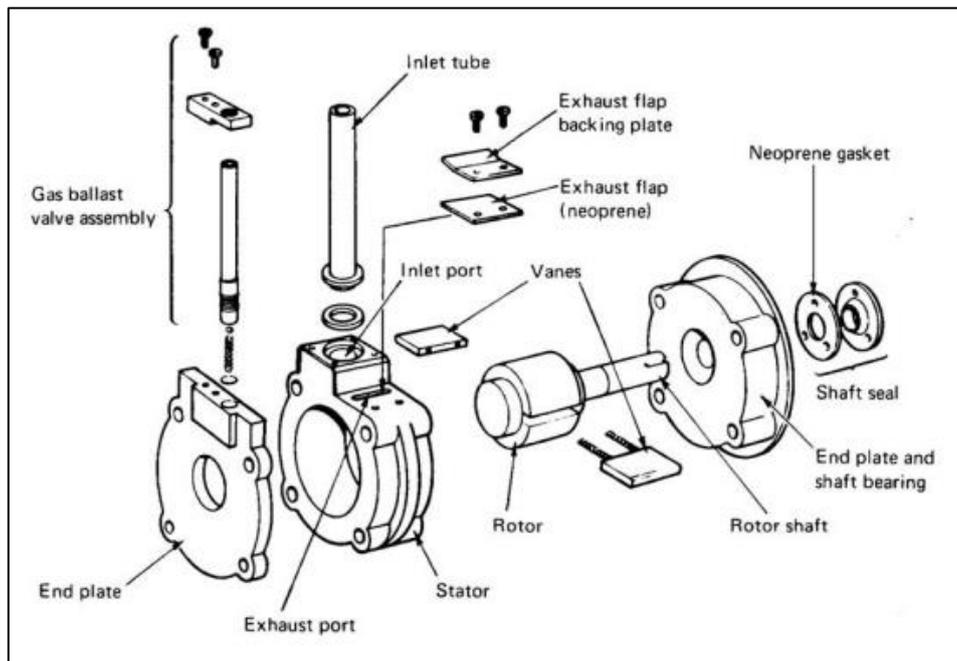
A constituição base desse tipo de bomba parte do arranjo onde há um estator cilíndrico e um rotor excêntrico, ambos fabricados em aço. Nesse rotor são encaixadas duas hastes (palhetas) com molas em uma fenda diametral. Essas palhetas possuem a função de comprimir e rarefazer o gás interno ao estator por meio da rotação em eixo do rotor. O estator possui dois orifícios: um de entrada (que é conectado à câmara de vácuo) e outro de saída (para a exaustão). O orifício de saída possui uma comporta/válvula que só se abre se houver pressão suficiente, isto é, ligeiramente acima da pressão atmosférica, no volume interno do estator. Esse conjunto (estator + orifício de saída) são submersos em um óleo próprio para essas bombas de vácuo. As funções desse óleo são duas: gerar lubrificação, a fim de diminuir o atrito gerado entre as hastes e as paredes do estator, e realizar uma vedação durante o processo de funcionamento da bomba mecânica. A seguir será posta uma ilustração de uma bomba mecânica de palhetas e uma bomba de pistão rotatório (que possui o mesmo princípio de funcionamento da de palhetas) em corte (Figura 28) e outra ilustração de uma bomba mecânica de palhetas em vista explodida (Figura 29).

Figura 28. Perspectiva em corte transversal de uma bomba mecânica de palhetas (a) e uma bomba de pistão rotatório (b).



Fonte: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf>.

Figura 29. Bomba mecânica de palhetas em vista explodida.



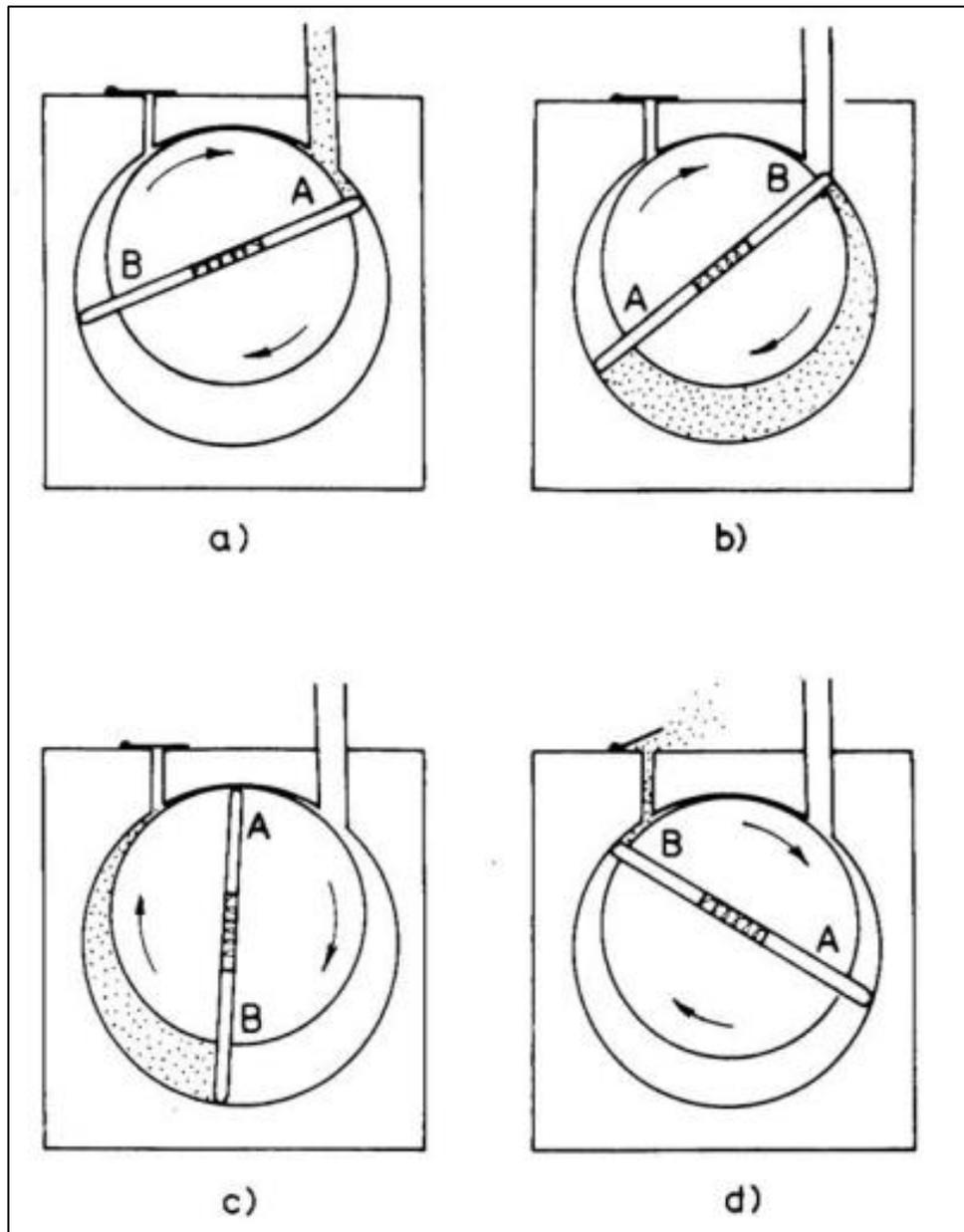
Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

Como é possível visualizar na Figura 28, o posicionamento do rotor e do estator é feito de tal maneira para que ambos permaneçam o mais próximo possível, mas sem se tocarem de fato. Esse arranjo é feito dessa maneira, pois ele gera uma separação entre as regiões divididas pelas palhetas durante o processo de rotação. É importante lembrar que esse vão entre o estator e o rotor e a região entre a ponta da palheta e as paredes internas do estator são preenchidos por uma fina camada do óleo antes mencionado, o que garante a vedação do sistema.

A região do volume interno do estator pode ser dividida em duas: uma região de compressão (alta pressão) e uma região de rarefação (baixa pressão). No início do processo de bombeamento, as palhetas, ao realizarem o movimento de rotação, geram uma região de baixa de pressão devido à variação positiva do volume disponível. Realizando isso, devido ao efeito probabilístico, há uma migração das moléculas de gás

presentes no interior da câmara de vácuo para essa região. Admitidas as moléculas de gás que estavam presentes na câmara de vácuo, continuando o processo de rotação, a palheta oposta ultrapassa o vão do orifício de entrada isolando aquele volume de gás. Rotacionando mais um pouco o efeito contrário ocorre. Devido à diminuição do volume em que o gás isolado se encontra, haverá um aumento na pressão interna desse volume. Devido à diferença de pressão entre essa região e o meio externo, o gás presente no interior do estator é exaurido para fora do sistema. Abaixo será posta uma figura (Figura 30) que ilustra o processo de funcionamento dessa classe de bombas de vácuo.

Figura 30. Funcionamento do processo de bombeamento de uma bomba mecânica de palhetas.

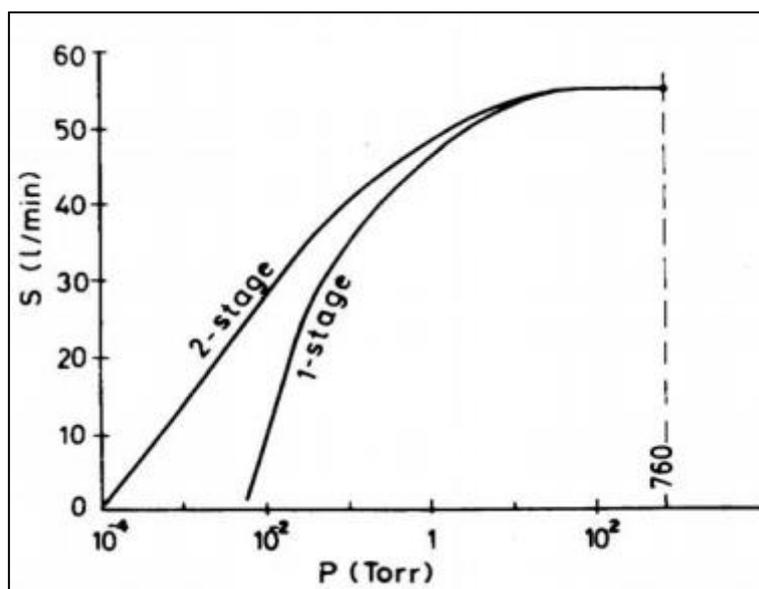


Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

As bombas rotativas possuem, geralmente, uma elevada capacidade de compressão, cerca de  $10^5$  vezes. Por conta disso, esses tipos de bomba conseguem realizar o processo de bombeamento de grandes quantidades de gás de forma bastante

efetiva. Entretanto, justamente por isso, um problema acaba sendo gerado. Devido a essa elevada taxa de compressão, no final do percurso do bombeamento (Figura 30d), o gás bombeado poderá sofrer condensação. Esse efeito de condensação faz com que a eficiência de bombeamento desses tipos de bomba seja diminuída e pode até reduzir a vida-útil do óleo presente no interior dessas bombas de vácuo. Uma solução para esse problema foi o desenvolvimento do *Gas Ballast* (Lastro de Gás), que será detalhado em sequência ao gráfico que demonstra a faixa de pressão de operação efetiva desse tipo de bomba de vácuo (Gráfico 1).

Gráfico 1. Faixa de pressão de operação da bomba mecânica de palhetas com 1 e 2 estágios.



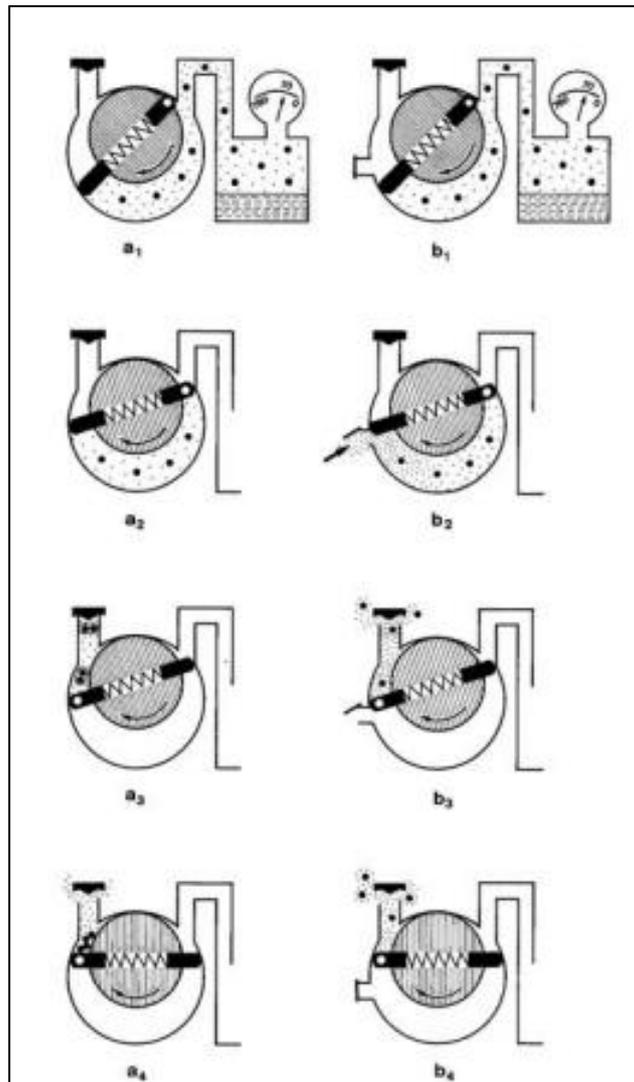
Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

- **Gas Ballast ou Lastro de Gás**

Como mencionado, devido à elevada taxa de compressão das bombas rotativas, o gás bombeado poderá acabar condensando no final do percurso do processo de bombeamento. Esse gás condensado fará com que não seja atingida a pressão final para a exaustão e, ainda, poderá se misturar no óleo lubrificante, o que diminuirá a performance da bomba de vácuo. Para resolver esse problema, em 1935, Wolfgang Gaede, físico alemão pioneiro na Tecnologia do Vácuo, introduziu um dispositivo, denominado lastro de gás, que possui a finalidade de prevenir a condensação de vapores durante o estágio de compressão (GAMA, 2002).

Esse dispositivo é na verdade uma válvula que é aberta à atmosfera após o isolamento do volume de gás vindo do interior da câmara de vácuo. Esse mecanismo permite a entrada do ar externo nessa região e, por conta disso, acaba reduzindo a taxa de compressão da bomba mecânica. Essa tecnologia fez com que fosse possível realizar o processo de bombeamento de gases condensáveis por meio desses tipos de bomba de vácuo, mas com a redução da pressão mínima possível de ser atingida. A seguir será posta uma figura (Figura 31) que mostra a comparação de uma bomba mecânica com (porção “b”) e sem (porção “a”) o lastro de gás.

Figura 31. Representação do processo de bombeamento de uma bomba mecânica com (b) e sem (a) lastro de gás.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

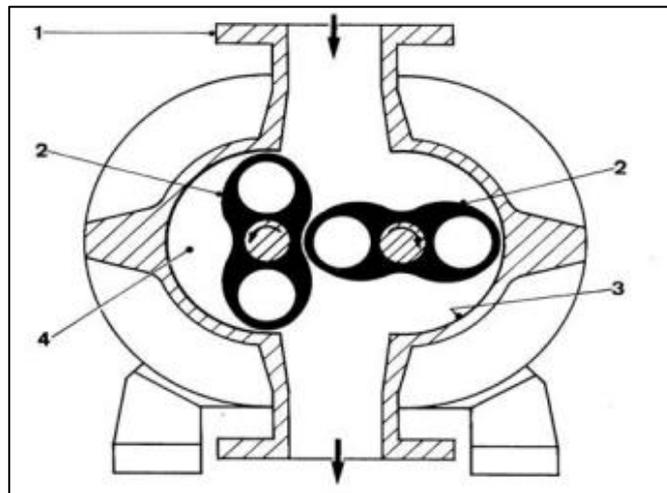
Para finalizar essa subseção referente à bomba mecânica de palhetas, é necessário pontuar que esta será a bomba de vácuo utilizada nesse trabalho.

### 2.2.5.2. Bomba Roots

Este é um tipo de bomba de vácuo da classe de bombas secas. Essa classe de bombas é denominada assim por não usar óleo na câmara de bombeamento. As bombas roots (Figura 32), segundo Gama (2002), foram de extrema importância tanto historicamente quanto tecnologicamente para a Tecnologia do Vácuo. Essas bombas são utilizadas geralmente em conjunto com outras bombas de apoio (bomba mecânica de palhetas, por exemplo), já que propiciam um aumento da performance do sistema de vácuo, através da diminuição da pressão mínima possível de ser atingida e pelo aumento da velocidade de bombeamento do conjunto de bombas de vácuo. Quando de um estágio, essas bombas de vácuo podem aumentar o intervalo de pressão para uma faixa de até  $10^{-3}$  Torr (médio vácuo) e, quando de dois estágios, essas bombas de vácuo podem aumentar o intervalo de pressão para o valor de até  $10^{-6}$  Torr (alto vácuo). Segundo o autor: “O princípio de funcionamento das bombas Roots permite a construção de sistemas de bombeamento de altíssimas velocidades de bombeamento,

até  $100\,000\text{ m}^3/h$ , que são mais econômicos que, por exemplo, bombas ejetoras de vapor para trabalho no mesmo intervalo de pressões.” (GAMA, 2002).

Figura 32. Bomba roots com vista em corte.

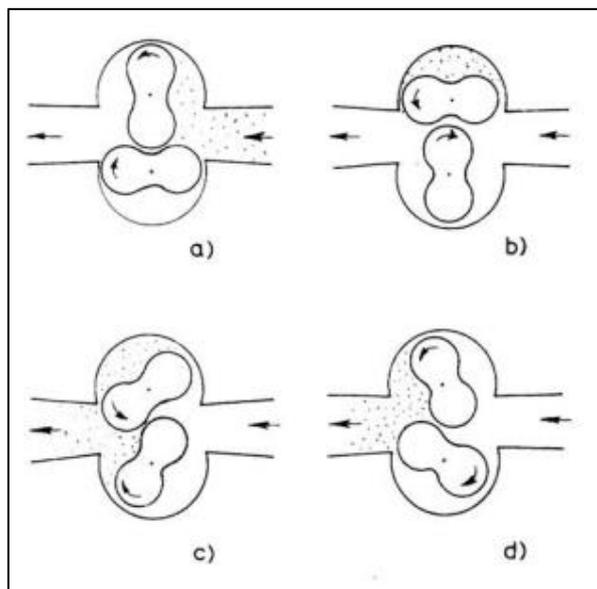


Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

Partindo para o mecanismo de funcionamento, a bomba roots é uma bomba rotativa de deslocamento físico onde há a presença de um estator (Figura 32.3) e dois rotores com formato em “oito” (Figura 32.2). Esses rotores, como é possível visualizar pela figura acima (Figura 32), possuem movimento rotacional oposto e defasado em  $90^\circ$  um em relação ao outro, possuindo a mesma separação entre si ao longo do processo de bombeamento ( $\sim 0,1\text{ mm}$ ).

O interessante dessa bomba é que, diferentemente da bomba mecânica de palhetas selada a óleo, não há contato em nenhum momento entre as partes que a compõem (Figura 33). Isso é uma tremenda vantagem, pois, além de não necessitar de nenhum óleo lubrificante para realizar seu acionamento, isso permite com que o equipamento possa trabalhar em altas velocidades de rotação e prolonga o tempo de vida das peças.

Figura 33. Mecanismo de funcionamento da bomba roots.

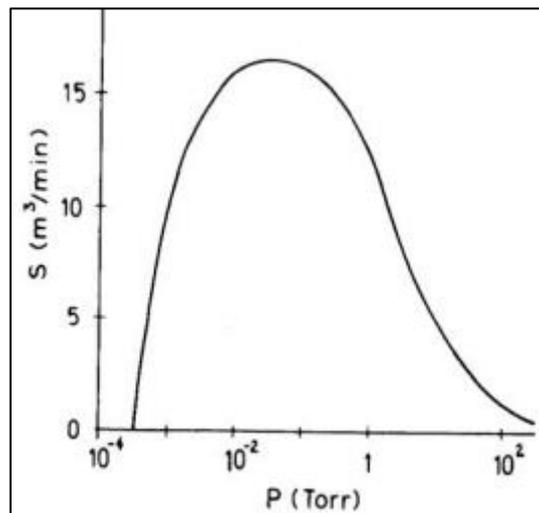


Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

Visualizando a ilustração acima (Figura 33), é possível notar que o mecanismo de funcionamento das bombas roots é muito similar ao mecanismo de funcionamento das bombas de palhetas rotativas. Entretanto, devido a inexistência do contato entre as peças no interior da câmara de bombeamento, esse tipo de bomba de vácuo sofre com o problema de retro-migração de gás, que é muito significativo em faixas onde a pressão é mais elevada.

Por conta desse fato, a taxa de compressão dessas bombas é comprometida, o que faz com que essas tenham que operar em conjunto com outras bombas de apoio, como mencionado anteriormente. A seguir será posta a curva da velocidade de bombeamento em função da pressão desse tipo de bomba (Gráfico 2) que determina a faixa de trabalho em que esta bomba de vácuo opera.

Gráfico 2. Faixa de pressão de operação da bomba roots.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf>.

Em faixas de pressão mais elevadas, a taxa de compressão das bombas roots pode atingir valores de no máximo 3 vezes. Ao diminuir a pressão, na faixa de  $\sim 1$  Torr, as bombas roots podem atingir ou ultrapassar uma taxa de compressão de 50 vezes. Por esse fator é possível notar que o funcionamento desse tipo de bomba de vácuo é diferente dos demais, já que este tipo de bomba possui uma taxa de compressão variável, que depende tanto da pressão de entrada (da câmara de vácuo, no caso) quanto da pressão presente no interior da bomba de apoio (GAMA, 2002).

### 3. Procedimento Experimental

Antes de adentrar na explicação acerca dos métodos utilizados na confecção desse trabalho e na análise de dados, é preciso destacar os materiais e instrumentos que foram utilizados nesse projeto.

#### 3.1. Materiais Utilizados

- a) 2 (dois) tubos cilíndricos [60 mm ext x 54 mm int x 3 mm esp x 2 m], material: acrílico.

Figura 34. Ilustração de alguns tubos de acrílico.



Fonte: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1357418904-tubo-acrilico-cano-cristal-100mm-x-2mm-esp-x-1mt-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1357418904-tubo-acrilico-cano-cristal-100mm-x-2mm-esp-x-1mt-_JM).

- b) 2 (duas) flanges para acomodação do anemômetro, material: filamento de PLA.

Figura 35. Fotografia do flange de acomodação do anemômetro.



Fonte: próprio autor.

**c)** 4 (quatro) flanges de interligação e acoplamento, material: filamento de PLA.

Figura 36. Fotografia do flange de acoplamento.



Fonte: próprio autor.

**d)** 4 (quatro) suportes para os tubos de acrílico, material: filamento de PLA.

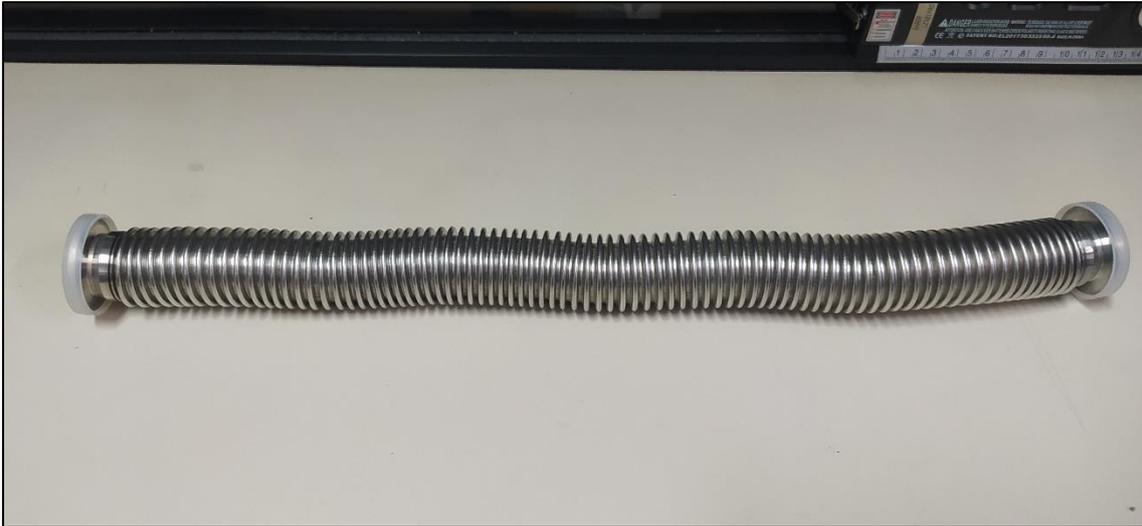
Figura 37. Fotografia do suporte mecânico dos tubos de acrílico.



Fonte: próprio autor.

- e) 1 (um) fole metálico, material: aço inox.

Figura 38. Fotografia do fole metálico.



Fonte: próprio autor.

- f) 4 (quatro) anéis de vedação, O'rings [54 mm int x 6 mm esp], material: borracha nitrílica.

Figura 39. Exemplos de anéis de vedação do tipo O'rings.



Fonte: <https://www.retenlins.com.br/anel-oring/>.

### 3.2. Instrumentação Utilizada

- a) 1 (um) anemômetro digital MDA-20, fabricante: Minipa.

Figura 40. Anemômetro digital Minipa MDA-20.



Fonte: próprio autor.

- b) 1 (uma) bomba mecânica de palhetas rotativas [ $v_{nominal} = 11,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ], fabricante: Leybold GmbH.

Figura 41. Fotografia da bomba mecânica de palhetas selada a óleo utilizada nesse projeto.



Fonte: próprio autor.

c) 1 (um) medidor de pressão de membrana capacitiva, fabricante: Brooks.

Figura 42. Medidor de pressão de membrana capacitiva Brooks.



Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/brooks-instrument/product-14565-2248128.html>.

### 3.3. Métodos

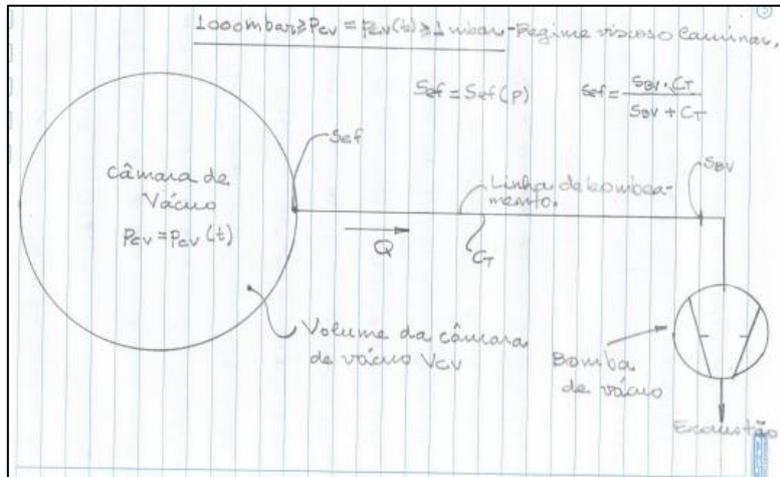
Como mencionado no início deste documento, o objetivo desse trabalho é realizar a correlação entre a Mecânica dos Fluidos e a Tecnologia do Vácuo. O método em si que realizará a correlação de forma empírica dessas áreas do conhecimento parte da velocidade de escoamento do fluido utilizado, no caso, do ar atmosférico. Porém, antes de entrar em maiores detalhes, é necessário demonstrar como que essa correlação é feita a partir de um modelamento teórico. Essa correlação, como mencionado brevemente, se dará através de duas grandezas fundamentais de cada uma dessas áreas: o *throughput* (Tecnologia do Vácuo) e a vazão (Mecânica dos Fluidos). A faixa de pressão adotada para este trabalho é de  $10^{-3} < P < 760$  [Torr] (baixo/médio vácuo). Isso pois, as formulações que regem a Mecânica dos Fluidos são válidas somente para níveis de pressão dessa faixa para mais elevados, o que inviabiliza a análise em intervalos de níveis de pressão menor.

#### 3.3.1. Metodologia Teórica

A partir do que foi introduzido sobre o procedimento experimental e com base nos detalhes iniciais apresentados, a seguir serão demonstradas as etapas passo-a-passo que foram feitas para efetuar essa correlação entre a Mecânica dos Fluidos e a Tecnologia do Vácuo teoricamente. É importante mencionar que as referências dessa subseção são o texto a ser publicado pelo Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, intitulado como *Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar – 1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo*, e o documento utilizado como projeto de inscrição desse trabalho no programa de fornecimento da bolsa de iniciação científica (Bolsa-Pibic), concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), intitulado como *Sistema de medição e tratamento de dados experimentais de taxa de transferência de gás (throughput) com a formulação da tecnologia do vácuo e mecânica dos fluidos*.

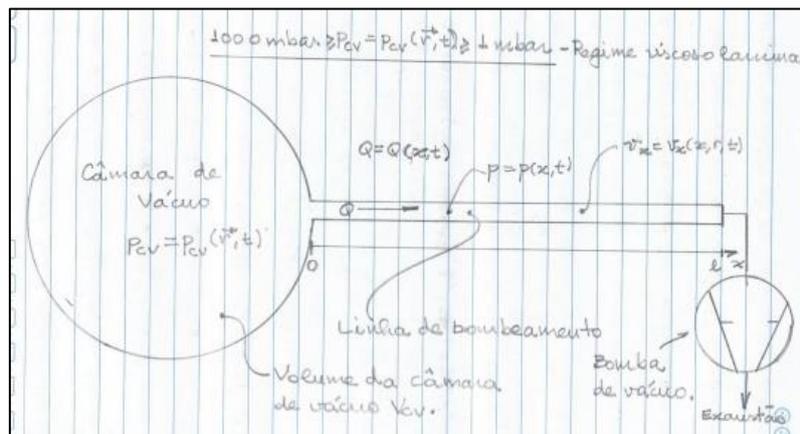
Dito isso, primeiramente será feita a modelagem de um sistema de vácuo simples com base nas formulações da Tecnologia do Vácuo (Figura 43) e, em seguida, da Mecânica dos Fluidos (Figura 44).

Figura 43. Sistema de vácuo modelado a partir da Tecnologia do Vácuo.



Fonte: Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar – 1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo (DEGASPERI, pág. 6).

Figura 44. Sistema de vácuo modelado a partir da Mecânica dos Fluidos.



Fonte: Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar – 1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo (DEGASPERI, pág. 7).

Partindo da figura que ilustra a modelagem feita a partir da Tecnologia do Vácuo (Figura 43), a equação que rege a pressão no interior da câmara de vácuo é dada como:

$$V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} = -S_{ef} \cdot P_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (37)$$

Onde:

- “ $V_{CV}$ ” é o volume da câmara de vácuo, [L].
- “ $P_{CV}(t)$ ” é a pressão na câmara de vácuo em função do tempo, [Torr].
- “ $S_{ef}$ ” é a velocidade efetiva de bombeamento, [L/s].

- " $\sum_{i=1}^n Q_i$ " é o somatório da taxa de transferência de gás (*throughput*) na câmara de vácuo, [Torr.L/s].

O primeiro parâmetro que deve ser mencionado de início é que nessa equação  $P_{CV}(0) = P_{atm}$ .

Como já apresentado na subseção 2.2.2 no item "c", a velocidade efetiva de bombeamento,  $S_{ef}$ , é a relação entre a razão do produto pela soma da velocidade de bombeamento da bomba de pré-vácuo (podendo ser, em outros casos, do conjunto de bombas),  $S_{BV}$ , e a condutância total,  $C_T$ , conforme abaixo:

$$S_{ef} = \frac{S_{BV} \cdot C_T}{S_{BV} + C_T} \quad \{27\}$$

Adentrando ainda mais nessa equação, é possível verificar que a condutância total possui a mesma estrutura de relação das variáveis da equação acima. Porém, diferentemente dessa equação, é claro, essa relação é baseada nas condutâncias da tubulação e do orifício entre a câmara de vácuo e a linha de bombeamento. Essa relação já foi apresentada na subseção 2.2.2 no item "e" e será descrita novamente a seguir:

$$C_T = \frac{C_{tu} \cdot C_{or}}{C_{tu} + C_{or}} \quad \{30\}$$

Como mencionado ao longo desse texto, as condutâncias tanto da tubulação quanto do orifício dependem do regime de escoamento em que o fluido utilizado se encontra. Anteriormente foi afirmado que o regime de escoamento do fluido é dado como viscoso, portanto, a seguir serão realizados os cálculos que confirmarão essa afirmação antes posta.

Antes de utilizar a equação do número de Knudsen ( $N_k$ ), que determinará o regime de escoamento do fluido, é necessário primeiramente determinar o livre caminho médio das moléculas do gás utilizado (ar atmosférico) nesse arranjo. Para realizar esse cálculo, a equação que poderia ser utilizada é a do livre caminho médio que foi apresentada anteriormente na subseção 2.2.2 item "a". Entretanto, com o intuito de facilitar a análise, a equação que será utilizada é a equação do livre caminho médio em função da pressão, que já está fundamentada para o ar atmosférico a uma temperatura de 20 °C, descrita a seguir:

$$\lambda_{ar}^{20^\circ C} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{P} \quad (38)$$

Calculando o livre caminho médio para o intervalo de análise desse trabalho, obteve-se o seguinte:

$$\boxed{6,58 \cdot 10^{-6} < \lambda_{ar}^{20^\circ C} < 5 [cm]}$$

Em posse da faixa de valores que o livre caminho médio do ar atmosférico nesse intervalo de pressão pode variar, o cálculo para determinação do número de Knudsen poderia, também, ser realizado a partir da Equação 26 apresentada na subseção 2.2.2 item "b". Entretanto, a partir da relação apresentada na Equação 38, é possível extrair outro método para determinar o número de Knudsen, conforme abaixo:

$$N_k^{ar,20^\circ C} = D \cdot \bar{P} \quad (39)$$

Onde:

- “ $D$ ” é a dimensão típica da linha de bombeamento, no caso desse trabalho, o diâmetro de seção do tubo, [cm].

- “ $\bar{P}$ ” é a pressão média na linha de bombeamento, [Torr].

A partir dessa nova relação para calcular o número de Knudsen, a parametrização para determinar o regime de escoamento do fluido é definida agora como:

Tabela 4. Relação do número de Knudsen para o ar atmosférico a uma temperatura de 20 °C.

$5.10^{-1} < N_k^{ar,20^\circ C}$	Viscoso
$5.10^{-3} < N_k^{ar,20^\circ C} \leq 5.10^{-1}$	Intermediário
$N_k \leq 5.10^{-3}$	Molecular

Ciente dessa nova relação do número de Knudsen para o caso do ar atmosférico, a seguir será descrito o cálculo realizado na determinação do valor dessa grandeza.

$$N_k^{ar,20^\circ C} = D \cdot \bar{P} = 5,4 \cdot \left( \frac{760 - 0,750}{2} \right)$$

↓

$$\boxed{N_k^{ar,20^\circ C} = 2,05 \cdot 10^3}$$

Com base na parametrização estabelecida pela Tabela 4 e no valor do número de Knudsen determinado acima, é possível afirmar que o regime de escoamento do ar atmosférico nesse arranjo é o **regime de escoamento viscoso**, o que confirma a afirmação anteriormente feita.

O objetivo em determinar o regime de escoamento em que o fluido utilizado se encontrará é para saber quais são as equações que poderão ser utilizadas na determinação das condutâncias do orifício e da tubulação nesse arranjo. Como já apresentado anteriormente, por conta do regime de escoamento, as equações que deverão ser utilizadas são:

- para a condutância do orifício:

$$C_{or}^{ar,20^\circ C} = \frac{76,6}{1-r} \cdot r^{0,712} \cdot \sqrt{(1-r^{0,286})} \cdot A \quad \{34.1\}$$

- para a condutância da tubulação:

$$C_{tu} = 3,27 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\phi^4}{\eta \cdot L} \cdot \left( \frac{1}{1 + 7,31 \cdot 10^4 \cdot \frac{m \cdot Q}{\eta \cdot T \cdot L}} \right) \cdot \bar{P} \quad \{31b\}$$

Ao observar as equações descritas acima é possível notar que as condutâncias tanto da tubulação quanto do orifício são dependentes da pressão no sistema. Como já se sabe, por meio das práticas experimentais e do estudo da teoria, essas pressões

variam ao longo do tempo durante o processo de bombeamento. Dessa forma, pode-se afirmar que as condutâncias também variam em função do tempo, conforme abaixo:

$$C_{or} = C_{or}(P(t)) \quad (40)$$

$$C_{tu} = C_{tu}(P(t)) \quad (41)$$

Aplicando o mesmo raciocínio na equação da condutância total da linha de bombeamento (Equação 30), já que esta é dependente dessas duas variáveis, é possível determinar também que:

$$C_T = C_T(P(t)) \quad (42)$$

Por consequência, como a velocidade efetiva de bombeamento depende dessas variáveis (direta ou indiretamente), é possível afirmar que:

$$S_{ef} = S_{ef}(P(t)) \quad (43)$$

Retomando, na equação diferencial (Equação 37), devido ao intervalo de pressão considerado, outra conclusão pode ser feita. Como nesse intervalo o vazamento do sistema (que sempre existe) possui magnitude muito menor do que a quantidade de gás bombeada, é possível concluir que o termo do somatório da taxa de transferência de gás (throughput) na câmara de vácuo ( $\sum_{i=1}^n Q_i$ ), que é o termo referente ao vazamento do sistema, é igual a zero. Desse modo, a equação diferencial toma a seguinte forma:

$$V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} = -S_{ef}(P(t)) \cdot P_{CV}(t) \quad (37.1)$$

No intervalo de pressão definido, a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo é praticamente constante, não depende do tempo. Sabendo disso, a equação diferencial acima fica definida como:

$$V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} = -\frac{S_{BV} \cdot C_T(P_{CV}(t))}{S_{BV} + C_T(P_{CV}(t))} \cdot P_{CV}(t) \quad (37.2)$$

Essa última formulação da equação diferencial da pressão no interior da câmara de vácuo, segundo Degasperi ("s. d.", pág. 20 e 21) em seu texto que será publicado, está pronta para ser trabalhada numericamente pelos *softwares* matemáticos, como o *MathCad*. Além disso, outro fator é que, devido a curva da pressão no interior da câmara de vácuo possuir uma variação leve ao longo do tempo, os cálculos realizados com o auxílio desses sistemas de resolução de problemas matemáticos se tornam mais precisos e confiáveis.

Partindo para outra análise, tomando como base a primeira equação referente ao *throughput* (Equação 35a), já que o volume da câmara de vácuo é constante, a derivada temporal do volume da câmara de vácuo ( $\frac{dV}{dt}$ ) é igual à zero. Desse modo, a partir do que foi discutido agora e pelo fato da pressão no interior da câmara de vácuo ser dada em função do tempo, é possível reescrever a equação do *throughput* da seguinte maneira:

$$Q(t) = V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} \quad (35a.1)$$

Note que a expressão acima é a porção à esquerda da igualdade da equação diferencial que determina a pressão no interior da câmara de vácuo. Outra questão que pode ser observada é que nessa formulação (proveniente da Tecnologia do Vácuo) a taxa de transferência de gás é a mesma ao longo da linha de bombeamento em um mesmo instante de tempo. Com isso, é possível estender a equação acima da seguinte forma:

$$Q(t) = V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} = S_1 \cdot P_1(t) = S_2 \cdot P_2(t) = \dots = S_{BV}(P_{BV}) \cdot P_{BV}(t)$$

De modo geral a pressão na bomba de vácuo varia com o passar do tempo. Entretanto, como já mencionado, devido ao intervalo de pressão utilizado, nesse trabalho é possível considerar que a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo é constante.

Apresentada a formulação do sistema de vácuo pela perspectiva da Tecnologia do Vácuo, agora será realizada a modelagem desse mesmo sistema com base na Mecânica dos Fluidos. Dando início esse modelamento, é determinado pela Mecânica dos Fluidos que a quantidade de massa de gás que atravessa a linha de bombeamento (vazão) se dá do seguinte modo:

$$\frac{dm}{dt} = \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A \quad (44)$$

Considerando que o gás utilizado possua um comportamento condizente com a Equação dos Gases Perfeitos (Equação 36.2), já que quanto menor a pressão maior é a proximidade do comportamento dos gases dessa condição, para uma dada temperatura constante, obtém-se que:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow P = \frac{n}{V} \cdot R \cdot T \rightarrow P = \frac{m}{V} \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Dessa forma, a grandeza pressão pode ser definida como sendo:

$$P = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad (45)$$

Substituindo as variáveis a fim de descrever o sistema de vácuo, a equação acima pode ser reescrita como:

$$\bar{P}_{CV}(t) = \bar{\rho}_{CV}(t) \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad (45.1)$$

Retornando à equação do *throughput* descrita nessa subseção (Equação 35a.1) e substituindo a equação acima nela, foi obtido que:

$$Q(t) = V_{CV} \cdot \frac{dP_{CV}(t)}{dt} = V_{CV} \cdot \frac{d\bar{\rho}_{CV}(t)}{dt} \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Portanto:

$$Q(t) = V_{CV} \cdot \frac{d\bar{\rho}_{CV}(t)}{dt} \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad (46)$$

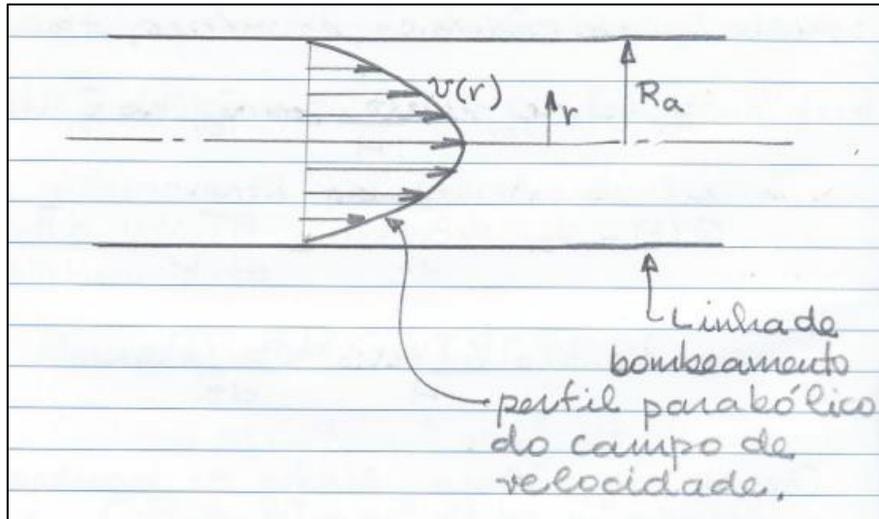
Olhando para a linha de bombeamento, para definir a velocidade média do fluido de modo teórico, é preciso comentar que o campo de velocidades em uma determinada

tubulação é descrito pela equação da velocidade de Poiseuille-Hagen, válida para escoamentos viscosos, e é definida como:

$$v(r) = \frac{(P_1 - P_2)}{4 \cdot \eta \cdot L} \cdot (Ra^2 - r^2) \quad (47)$$

De forma ilustrativa, o campo de velocidades nesse caso se dá conforme a figura a seguir (Figura 45):

Figura 45. Representação do campo de velocidades de acordo com a equação de Poiseuille-Hagen.



Fonte: Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar – 1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo (DEGASPERI, pág. 28).

Voltando à equação de Poiseuille-Hagen, as pressões 1 e 2, nos sistemas de vácuo, são respectivamente a pressão na câmara de vácuo ( $P_{CV}$ ) e a pressão na bomba de vácuo ( $P_{BV}$ ). Desse modo, a equação fica como sendo a relação em que:

$$v(r) = \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4 \cdot \eta \cdot L} \cdot (Ra^2 - r^2) \quad (47.1)$$

A partir da equação da velocidade de Poiseuille-Hagen, agora, será possível determinar a velocidade média de escoamento do fluido que escoar através de uma determinada área de seção transversal. Para determinar isso, a equação que deve ser tomada como ponto de partida é dada do seguinte modo:

$$\bar{v} = \frac{1}{A} \cdot \int_A \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (48)$$

Desse forma, é possível reescrever a equação acima como:

$$\bar{v} = \frac{1}{A} \cdot \int_0^{Ra} v(r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (48.1)$$

Substituindo a equação do campo de velocidade, a relação acima fica descrita como:

$$\bar{v} = \frac{2. \pi}{A} \cdot \int_0^{Ra} \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4. \eta. L} \cdot (Ra^2 - r^2) \cdot r \cdot dr \quad (48.2)$$

Descrevendo a resolução dessa integração, tem-se que:

$$\bar{v} = \frac{2. \pi}{A} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4. \eta. L} \int_0^{Ra} (Ra^2 - r^2) \cdot r \cdot dr \quad (48.3)$$

↓

$$\bar{v} = \frac{2. \pi}{A} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4. \eta. L} \int_0^{Ra} (Ra^2 r - r^3) \cdot dr \quad (48.4)$$

↓

$$\bar{v} = \frac{2. \pi}{A} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4. \eta. L} \cdot \left[ Ra^2 \cdot \frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^{Ra} \quad (48.5)$$

↓

$$\bar{v} = \frac{2. \pi}{A} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{4. \eta. L} \cdot \frac{Ra^4}{4} \quad (48.6)$$

↓

$$\bar{v} = \frac{\pi}{\pi. Ra^2} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{8. \eta. L} \cdot Ra^4 \quad (48.7)$$

Simplificando os termos, a equação da velocidade média ( $\bar{v}$ ) é definida pela seguinte formulação:

$$\bar{v} = \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{8. \eta. L} \cdot Ra^2 \quad (48.8)$$

Onde:

- “ $P_{CV}$ ” é a pressão na câmara de vácuo.
- “ $P_{BV}$ ” é a pressão na bomba de vácuo.
- “ $\eta$ ” é a viscosidade dinâmica do fluido.
- “ $L$ ” é o comprimento da tubulação.
- “ $Ra$ ” é o raio da tubulação.

Como apresentado nessa subseção, a equação da vazão mássica (Equação 44) pode ser definida como sendo o produto entre a massa específica média, a velocidade média e a área de seção transversal da tubulação. Além disso, outra relação existente, apresentada anteriormente na Equação 45.1, é que  $\bar{P} = \bar{\rho} \cdot \frac{R.T}{M}$ . Rearranjando essa

equação, a fim de isolar o termo da massa específica, é determinado que  $\bar{\rho} = \bar{P} \cdot \frac{M}{R.T}$ . Com isso, substituindo a equação da velocidade média a partir da equação de Poiseuille-Hagen (Equação 48.8), a equação da massa específica em função da pressão e aplicando a definição da área de uma circunferência na equação da vazão mássica, foi determinado que:

$$\frac{dm}{dt} = (\bar{\rho}) \cdot (\bar{v}) \cdot (A) = \left( \bar{P} \cdot \frac{M}{R.T} \right) \cdot \left( \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot Ra^2 \right) \cdot (\pi \cdot Ra^2)$$

$$\downarrow$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{M}{R.T} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot \pi \cdot Ra^4 \cdot \bar{P} \quad (49)$$

Em termos da taxa de transferência de gás, a equação que determina esse deslocamento de matéria é dada como:

$$Q(t) = \frac{R.T}{M} \cdot \frac{dm(t)}{dt} \quad (50)$$

Essa equação é verificada, pois é possível deduzi-la, com base no que já foi apresentado, da seguinte forma:

$$Q(t) = S \cdot P(t) = \frac{dV(t)}{dt} \cdot P(t)$$

$$\downarrow$$

$$Q(t) = \frac{R.T}{M} \cdot \frac{dm(t)}{dt} \quad (51a)$$

ou

$$Q(t) = R.T \cdot \frac{dn(t)}{dt} \quad (51b)$$

Onde:

- " $\frac{dV(t)}{dt}$ " é a quantidade em volume de gás que atravessa a área de seção transversal.

- " $\frac{dn(t)}{dt}$ " é a quantidade em mols de gás que atravessa a área de seção transversal.

Retomando a Equação 49, a partir do que foi demonstrado acima, é possível determinar a seguinte relação:

$$Q(t) = \frac{R.T}{M} \cdot \frac{dm(t)}{dt} = \frac{R.T}{M} \cdot \frac{M}{R.T} \cdot \frac{(P_{CV} - P_{BV})}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot \pi \cdot Ra^4 \cdot \bar{P}$$

Simplificando e substituindo a variável referente à pressão média pela sua própria definição, é possível determinar que:

$$Q(t) = \frac{(P_{CV}(t) - P_{BV}(t))}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot \pi \cdot Ra^4 \cdot \frac{(P_{CV}(t) + P_{BV}(t))}{2}$$

Por conseguinte:

$$Q(t) = \frac{(P_{CV}(t)^2 - P_{BV}(t)^2)}{16 \cdot \eta \cdot L} \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^4$$

Dessa forma, agrupando e rearranjando alguns dos termos, obtém-se que:

$$Q(t) = (P_{CV}(t)^2 - P_{BV}(t)^2) \frac{\pi \cdot \phi^4}{256 \cdot \eta \cdot L} \quad (52)$$

Um fato que deve ser mencionado antes de dar continuidade no modelamento desse sistema a partir da Mecânica dos Fluidos é que, segundo Degasperri (“s. d.”) em seu texto que será publicado intitulado *Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar-1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo*, a partir das equações apresentadas acima, se encontrados os campos de velocidades e pressão ao longo da linha de bombeamento (com o auxílio do *software Comsol Multi-physics™*), é possível determinar a quantidade de massa transportada por unidade de tempo que passa através de cada área de seção transversal da linha de bombeamento. O próximo passo nesse texto se baseará nisso, mas nesse trabalho não irá ser aplicado esse método de análise, pois o procedimento de comparação experimental por meio do arranjo concebido já se adequa à proposta desse projeto.

Continuando, para realizar a correlação entre as duas áreas de estudo desse trabalho, é possível reescrever a equação da vazão mássica em termos da taxa de transferência de gás, com base nos campos de pressão ( $P = P(x, t)$ ) e velocidades ( $v = v(x, t)$ ) mencionados, conforme a seguir:

$$\frac{dm}{dt} = \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A \quad \{44\}$$

↓

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{M}{R \cdot T} \bar{P} \cdot \bar{v} \cdot A$$

↓

$$\frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dm(t)}{dt} = \bar{P}(t) \cdot \bar{v}(t) \cdot A$$

A partir da relação apresentada na Equação 51a, aplicando o conceito dos campos de velocidade e pressão, é verificado que:

$$Q(x, t) = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dm(x, t)}{dt} = \bar{P}(x, t) \cdot \bar{v}(x, t) \cdot A \quad (53)$$

Portanto, conclui-se que:

$$Q(x, t) = \bar{P}(x, t) \cdot \bar{v}(x, t) \cdot A \quad (54)$$

Anteriormente, no momento de modelagem do sistema de vácuo pela formulação da Tecnologia do Vácuo, foi visto e verificado que o *throughput* é considerado o mesmo ao longo da linha de bombeamento em um dado instante de tempo. Dessa forma, devido à relação estabelecida na Equação 53, é possível realizar o comparativo entre duas

equações que correlacionarão a Mecânica dos Fluidos e a Tecnologia do Vácuo, conforme abaixo:

$$Q(x, t) = \bar{P}(x, t) \cdot \bar{v}(x, t) \cdot A \quad (\text{Mecânica dos Fluidos})$$

$$Q(t) = V_{CV} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \quad (\text{Tecnologia do Vácuo})$$

A partir das equações acima é possível verificar que, em uma dada posição e em um determinado instante de tempo, ao longo da linha de bombeamento a quantidade de massa que escoar é a mesma.

Detalhando mais diretamente a teoria referente ao arranjo experimental proposto, com base nas afirmações feitas e nas equações apresentadas até este momento, foi determinada a seguinte equação que correlaciona as duas áreas de estudo desse trabalho:

$$Q_{ar}^{20\text{ }^\circ\text{C}} = 9,06 \cdot 10^{-2} \cdot Re \cdot \phi \quad (55)$$

Onde:

- “ $Q_{ar}^{20\text{ }^\circ\text{C}}$ ” é a taxa de transferência do ar a uma temperatura de  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , [ $Torr \cdot L \cdot s^{-1}$ ].
- “ $Re$ ” é o coeficiente de Reynolds.
- “ $\phi$ ” é o diâmetro da área de seção transversal [ $cm$ ].

A expressão acima vem da equação de Reynolds, para o ar atmosférico a uma temperatura de  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , mostrada abaixo:

$$Re = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot R \cdot T \cdot \eta} \cdot \frac{Q}{\phi} \quad (56)$$

Onde:

- “ $M$ ” é a massa molar do gás.
- “ $R$ ” é constante dos gases ideais, [ $Torr \cdot L \cdot K^{-1}$ ].
- “ $T$ ” é a temperatura do gás.
- “ $\eta$ ” é a viscosidade dinâmica do fluido.
- “ $Q$ ” é a taxa de transferência de gás [ $Torr \cdot L \cdot s^{-1}$ ].
- “ $\phi$ ” é o diâmetro da área de seção transversal.

Note que esta equação do coeficiente de Reynolds (grandeza da Mecânica dos Fluidos) se adequa extremamente bem para os sistemas de vácuo, já que, conhecendo o tipo de gás, é possível determinar o valor dessa grandeza a partir do diâmetro da área de seção transversal e da taxa de transferência de gás (grandeza da Tecnologia do Vácuo).

Visando entender melhor a equação definida acima (Equação 56), a seguir será demonstrado o passo-a-passo para sua dedução.

Partindo da variação da equação da vazão mássica, provinda da Mecânica dos Fluidos, definida anteriormente, determina-se que:

$$\frac{dm}{dt} = \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A \quad \{44\}$$

Realizando a multiplicação em ambos os lados pelo produto entre a constante dos gases ideais ( $R$ ) e a temperatura ( $T$ ), a equação acima fica definida como:

$$R \cdot T \cdot \frac{dm}{dt} = R \cdot T \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A$$

Analisando a porção à esquerda da igualdade, como a massa pode ser definida pelo produto entre o número de mols ( $n$ ) e a massa molar ( $M$ ), é possível determinar que:

$$R \cdot T \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{Q}{M}$$

Simplificando o membro da direita e o central, foi determinada a seguinte expressão:

$$Q = R \cdot T \cdot \frac{dn}{dt} \quad \{51b\}$$

Note que a equação acima, com base no que foi apresentado até este momento, é uma das definições do *throughput*. Dessa forma, retomando a equação a sua forma relacionada com a massa, obtém-se o seguinte:

$$Q = R \cdot T \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dm}{dt}$$

Substituindo o termo referente à vazão mássica pela sua definição dada na Equação 44 e substituindo a variável referente ao número de mols pela sua definição (razão entre a massa e a massa molar), a relação acima toma a seguinte forma:

$$Q = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A$$

Portanto:

$$Q = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A \quad (57)$$

Note que a equação acima correlaciona novamente, mas de outro modo, a Tecnologia do Vácuo (através do *throughput*) com a Mecânica dos Fluidos (através da vazão). Com isso, a fim de direcionar a linha de raciocínio para a demonstração do papel prático desse projeto nesse estudo, será descrita abaixo a equação, já apresentada nesse documento, que estabelece a relação entre a pressão e a densidade.

$$P = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad \{45\}$$

Por conta do diâmetro da área de seção transversal do tubo da linha de bombeamento não ser tratado como pontual, a forma mais coerente de descrever a relação acima é considerar a pressão média e a massa específica média do fluido.

$$\bar{P} = \bar{\rho} \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Isolando o termo referente à massa específica média do fluido, será definido que:

$$\bar{\rho} = \frac{M}{R \cdot T} \cdot \bar{P} \quad (58)$$

A partir da relação estabelecida acima, substituindo essa equação na Equação 57, é possível determinar que:

$$Q = \frac{R \cdot T}{M} \bar{\rho} \cdot \bar{v} \cdot A = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \bar{P} \cdot \bar{v} \cdot A$$

↓

$$Q = \bar{P} \cdot \bar{v} \cdot A \quad (59)$$

Como mencionado ao longo do modelamento do sistema de vácuo pela formulação da Tecnologia do Vácuo, devido ao regime de escoamento ser viscoso e a faixa de pressão considerada, a pressão ao longo da tubulação não varia de forma significativa. Desse modo, é possível definir o *throughput* pela relação do produto entre a pressão média e velocidade de bombeamento da bomba de vácuo, conforme a equação abaixo:

$$Q = S_{BV} \cdot \bar{P} \quad \{35b\}$$

A partir da equação acima e da afirmação feita no parágrafo anterior, é possível determinar uma relação entre as equações 35b e 59, conforme abaixo:

$$Q = S_{BV} \cdot \bar{P} = \bar{P} \cdot \bar{v} \cdot A$$

Simplificando ambos os lados, será determinado que:

$$\boxed{S_{BV} = \bar{v} \cdot A} \quad (60)$$

A equação acima é a base de verificação experimental para a comparação entre a porção teórica e prática desse trabalho. Como é possível notar, além de correlacionar os dois campos do conhecimento desse estudo (a Tecnologia do Vácuo e a Mecânica dos Fluidos), essa equação permite determinar a velocidade de bombeamento de um sistema de bombas de pré-vácuo pela velocidade de escoamento do fluido.

Retomando a dedução da Equação 55, a área de uma circunferência (que é a área de seção transversal da linha de bombeamento) é definida, como já apresentado, por:

$$A = \pi \cdot R a^2 \quad (61)$$

Como na equação do coeficiente de Reynolds o parâmetro dimensional é o diâmetro da área de seção, a equação acima deverá ser reescrita do seguinte modo:

$$A = \pi \cdot R a^2 = \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{\phi^2}{4}$$

Isolando o termo referente ao diâmetro da linha de bombeamento, obtém-se que:

$$\phi = \frac{4.A}{\phi.\pi} \quad (62)$$

Dessa forma, substituindo a equação acima na equação do coeficiente de Reynolds (Equação 20), será determinado que:

$$Re = \frac{\rho.\phi.v}{\eta} \quad \{20\}$$

↓

$$Re = \frac{\rho.v}{\eta} \cdot \frac{4.A}{\phi.\pi} \quad (63a)$$

ou

$$Re = \frac{4}{\phi.\pi.\eta} \cdot \rho.v.A \quad (63b)$$

Com base na Equação 57, isolando as variáveis referentes à massa específica, à velocidade e à área, será determinada a seguinte relação:

$$\rho.v.A = \frac{M.Q}{R.T} \quad (64)$$

Substituindo a equação acima na Equação 63b será determinada a equação apresentada no início desse raciocínio do coeficiente de Reynolds, como é possível verificar abaixo:

$$Re = \frac{4}{\phi.\pi.\eta} \cdot \rho.v.A = \frac{4}{\phi.\pi.\eta} \cdot \frac{M.Q}{R.T}$$

↓

$$Re = \frac{4.M}{\pi.R.T.\eta} \cdot \frac{Q}{\phi} \quad \{56\}$$

Para um determinado gás, determina-se que a porção  $\frac{4.M}{\pi.R.T.\eta} \cdot \frac{1}{\phi}$  é uma constante em uma dada temperatura. Em decorrência disso, a única variável restante para realizar a determinação do coeficiente de Reynolds é a taxa de transferência de gás. O interessante disso, na verdade, é que por meio dessa relação foi determinada uma equação do coeficiente de Reynolds em função do *throughput*, o que mais uma vez correlaciona a Tecnologia do Vácuo com a Mecânica dos Fluidos.

Dando continuidade à dedução da equação da taxa de transferência de gás para o ar atmosférico a 20 °C, a equação do coeficiente de Reynolds apresentada acima, ao substituir a porção constante, se dará da seguinte forma:

$$Re = 11,03753 \cdot \frac{Q_{ar}^{20\text{ }^\circ\text{C}}}{\phi} \quad (65)$$

Por fim, para determinar a relação apresentada na Equação 55, basta isolar a variável do *throughput*, conforme a demonstração abaixo:

$$Re = 11,03753 \cdot \frac{Q_{ar}^{20^\circ C}}{\phi} \rightarrow Q_{ar}^{20^\circ C} = \frac{Re \cdot \phi}{11,03753}$$

↓

$$Q_{ar}^{20^\circ C} = 9,06 \cdot 10^{-2} \cdot Re \cdot \phi \quad \{55\}$$

Realizada a dedução da equação do *throughput* para o ar atmosférico a partir da equação do coeficiente de Reynolds, a fim de finalizar o detalhamento teórico, será feita uma última consideração. Substituindo a Equação 65 nos limites de determinação de cada tipo de regime de escoamento, provindos do coeficiente de Reynolds, é possível determinar uma nova relação de parametrização. Esse novo método de determinação do tipo de regime de escoamento se torna muito útil, pois, como será possível visualizar na Tabela 5, ele estabelece, através da taxa de transferência de gás, uma verificação mais direta do tipo de regime de escoamento em que fluido utilizado se encontra. Veja abaixo a nova parametrização resultante:

Tabela 5. Parametrização para a determinação do tipo de regime de escoamento pela grandeza da Tecnologia do Vácuo, *throughput*.

$Q < 99,7 \cdot \phi$	Escoamento do tipo laminar
$99,7 \cdot \phi < Q < 190,3 \cdot \phi$	Escoamento do tipo transitório
$190,3 \cdot \phi < Q$	Escoamento do tipo turbulento

Finalizada toda a porção analítico-matemática da correlação feita a partir das equações que regem esses dois campos do conhecimento, a seguir serão detalhadas as etapas realizadas na montagem do arranjo experimental proposto e o processo de levantamento dos dados experimentais.

### 3.3.2. Metodologia Empírica

Ao projetar um arranjo experimental, o primeiro fator que precisa ser levado em consideração são as dimensões dos materiais e dos equipamentos a serem utilizados. Como verificado por meio da medição feita com o auxílio de um paquímetro analógico, o anemômetro digital (instrumento utilizado para a medição da velocidade de escoamento do ar atmosférico) adquirido possui um diâmetro interno de  $\sim 54 \text{ mm}$  de abertura. Devido a isso, os materiais subsequentes foram pensados e projetados com a finalidade de atender esse dimensionamento. Após a aquisição do medidor, o primeiro item adquirido foi a linha de bombeamento, os tubos de acrílico. Com base nas dimensões dos tubos de acrílico (descritas na subseção 3.1) foram realizadas as modelagens dos flanges de acoplamento e do flanges de acomodamento do anemômetro. Essa modelagem foi feita por meio do software de modelagem 3-D da Microsoft Corporation intitulado *Autodesk Fusion* (versão estudantil). Inicialmente, a proposta era realizar o desenho técnico das peças e encaminhar ao torneiro mecânico para que os flanges fossem fabricados. Entretanto, por sugestão de um colega do laboratório, Henrique Gulino, optou-se em mudar o método de fabricação das peças para o de impressão 3-D.

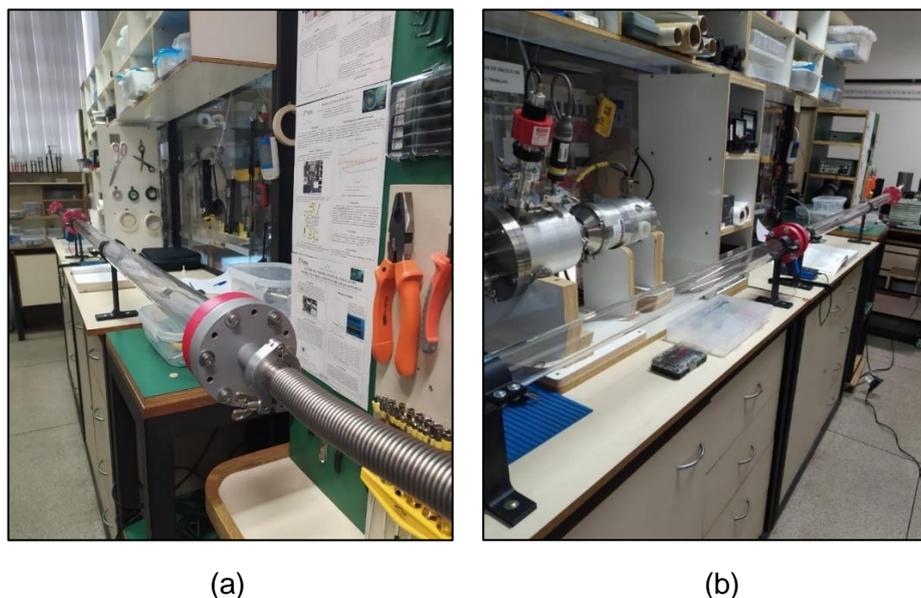
A adoção desse método de fabricação foi favorecida devido a dois fatores. O primeiro é que os estudos da aplicação desses materiais para esse tipo de uso são praticamente inexistentes, o que promoveu a oportunidade de realizar testes iniciais

desses materiais nessa área. O segundo ponto é que, devido ao avanço da tecnologia, as peças fabricadas por esse método possuem resistência mecânica bastante expressiva com um custo extremamente menor quando em comparação com o padrão atualmente estabelecido pela indústria. Apesar disso, é importante pontuar que esse tipo de material (como o PVC) são recomendados para níveis de baixo/médio vácuo, por não possuírem uma elevada densidade.

Em paralelo a isso, além da modelagem dos flanges, foi realizada a confecção de um protótipo de testes projetado para simular o flange conectado nos tubos de acrílico. Essa peça foi criada com o intuito de realizar uma tomada inicial de dados e verificar a qualidade das peças fabricadas pelo método de impressão 3-D.

Com os flanges em posse, para realizar a vedação e fixação nos tubos de acrílico, foi passada uma cola de silicone nas extremidades dos tubos e foram encaixados os flanges. Após a secagem da cola, foram fixados os suportes mecânicos da linha de bombeamento, também fabricados pelo método de impressão 3-D, na mesa de trabalho com parafusos de suporte e foram encaixados os anéis de vedação nos canais de O'ring. Em sequência disso, foram feitas as fixações dos flanges por meio de parafusos passantes e foram realizadas as conexões entre a linha de bombeamento, a bomba de vácuo e o medidor de pressão com o auxílio de garras fixadoras e de anéis de centragem para conexões do tipo KF-25. A seguir serão apresentadas duas fotografias (Figura 46a e 46b) do arranjo experimental em perspectiva.

Figura 46. Fotografias em perspectiva do arranjo experimental.



Fonte: próprio autor.

### 3.3.2.1. Aquisição dos Dados Experimentais

Com o arranjo experimental devidamente montado, agora deverá ser detalhado o método para a realização da aquisição dos dados experimentais.

O método de aquisição dos dados empíricos é, de certo modo, bem simples. O medidor de velocidade de escoamento (anemômetro) possui um display onde é possível visualizar os valores das velocidades de escoamento do fluido. Além disso, o dispositivo possui compatibilidade de comunicação com computadores via conexão USB e um

software (disponibilizado gratuitamente pela fabricante) para a aquisição automática dos dados experimentais. Isso é a base do processo de medição desse trabalho.

Apresentadas essas questões, com o intuito de facilitar o entendimento e de detalhar melhor visualmente as variações dos tipos de métodos de tomada de dados utilizados, a seguir serão listadas as diferentes formas de aquisição de dados utilizadas durante o procedimento experimental nesse projeto.

**a) Método 1: protótipo de testes.** Como mencionado na subseção anterior, foi modelado um protótipo de testes para tomada inicial dos dados experimentais (Figura 47). A medição por meio desse protótipo consiste em acoplar a peça no orifício de entrada da bomba mecânica de palhetas selada a óleo e realizar o processo de bombeamento com o orifício posicionado do lado oposto da peça aberto (para uma verificação inicial) e, em outra tomada, com o orifício fechado (para verificar a magnitude do vácuo gerado).

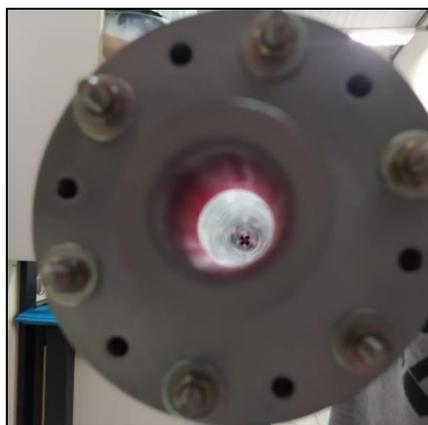
Figura 47. Fotografia do arranjo do protótipo de testes.



Fonte: próprio autor.

**b) Método 2: linha de bombeamento aberta ao ambiente.** Esse método foi utilizado na verificação primária de confirmação da coerência e correlação entre o arranjo experimental e o equacionamento teórico apresentado ao longo desse texto. O procedimento experimental desse método consiste na realização do bombeamento do ar presente no interior da linha de bombeamento com o orifício da extremidade oposta à bomba de vácuo aberto ao ambiente (Figura 48). O tamanho da amostra utilizada foi de aproximadamente 125 dados com intervalo entre medições de 1,5 segundos. É importante mencionar que neste método não foi aguardada a estabilização do escoamento do gás.

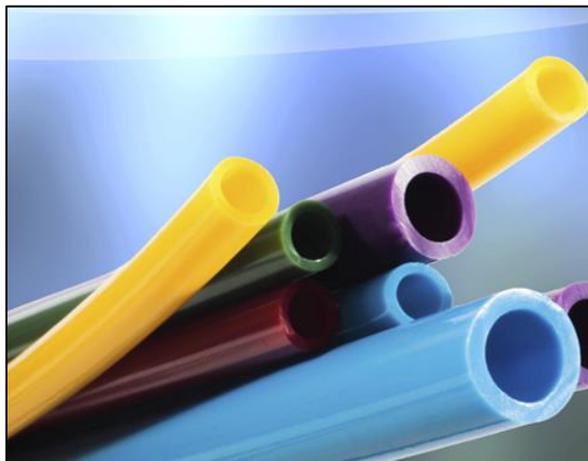
Figura 48. Fotografia do orifício da linha de bombeamento aberto.



Fonte: próprio autor.

- c) **Método 3: linha de bombeamento conectada à câmara de vácuo.** Concebido com o intuito de realizar a coleta majoritária dos dados experimentais, esse método é semelhante ao apresentado no item “b”. Entretanto, ao invés de aberto, o orifício da extremidade oposta à bomba de vácuo é conectado à câmara de vácuo por meio de um tubo flexível com diâmetro pequeno, *polyflow* (Figura 49).

Figura 49. Exemplo de tubos flexíveis.



Fonte: <https://sgplasticos.com.br/produtos/tubos-especiais/tubos-em-poliuretano>.

- d) **Método 4: variação do diâmetro do orifício de entrada.** A medição a partir desse método consiste em não realizar o isolamento completo da linha de bombeamento do ambiente externo. O método de aquisição de dados por essa forma é baseado no aumento gradativo do diâmetro do orifício presente na região oposta à bomba de vácuo (Figura 50), permitindo o aumento gradativo do fluxo de ar que entra e passa pela linha de bombeamento. O tempo para aguardar a estabilização do escoamento do gás foi de 5 *min* e o tamanho médio das amostras utilizadas, desconsiderando os dados medidos durante o período de estabilização, foi de aproximadamente 70 dados com intervalo entre medição de 1 (um) segundo.

Figura 50. Flange cego com o primeiro furo para a tomada de dados.



Fonte: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

## **4. Resultados e Conclusões**

A partir dos métodos experimentais abordados na seção anterior, foram adquiridos uma série de dados que permitiram realizar algumas conclusões a respeito do arranjo experimental proposto.

### **4.1. Protótipo de Testes**

Seguindo a ordem estabelecida anteriormente, que, inclusive, foi a sequência de metodologia realizada nesse trabalho, a verificação e tentativa primária por meio do protótipo de testes, em termo de aquisição de dados, não gerou resultados numéricos e possuiu comportamento diferente do esperado. Durante o processo de bombeamento, foi verificado que a hélice do medidor (responsável pela medição) permanecia estática ao longo do tempo. Apesar de não possibilitar a aquisição de nenhum dado numérico, esse acontecimento gerou o levantamento de algumas hipóteses acerca das peças fabricadas e do mecanismo que impossibilitou essa tomada inicial de dados.

A primeira hipótese levantada foi que as paredes das regiões da peça, que simulavam a linha de bombeamento, eram muito finas, o que estaria permitindo (devido à baixa densidade do material) a fácil difusão do ar ambiente para o volume interno da peça que estava sendo bombeado. Se verdadeira essa hipótese, o fenômeno que explicaria, talvez, a estática da hélice do medidor seria a diminuição do arrasto promovido pelo deslocamento da massa de ar, já que o ar durante o processo de bombeamento estaria difuso. A segunda hipótese que foi referente à possibilidade da existência de algum defeito no próprio dispositivo de medição, o que, após alguns testes, não foi verificado. A última hipótese levantada era que a hélice não conseguia realizar o movimento de rotação devido a algum travamento por meio da obstrução de algum objeto.

Para solucionar esse problema, visando principalmente o fenômeno da primeira hipótese, foram aplicadas, sobre a superfície das paredes das peças, algumas camadas de tinta primer (tinta selante). Após a secagem da tinta foi testado novamente o protótipo, entretanto, o problema ainda não tinha sido solucionado.

Finalizando essa subseção, a partir da análise dos resultados empíricos obtidos por meio desse método experimental, a conclusão parcial desse método foi que os resultados se demonstraram inconclusivos.

### **4.2. Linha de Bombeamento Aberta ao Ambiente**

Como mencionado brevemente na subseção 3.3.2.1 item “b”, esse método foi o primeiro em que houve a coleta de dados numéricos. Porém, antes de adentrar nessa parte, é necessário comentar que, ao realizar a montagem do arranjo experimental para a aquisição de dados por meio desse método, o problema posto na subseção anterior foi solucionado. Foi analisado que o problema do travamento da hélice do anemômetro estava na verdade relacionado com a pressão exercida sobre a porção frontal e traseira do anemômetro. Como o instrumento possui hastes de proteção quando apertados os parafusos essa região era comprimida, o que não permitia a rotação da hélice de medição. Para resolver isso, foi reduzida a força utilizada ao apertar os parafusos (sem comprometer a vedação, é claro) e, no processo de fixação, os parafusos foram apertados sempre aos poucos e em posições opostas, a fim de garantir uma distribuição uniforme da força de compressão promovida pela fixação.

Nesse método experimental foram realizados os testes iniciais que permitiram determinar a velocidade média de escoamento do gás ( $\bar{v} = 1,80 \text{ m/s}$ ) ao longo da linha

de bombeamento. Como apresentado na seção anterior (seção 3), a partir desse valor da velocidade de escoamento é possível determinar a velocidade de bombeamento da bomba mecânica de palhetas. Porém, antes disso, para solucionar a equação, deverá ser determinada a área em que o gás escoará. Já que o escoamento se deu na linha de bombeamento (o que, mesmo em outros casos, é a região onde ocorre a maior transferência de massa), é possível concluir que a área de escoamento é a área de seção transversal do tubo de acrílico ( $2,29.10^{-3} m^2$ ).

Entretanto, o cálculo da área de escoamento deverá ser realizado junto à subtração da área correspondente ao suporte das hélices do anemômetro, já que nessa porção de área o gás não escoará. O resultado obtido desse equacionamento para a determinação da área total será descrito abaixo:

$$A_T = 1,71.10^{-3} m^2$$

Com o valor da área total ( $A_T$ ) e da velocidade média de escoamento do gás ( $\bar{v}$ ), foi possível determinar a velocidade de bombeamento da bomba mecânica de palhetas através da resolução da equação provinda da correlação das grandezas da Mecânica dos Fluidos e da Tecnologia do Vácuo, conforme a seguir:

$$S_{BV} = \bar{v}.A = (1,8).(1,71.10^{-3})$$

Portanto:

$$S_{BV} = 3,08.10^{-3} m^3/s$$

No manual fornecido pela fabricante (Figura 51), a unidade de medida da bomba mecânica de palhetas se dá em [ $m^3/h$ ]. Desse modo, convertendo a porção temporal de segundos para horas, a fim de realizar o comparativo entre os dois dados, obteve-se que a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo na pressão atmosférica é de:

$$S_{BV} = 11,09 m^3/h$$

A partir do valor acima foi possível verificar a coerência entre os dados experimentais e os dados fornecidos pelo fabricante, conforme a figura abaixo.

Figura 51. Catálogo de bombas seladas a óleo da fabricante Leybold Vacuum, ampliado.

Technical Data		TRIVAC D 4 B		TRIVAC D 8 B	
		two-stage		two-stage	
		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
Nominal pumping speed <sup>1)</sup>	m <sup>3</sup> /h (cfm)	4.8 (2.8)	5.8 (3.4)	9.7 (5.7)	11.6 (6.9)
Pumping speed <sup>1)</sup>	m <sup>3</sup> /h (cfm)	4.2 (2.5)	5.0 (3.0)	8.5 (5)	10.2 (6)

Fonte: [https://www.leybold.com/content/dam/brands/leybold/web-only/download-center/catalogue-chapters-pdf/010\\_EN\\_Oil\\_Sealed\\_Pumps.pdf](https://www.leybold.com/content/dam/brands/leybold/web-only/download-center/catalogue-chapters-pdf/010_EN_Oil_Sealed_Pumps.pdf).

Analisando e realizando um comparativo entre o valor obtido através da resolução da equação da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo e do valor fornecido pelo manual de instruções do fabricante, foi possível realizar uma conclusão inicial de que o arranjo experimental se deu operacionalmente positivo e apontou coerência em

relação ao modelo esperado. Um último detalhe que deve ser pontuado é que a aquisição dos dados experimentais neste método já foi feita por meio do software de aquisição de dados da Minipa.

#### **4.3. Linha de Bombeamento Conectada à Câmara de Vácuo**

Nesse método, como mencionado, conectou-se a linha de bombeamento à câmara de vácuo por meio de um tubo de plástico de diâmetro pequeno (*polyflow*). Além da interconexão entre a câmara de vácuo e a linha de bombeamento, foi acoplado o sensor de membrana capacitiva entre essas partes do sistema.

Ao realizar o processo de bombeamento, foi verificado que a pressão estava sendo reduzida, porém, ao verificar os dados pelo display do anemômetro digital, foi percebido que não estava sendo registrado nenhum valor de velocidade de escoamento e que a causa disso era porque a hélice de medição não estava sendo rotacionada.

Analisando essa questão, foi possível concluir que a hélice não estava rotacionando, pois, devido ao diâmetro de abertura do tubo plástico de conexão ser muito pequeno, não havia arrasto (força promovida pelo deslocamento da massa de fluido) o suficiente para promover o movimento angular da hélice. Devido a essa análise, foi proposto o experimento pelo método de variação do diâmetro do orifício de entrada, que será descrito na subseção a seguir. Esse novo método elimina esse último problema e possibilita a continuidade da correlação entre a Mecânica dos Fluidos e a Tecnologia do Vácuo pela determinação empírica da velocidade de bombeamento da bomba mecânica de palhetas por meio da velocidade de escoamento do ar atmosférico.

#### **4.4. Método de Variação do Diâmetro do Orifício de Entrada**

O conceito base por trás desse método de aquisição de dados experimentais, como o próprio título já diz, é a realização da variação do diâmetro do orifício de entrada exposto ao ar atmosférico. Para realizar isso, foi utilizado um flange cego feito de alumínio. O diâmetro inicial foi de  $2,3\text{ mm}$  e foi sendo aumentado de pouco em pouco, conforme a necessidade da coleta de dados, até o diâmetro de abertura da linha de bombeamento. A aquisição dos valores das velocidades de escoamento foi realizada, como na subseção 4.2, por meio do software da Minipa.

Os dados coletados das velocidades de escoamento, como mencionado na seção anterior a essa (seção 3) provieram de um tamanho amostral médio de 70 dados. Com base nessa amostragem, foi feita uma tabela geral que possui os valores médios das velocidades de escoamento para cada um dos diâmetros (Tabela 6). A partir desses dados, foram feitos dois gráficos: um que descreve a relação entre o diâmetro de abertura e a velocidade de escoamento do fluido (Gráfico 3) e o outro que relaciona o diâmetro de abertura ao quadrado à velocidade de escoamento do fluido (Gráfico 4). Entretanto, antes de adentrar nesses dados experimentais, é necessário mencionar que foram considerados os valores de velocidade de escoamento obtidos após a estabilização do sistema, o que não foi considerado no método da linha de bombeamento exposta ao ar (subseção 4.2).

Tabela 6. Tabela geral dos dados experimentais.

ID	$v$ (m/s)	$\phi$ (mm)	$\phi^2$ (mm <sup>2</sup> )
1	1,20	2,3	5,29
2	1,39	3	9
3	1,49	4,3	18,49
4	1,84	5	25
5	2,00	6,25	39,06
6	2,03	7	49
7	2,08	7,9	62,41
8	2,13	8,8	77,44
9	2,15	10,1	102,01
10	2,20	16,2	262,44
11	2,20	25	625
12	2,22	54	2916

Gráfico 3.  $v$  (m/s) x  $\phi$  (mm).

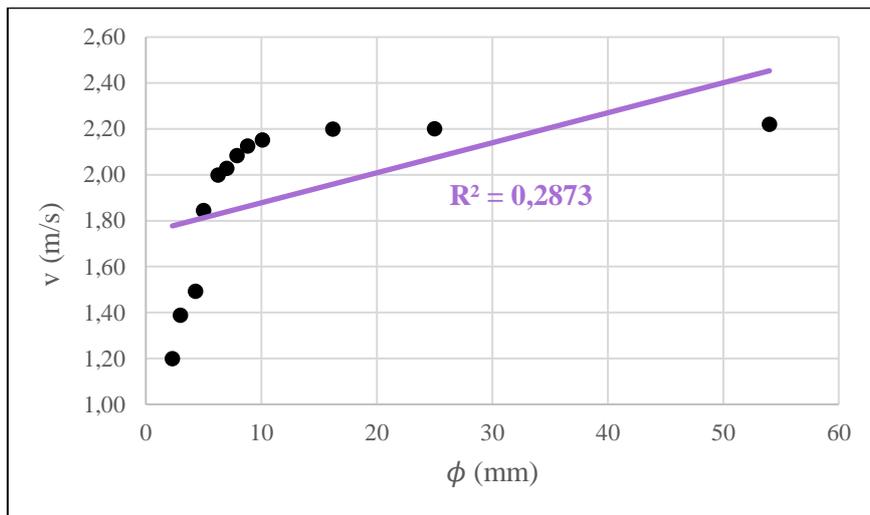
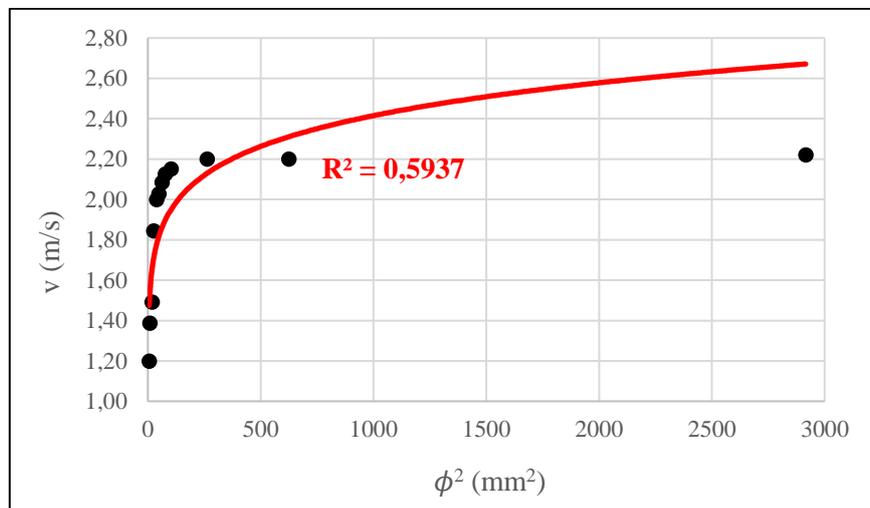


Gráfico 4.  $v$  (m/s) x  $\phi^2$  (mm<sup>2</sup>).

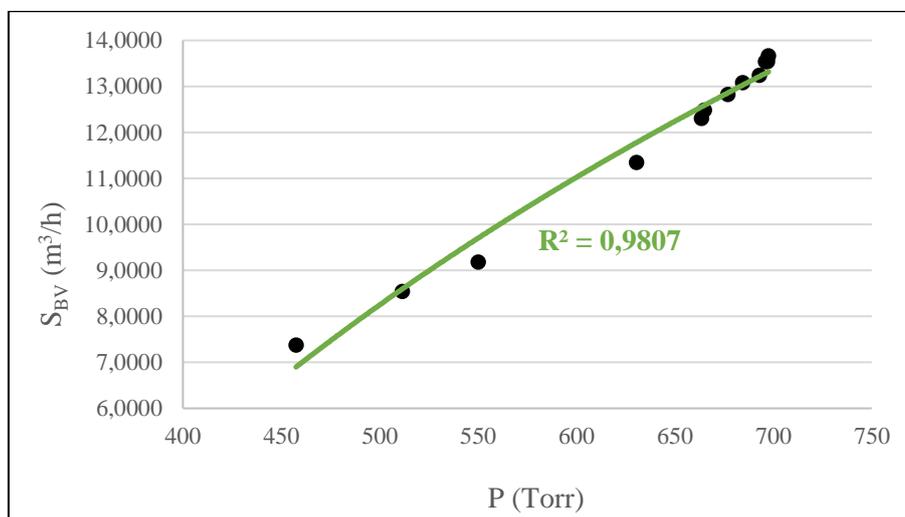


Além desses dados, outra relação que pôde ser feita é a da velocidade de bombeamento em função da pressão medida para cada um dos experimentos dos diferentes diâmetros. Essa relação é muito interessante, pois é outra maneira de se verificar a validade desse modelamento. Seguem a tabela e o gráfico referentes a essa relação.

Tabela 7. Correlação entre a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo e a pressão.

ID	$v$ (m/s)	$P$ (Torr)	$S_{BV}$ (m <sup>3</sup> /h)
1	1,20	457,5	7,3760
2	1,39	511,5	8,5389
3	1,49	550,1	9,1832
4	1,84	630,5	11,3494
5	2,00	663,5	12,3044
6	2,03	665	12,4836
7	2,08	677	12,8267
8	2,13	684,5	13,0836
9	2,15	693	13,2431
10	2,20	696	13,5378
11	2,20	697	13,5415
12	2,22	697,5	13,6646
<b>Média</b>			<b>11,7611</b>

Gráfico 5.  $S_{BV}$  (m<sup>3</sup>/h) x  $P$  (Torr).



#### 4.5. Conclusões Finais

Com base em tudo o que foi mostrado nessa seção, principalmente pelo último método analítico, foi possível verificar que o arranjo experimental corresponde ao que foi pré-estabelecido como objetivo desse trabalho. A partir do estudo teórico, por meio da manipulação algébrica demonstrada e dos experimentos realizados, foi verificada a correlação entre os dois campos do conhecimento bases desse trabalho. Observando a Tabela 7, é possível verificar que o valor médio da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo (11,76 m<sup>3</sup>/h) se aproxima muito dos valores fornecidos no manual da fabricante (11,6 m<sup>3</sup>/h), Leybold GmbH.

Entretanto, duas questões finais devem ser pontuadas. A primeira é que, ao analisar o gráfico da pressão em função da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo (Gráfico 5) e com base no que foi apresentado no decorrer deste documento, provavelmente deverá ser atribuído um fator de correção na equação. Isso porque, como visto na subseção referente à bomba mecânica de palhetas (subseção 2.2.5.1), no intervalo de pressão utilizado o gráfico da velocidade de bombeamento deveria possuir o formato de uma função constante, não de uma função linear angulada. A outra questão é que o intervalo de pressão pré-estabelecido não foi completamente satisfeito. Por conta do problema da falta de arrasto do gás, somente foi possível realizar o processo de medição até aproximadamente 40% da faixa almejada (457,5 Torr).

Essas questões poderão ser analisadas em trabalhos futuros, que poderão solucionar estes problemas com, por exemplo, a identificação e adição de um fator de correção na equação de determinação da velocidade de bombeamento e com a realização de um projeto de um medidor mais sensível a baixas quantidades de massa de ar.

Outros pontos que ainda poderão ser desenvolvidos a partir deste trabalho são a utilização de gás colorido, para melhorar a visualização do escoamento, e a aplicação da modelagem teórica, e do modelo empírico criado, no software *Comsol Multiphysics* para resolução de problemas referentes à Tecnologia do Vácuo.

## 5. Referências

- [1] SILVA, Dayson de Mello. **A natureza tem horror ao vácuo? Uma reflexão sobre o estabelecimento do peso do ar e a definição de pressão atmosférica.** Maringá, 2013. 51 págs. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Física. Documento eletrônico disponível em < <http://www.dfi.uem.br/fisicaold/site.dfi.uem.br/wp-content/uploads/2016/12/Dayson-de-Mello-Silva-Licenciatura.pdf> >. Último acesso em: 28/nov/2022.
- [2] STEMPIAK, Roberto A. **A CIÊNCIA E A TECNOLOGIA DO VÁCUO: Resumo histórico e algumas aplicações.** São José dos Campos, 2002. Documento eletrônico disponível em < <http://www.sbvacu.org.br/noticias/o-que-e-vacuio.pdf> >. Último acesso em: 28/nov/2022.
- [3] GOMES, Maria Helena Rodrigues. **APOSTILA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS.** Juiz de Fora, “s. d.”. Documento eletrônico disponível em < <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2012/09/Apostila-de-Mecânica-dos-Fluidos.pdf> >. Último acesso em: 28/nov/2022.
- [4] DA SILVA, César Antônio. **APOSTILA DE HIDRÁULICA GERAL.** Mato Grosso, 2013. Documento eletrônico disponível em < <https://642f28a786.cbau-cdnwnd.com/1247e655acd543d703bbdb84f1171d9b/200000382-17884197c2/Apostila%20-%20HIDRÁULICA%20GERAL.pdf> >. Último acesso em: 30/nov/2022.
- [5] **Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo.** Campinas, 2010. Documento eletrônico disponível em < <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2015/07/Texto-de-F-640-Sem2-2015-vácuo1.pdf> >. Último acesso em: 03/dez/2022.
- [6] **Capítulo II: Escoamento dos Gases.** Campinas, “s. d.”. Documento eletrônico disponível em < <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2015/07/Cap-2.pdf> >. Último acesso em: 04/dez/2022.
- [7] DEGASPERI, Francisco Tadeu. **Sistema de vácuo grosseiro (1 000 mbar – 1 mbar) com a mecânica dos fluidos e formulação da tecnologia do vácuo.** São Paulo, “s. d.”. Texto a ser publicado.
- [8] DEGASPERI, Francisco Tadeu. **Sistema de medição e tratamento de dados experimentais de taxa de transferência de gás (throughput) com a formulação da tecnologia do vácuo e mecânica dos fluidos.** São Paulo, “s. d.”. Projeto de inscrição para aquisição da bolsa de iniciação científica (Bolsa Pibic) enviado ao CNPq.
- [9] GAMA, Sergio. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo.** Campinas, 2002. Documento eletrônico disponível em < <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf> >. Último acesso em: 04/dez/2022.

- [10] ONUSIC, Hécio e cia. **Curso de Tecnologia do Vácuo: Teoria Cinética**. São Paulo, “s. d.”. Documento eletrônico disponível em < <https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/TeoriaCinetica2017.pdf> >  
>  
Último acesso em: 07/dez/2022.
- [11] PAIVA, Jadilson Alves de et al. **Aplicação da tecnologia do vácuo em projeto de engenharia de precisão**. Paraíba, 2010. 151 págs. Dissertação de Mestrado (Grau mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Paraíba, Centro de Tecnologia. Documento eletrônico disponível em < <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5402/1/arquivototal.pdf> >.  
Último acesso em: 10/dez/2022.