

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP**  
**CURSO DE MATERIAIS, PROCESSOS E COMPONENTES ELETRÔNICOS.**

**DAYANE DE JESUS DA SILVA**  
**JULIANA ALINE HESPANHOL NEVES CANDIDO**

**Modelagem e Cálculo Detalhado de Sistemas de Pré-Vácuo e Alto-Vácuo**  
**Industriais Para Metalização.**

**SÃO PAULO**  
**2014**

**DAYANE DE JESUS DA SILVA**  
**JULIANA ALINE HESPANHOL NEVES CANDIDO**

**Modelagem e Cálculo Detalhado de Sistemas de Alto-Vácuo Industriais Para  
Metalização**

Trabalho de conclusão do Curso, apresentado para  
obtenção do grau de TECNÓLOGO no Curso de  
Tecnologia em Materiais, Processos e Componentes  
Eletrônicos da Faculdade de Tecnologia de São  
Paulo, FATEC-SP.

Orientador. Prof. Dr.Francisco Tadeu Degasperi

**SÃO PAULO**  
**2014**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a todos que nos derem apoio, nos ofereceram dedicação em momentos desafiadores e que se tornaram a ponte para a realização deste trabalho.

O sucesso é uma viagem, não um ponto de destino.  
*Bem Sweetland*

## RESUMO

Sistemas de vácuo são utilizados em variadas áreas da indústria como no ramo de alimentos, medicamentos, saúde hospitalar, refrigeração, movimentação e fixação, reatores a plasma e, ainda, metalização a vácuo, etc. A modelagem de sistemas de vácuo torna-se de vital importância para que se possa fazer análises com modelos mais próximos da realidade. Entretanto para estudar os sistemas de vácuo é importante determinar com precisão a velocidade efetiva de bombeamento, e esta é dependente da condutância do sistema, que é uma grandeza física que depende da geometria do sistema, do tipo de gás e de sua temperatura, e do regime de escoamento. Neste caso torna-se difícil uma solução matemática, por isso, usamos solução analítica.

Neste modelo foi planejado montar um sistema de vácuo que operasse com pressões desde a pressão atmosférica até  $10^{-5}$  mbar, com tubos de diferentes tamanhos para o processo de bombeamento, além de outros componentes utilizados na tecnologia do vácuo, como foles metálicos, válvulas e outros. Na indústria temos sistemas com diferentes geometrias e o objetivo deste projeto é analisar o comportamento dos gases nas tubulações considerando diferentes tipos de gases e determinar com bastante precisão a condutância e a velocidade efetiva de bombeamento em função da pressão e do tipo de regime de escoamento.

Na indústria a condição que determina que um sistema de vácuo, (mais sofisticado ou não), irá ser utilizado, depende dos produtos e/ou materiais a serem produzidos em cada setor. Quanto mais eles necessitarem de menos interação de partículas contidas no ambiente, melhor terá de ser a qualidade do vácuo para que assim se possa produzir sem interação com agentes externos, que são as impurezas do sistema.

Nossa atenção estará voltada aos sistemas de vácuo industriais usados para a metalização de lanternas e faróis automotivos. Esta constitui uma das mais importantes aplicações do alto-vácuo na indústria. Este trabalho visa analisar o desempenho e possíveis melhorias do sistema, mantendo os parâmetros de bombeamento constantes, exceto a pressão, para bombeamento em função do tipo de gás e, depois utilizar métodos matemáticos, usando a ferramenta *Mathcad*, fazer comparações com os experimentos realizados, deixando-os mais próximos possíveis dos sistemas utilizados nas indústrias.

## ABSTRACT

Vacuum systems are using in various areas of industry as in the field of food, medicine, health hospital, cooling and drive attachment, the plasma reactors and, further, vacuum metallization, etc. The modeling of vacuum systems becomes vitally important for analyzes that can be done with models closer to reality. However, to study the vacuum systems it is important to accurately determine the effective pumping speed, and this is dependent on the conductance of the system, which is a physical quantity which depends on the geometry of the system, the type of gas and its temperature, and its flow regime. In this case it is difficult mathematical solution therefore used analytical solution.

In this model was planned to assemble a vacuum system to operate at pressures from atmospheric pressure to  $10^{-5}$  mbar, with tubes of different sizes for the pumping process, and other components used in vacuum technology, such as metal bellows, valves and others. In industry we have systems with different geometries and the goal of this project is to analyze the behavior of gases in pipes considering different types of gases and determine fairly accurately the conductance and effective pumping speed depending on the pressure and the type of its flow regime.

In industry condition which requires a vacuum system (more sophisticated or not) will be used depends on the products and / or materials to be produced in each sector. The more they require less interaction of particles in the environment, will be best quality so that the vacuum can be produced without interaction with external agents, which are impurities in the system.

Our attention will be directed on industrial vacuum metallization used for flashlights and car headlights systems. This constitutes one of the most important applications of the high-vacuum industry. This work aims to analyze the performance and possible improvements to the system, keeping the parameters pumping constant, except the pressure for pumping the type of gas, and then use mathematical methods, using *Mathcad* tool, comparisons with the experiments, leaving the closest possible to the systems used in industries.

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b>	9
1. 1. Objetivo	9
1.2. Apresentação	9
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	11
2.1. O Vácuo	11
2.2. Leis dos Gases	11
2.3. O Livre Caminho Médio	11
2.4. Regimes de Fluxo dos Gases	12
2.4.1. Fluxo Turbulento	13
2.4.2. Fluxo Viscoso	13
2.4.3. Fluxo Molecular	13
2.4.4. Fluxo Intermediário	14
2.5. O Número de Knudsen	15
2.6. O Número de Reynolds	15
2.7. Cálculo das Condutâncias	16
2.7.1. Condutância em Série	17
2.7.2. Condutância em Paralelo	17
<b>3. A MODELAGEM DOS SISTEMAS DE VÁCUO</b>	18
3.1. <i>Throughput</i>	19
3.2. Velocidade Efetiva de Bombeamento	20
3.3. Taxa de Desgaseificação	21
3.4. Metalização	22
<b>4. MATERIAIS, PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS</b>	22
4.1. Procedimentos	22
4.1.1. Bomba Mecânica de Palhetas	25
4.1.2. Coleta de Dados	25
4.1.3. Teste de Vazamento 1	29
4.1.4. Teste de Vazamento 2	31
4.1.5. Comparação dos Medidores	33
4.2. Método da Pipeta	44
4.3. Alto-Vácuo	50

<b>5. CONCLUSÃO</b>	57
<b>6. TRABALHOS ANTERIORES</b>	58
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	60
<b>Apêndice</b>	61



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Objetivo:

Esse trabalho tem como objetivo projetar um modelo de um sistema de pré e de alto-vácuo que seja semelhante a um industrial para metalização, e estudar parâmetros como variação de pressão, condutância, *throughput*, usando recursos computacionais matemáticos como *Oringin* para resolução de expressões que não podem ser estudadas analiticamente.

## 1.2. Apresentação:

Com a crescente utilização do vácuo tanto nos processos industriais como nas atividades científico-tecnológicas temos que os cálculos e as análises dos sistemas de vácuo devem ser feitos considerando modelos mais próximos da realidade, ainda mais, os modelos devem ser testados experimentalmente. A modelagem de sistemas de vácuo segue uma estrutura matemática baseada por uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, em geral não linear. Estamos considerando no caso uma modelagem da pressão dependente exclusivamente do tempo. Ao impormos as condições de escoamento de gases e vapores nos regimes de escoamento viscoso turbulento e laminar e o intermediário, verificamos que tanto as velocidades de bombeamento das bombas de vácuo como as condutâncias são muito dependentes da pressão. Além de as fontes de gases e vapores em geral serem dependentes do tempo, com isso tornando o problema matemático bastante difícil de ser resolvido. Neste caso devemos considerar a comparação da análise matemática com os dados experimentais, e com isso, ajustar o modelo físico de modo a se aproximar dos dados experimentais.

Outro aspecto relevante no trabalho de modelagem de sistemas de vácuo refere-se a determinação da condutância, que constitui uma etapa fundamental nos projetos de sistemas de vácuo. A condutância é uma grandeza que depende das dimensões da linha de bombeamento, do tipo de gás e da sua temperatura, mas depende fortemente do regime de escoamento. A velocidade de bombeamento efetiva é dependente da condutância da tubulação. No caso do regime de escoamento viscoso laminar a condutância depende da pressão e isto traz dificuldades nos seus cálculos. Neste contexto estamos criando uma sistemática para a determinação da condutância em

várias formas de tubos para o início do processo de bombeamento. Assim, pretendemos neste trabalho, além de realizar as modelagens físico-matemáticas dos sistemas de vácuo, também realizar a comparação experimental dos arranjos analisados matematicamente. Neste sentido a determinação das condutâncias constitui uma etapa importante, mais ainda, fundamental. Pretendemos neste trabalho determinar com muita segurança a medição de condutâncias e velocidades efetivas de bombeamento em função da pressão e do regime de escoamento. Com este trabalho, pretendemos pesquisar o comportamento do escoamento de gases em tubulações considerando tipos diferentes de gases. No regime viscoso laminar, a condutância é função da viscosidade e esta é dependente do tipo de gás. Mantendo os outros parâmetros de bombeamento constantes, exceto a pressão, poderemos determinar o desempenho de bombeamento em função do tipo de gás. A determinação da velocidade efetiva de bombeamento é de importância fundamental para a melhoria de desempenho dos sistemas de vácuo. Continuando, desta forma, a equação diferencial não tem solução analítica, devemos nestes casos lançar mão de métodos numéricos computacionais a fim de obter a solução temporal do problema. Os sistemas de vácuo mais importante que operam nos regimes de escoamento mencionados acima são: ramo de alimentos, medicamentos, saúde hospitalar, refrigeração, movimentação e fixação, reatores a plasma e muitos outros. Esse trabalho tem como foco principal a modelagem detalhada de sistemas de vácuo que encontram aplicações como as mencionadas acima. Analisaremos sistemas de vácuo considerando a condutância de tubos de vários tamanhos e diferentes diâmetros, os detalhes da velocidade de bombeamento e ainda as possíveis fontes de gases e vapores envolvidos nos processos em estudo.

## **2. EMBASAMENTO TEÓRICO**

### **2.1. O Vácuo**

No dicionário Michaelis, o vácuo significa aquilo que não está ocupado, que não contém nada, vazio despejado, na física é um espaço no qual não há pressão atmosférica. Esvaziamento absoluto ou quase absoluto, ou rarefação externa de ar ou de gás.

Na tecnologia do vácuo é definido como o estado que um gás se encontra em um recipiente e por isso a sua densidade de partícula é menor que a atmosfera circundante ambiente ou que a pressão é menor que a pressão atmosférica local.

### **2.2. Lei dos Gases Ideais**

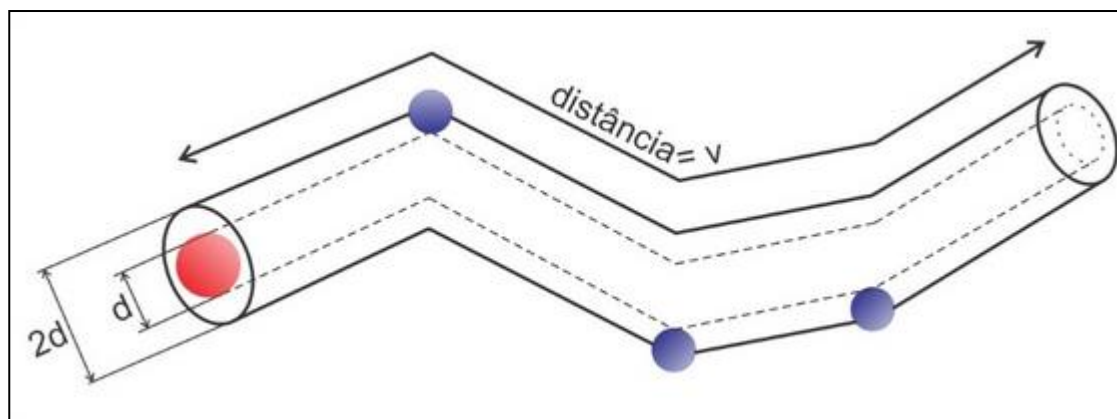
Os gases ideais são aqueles que mantêm suas propriedades macroscópicas, (pressão e temperatura) magnificadas pela equação:

$$pV = nRT \quad (1)$$

Ela é válida para baixas densidades de gases, onde  $p$  é a pressão,  $V$  o volume,  $R$  a constante dos gases ideais e  $T$  a temperatura. Se gases forem colocados em um recipiente em baixa densidade a pressão é notada, mas conforme a densidade diminui a pressão tende a desaparecer.

### **2.3. O Livre Caminho Médio**

É definido pelo caminho percorrido de uma molécula contida em um recipiente até se chocar com outra molécula, ilustrado na Figura1, quanto menor for esse caminho, maior é a possibilidade de uma molécula se chocar com a outra, assim maior a pressão.



*Figura 1: Desenho Representando Hipoteticamente o Percurso de uma Partícula em um Tubo (tubo hipotético)-Metrovac*

Se  $d$  é o diâmetro de uma molécula e elas colidem então  $\pi d^2$  representa a seção de choque entre elas, e se existirem  $n$  moléculas por unidade de volume, em uma área  $A$  e comprimento  $\lambda$  a seção de choque total é:

$$\pi d^2 n A \lambda \quad (2)$$

E se  $\pi d^2 n A \lambda = A$ , então a seção de choque será total, isso significa que a molécula não atravessará o comprimento  $\lambda$  sem nenhuma colisão.

Essa é uma dedução para uma molécula em movimento e as outras paradas, para um modelo real Clausius considerou que as moléculas se moviam com mesma velocidade, considerando uma distribuição Maxwelliana das velocidades das moléculas temos:

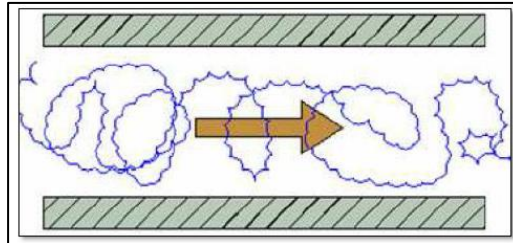
$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (3)$$

## 2.4. Regimes de Fluxo dos Gases

A determinação do fluxo de gases em uma tubulação é um problema que só pode ser resolvido através do regime em que o gás se encontra são eles: fluxo viscoso turbulento, fluxo viscoso laminar, fluxo molecular e o fluxo intermediário (fluxo de Knudsen).

#### 2.4.1. Fluxo Viscoso Turbulento

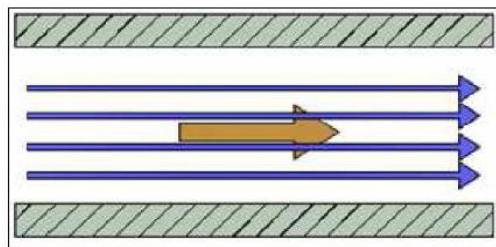
É o fluxo onde a pressão e a velocidade dos gases são muito altas, por isso os redemoinhos. E na tecnologia do vácuo ocorre principalmente no início do bombeamento.



*Figura 2: Ilustração do Regime de Escoamento Viscoso Turbulento (Ribeiro, Alan)*

#### 2.4.2. Fluxo Viscoso Laminar

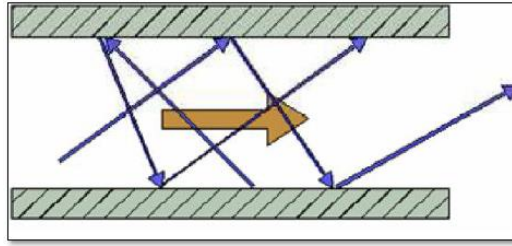
É o fluxo onde não ocorrem mais vórtices (redemoinhos), típicos do fluxo viscoso turbulento, mas ainda há uma alta pressão e velocidade dos gases, porém agora as moléculas adquirem um sentido.



*Figura 3: Ilustração do Regime de Escoamento Viscoso Laminar (Ribeiro, Alan)*

#### 2.4.3. Fluxo Molecular

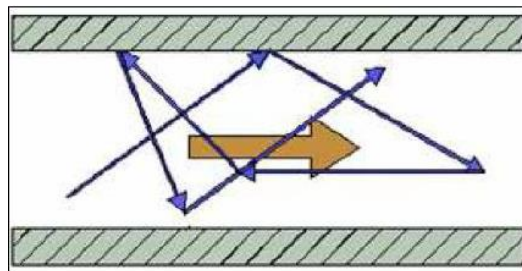
É o fluxo onde o livre caminho médio é muito maior que as dimensões da tubulação. Nesse regime o que prevalece são as interações das moléculas com as paredes.



*Figura 4: Ilustração do Regime de Escoamento Molecular (Ribeiro, Alan)*

#### **2.4.4. Fluxo Intermediário (Fluxo de Knudsen)**

É o fluxo onde o diâmetro da tubulação é da ordem do livre caminho médio. Têm-se um fluxo que não tem a característica de a velocidade das moléculas serem menores na borda que no centro, como no regime viscoso, mas também não apresenta interação predominante molécula-parede como a do fluxo molecular.



*Figura 5: Ilustração do Regime de Escoamento Intermediário (Ribeiro, Alan)*

## 2.5. O Número de Knudsen

Para determinar em que regime de escoamento estamos trabalhando, usamos dois critérios simples um deles é o número de knudsen, que faz uma relação entre o diâmetro do sistema  $d$  e o livre caminho médio  $\lambda$ .

$$kn = \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

Temos então a seguinte tabela:

Regime de Escoamento	Número de Knudsen (kn)	Comentários
Molecular	$Kn > 1$	As propriedades são determinadas pelas interações moléculas-parede
Intermediário	$0,01 < Kn < 1$	Guarda as características dos dois regimes, o molecular e o viscoso.
Viscoso Laminar	$Kn < 0,01$	-----
Viscoso Turbulento	$Kn < 0,01$	-----

*Tabela 1: Regimes de Escoamento em Função do Número de Knudsen*

Podemos notar que para os regimes viscosos laminar e turbulento, o número de Knudsen não faz distinção, nesse caso usamos outro método, que é o número de Reynolds.

## 2.6. O Número de Reynolds

O número de Reynolds faz a distinção entre o regime viscoso e o turbulento usando a relação:

$$Re = \frac{Dvp}{\eta} \quad (5)$$

Onde:

$D$  é o diâmetro da tubulação,

$v$ : é a velocidade média do fluxo de gás que atravessa a seção transversal do tubo,

$\rho$ : é a densidade do gás e

$\eta$ : é o coeficiente de viscosidade do gás.

Para o ar a uma temperatura igual a 22°C podemos obter uma expressão pratica:

$$Re = \frac{11Q}{d} \quad (6)$$

Onde:

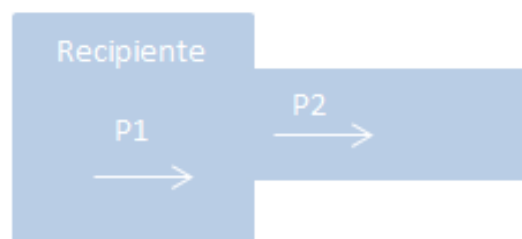
Q: é o fluxo das moléculas por uma determinada superfície.

Na tabela estão os fluxos determinados pelo número de Reynolds

Regime de Escoamento	Número de Reynolds
Turbulento	$Re > 2000$
Intermediário	$1000 < Re < 2000$
Viscoso	$Re < 1000$

*Tabela 2: Regime de Escoamento em Função do Número de Reynolds.*

## 2.7. Cálculo das Condutâncias



*Figura 6: Desenho Ilustrativo de Condutância*

Se um gás é bombeado de um recipiente por uma bomba de vácuo, a linha de bombeamento vai apresentar certa resistência a passagem do fluxo, de forma que a quantidade de gás que passa pelo tubo vai ser o inverso dessa resistência, denominada condutância.

$$C = \frac{1}{Z} \quad (7)$$

Onde:

Z: representa a resistência, e

C: representa a condutância.

Podemos também dizer que a condutância é igual à quantidade de gás que passa por um tubo por unidade de tempo.

$$Q = C(P1 - P2) \quad (8)$$



Onde:

Q: é o fluxo de massa;

P1: é a pressão no recipiente e

P2: é a pressão na tubulação.

### 2.7.1. Condutância em Série

Para condutâncias em serie o valor da condutância total é a somatória do inverso das condutâncias.

$$C_{serie} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{C_i} \quad (9)$$

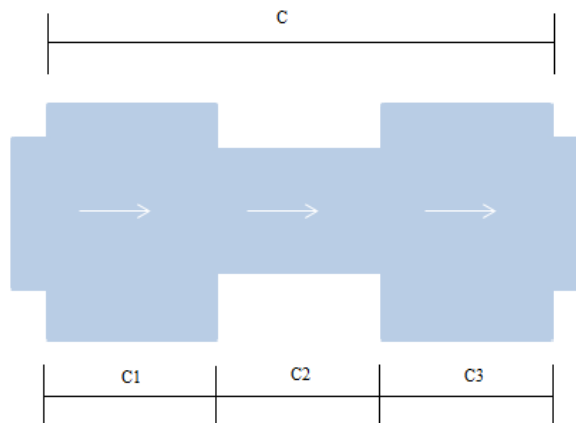


Figura 7: Desenho Ilustrativo de Condutância em Série

### 2.7.2. Condutância em Paralelo

Neste caso as condutâncias serão somadas:

$$C_{paralelo} = \sum_{i=0}^n C_i \quad (10)$$

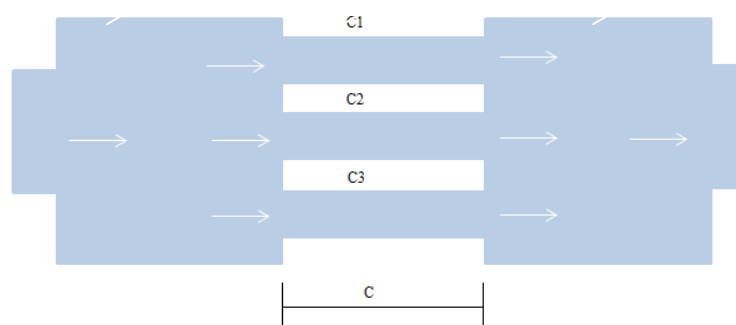


Figura 8: Desenho Ilustrativo da Condutância em Paralelo

### 3. A MODELAGEM DOS SISTEMAS DE VÁCUO

Teoricamente a modelagem dos sistemas de vácuo são as grandezas condutância, velocidade de bombeamento e fontes de gases e vapores. A equação diferencial que rege o processo de bombeamento possui aspecto simples, mas seus resultados têm difícil obtenção. Começamos a estudar a modelagem de sistemas de vácuo, não importando se é pré-vácuo ou alto-vácuo, por meio da expressão mostrada a seguir. Dependendo da faixa de pressão, as condições do problema específico são dadas pelos valores de velocidade de bombeamento, pelas várias fontes de gases e vapores e pela condutância da linha de bombeamento.

$$V_{cv} \frac{dp_{cv}(t)}{d(t)} = -S_{ef} P_{cv}(t) + \sum Q_i \quad (11)$$

$$V_{cv} \frac{dp_{cv}(t)}{d(t)} = \frac{S_{bv} C_{total}}{S_{bv} + C_{total}} P_{cv}(t) + \sum Q_i \quad (12)$$

$$P_{cv}(t = 0) = p_0 \quad (13)$$

A resolução da equação diferencial implica que a condutância e a velocidade de bombeamento das bombas de vácuo variam com a pressão, e as fontes de gases e vapores são bastante difíceis de serem representados. Ou seja, geralmente a equação diferencial não é linear.

As bombas de vácuo mecânicas, compressoras ou ejetores de vapor de óleo, bombas difusoras e uma variedade de dispositivos de bombeamento específicos, como bombas iônicas são fundamentais em sistemas de vácuo, pois esses dispositivos removem gases dos sistemas evacuando a uma taxa que é medida pela velocidade de bombeamento  $S_B$ , que é definida como o volume de gás por unidade de tempo  $dV/dt$  que o dispositivo de bombeamento remove do sistema.

#### 3.1. *Throughput*

O fluxo de gás  $Q$  em dispositivos de bombeamento, chamado *throughput*, é definido como o produto da velocidade de bombeamento pela pressão interna  $P_{in}$ , conforme mostrada abaixo,

$$Q = P_{in} S_b = P_{in} \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

Onde:

A unidade normalmente usada é Torr. L/s.

O *throughput* é proporcional ao fluxo de massa  $W$  de um gás desde que sob condições de fluxo constante, quando a pressão é constante.

$$Q = P \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{W}{M} RT \right) = \frac{RT}{M} \left( \frac{dW}{dt} \right) \quad (15)$$

Sendo assim o fluxo de massa é dada pela expressão:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{M}{RT} Q \quad (16)$$

Poderíamos também ter escrito em termos do número de moléculas, que em algumas situações vale considerar o caso. Em algumas aplicações em tecnologia do vácuo o interesse maior está na determinação do número de mols e número de moléculas.

O fluxo de gás entrando em uma bomba, evacuado de uma câmara, geralmente passa por uma série de canos ou tubos que apresentam resistência ao fluxo. Neste modo entre quaisquer dois pontos ao longo do caminho do fluxo existe uma diferença de pressão. Este fato, somente ocorrerá a um sistema se tal diferença de pressão existir. Por analogia com um circuito elétrico, a condutância  $C$  entre dois pontos ao longo do caminho do fluxo é definida de modo que a quantidade de gás fluindo por um sistema é o produto da condutância pela diferença de pressão.

$$Q = (P_1 - P_2)C \quad (17)$$

Desde que  $Q$  seja a quantidade de gás por unidade de tempo entrando no cano ou tubo à pressão  $P_1$ , então se não adicionarmos vazamentos de gás entre os pontos de interesse, a mesma quantidade de gás sairá do cano à pressão  $P_2$ .

A velocidade de bombeamento de uma bomba de vácuo é  $S_B = Q / P_{in}$ . Por analogia, esta expressão é conveniente para definir a velocidade de bombeamento em qualquer ponto num sistema de vácuo como:

$$S = \frac{Q}{P} \quad (18)$$

Assim:

$$P_1 = \frac{Q}{S_1} \quad (19)$$

e

$$P2 = \frac{Q}{S2} \quad (20)$$

### 3.2. Velocidade Efetiva de Bombeamento:

Usando a expressão anterior e substituindo estes valores de P1 e P2, temos que:

$$Q = \left( \frac{Q}{S1} - \frac{Q}{S2} \right) C \quad (21)$$

Dividindo todos os termos por Q, temos que:

$$\frac{1}{S1} = \frac{1}{S2} + \frac{1}{C} \quad (22)$$

Assim a velocidade de bombeamento em qualquer ponto no sistema pode ser obtida conhecendo a velocidade de bombeamento em algum outro ponto e a condutância desta parte do sistema. Em particular a combinação da velocidade de bombeamento da bomba e a condutância C do tubo, nos dá a velocidade de bombeamento efetiva:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_b} + \frac{1}{C} \quad (23)$$

e

$$S_{ef} = \frac{S_b \cdot C}{S_b + C} \quad (24)$$

Por raciocínio similar ao dado acima, podemos facilmente mostrar que para varias aberturas, tubos ou canos em série, cada um com sua condutância individual C1, C2, Cn, a condutância total é dada por:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \dots + \frac{1}{Cn} \quad (25)$$

Portanto, a condutância e a velocidade de bombeamento constituem grandezas de vital importância para o desenvolvimento de bons projetos de sistemas de vácuo.

### 3.3. Taxa de Desgaseificação

Desgaseificação em inglês: *outgassing* é um fenômeno de desorção que é o desprendimento de gases e vapores que estão na superfície do material quando estão em

pressão atmosférica e são submetidos a baixas pressões. Existem vários tipos de vazamentos em sistemas de vácuo, entretanto dependendo do regime em que se encontram alguns deles se sobrepõem. Em alto- vácuo (pressões inferiores a  $10^{-4}$  mbar) a desgaseificação é um dos principais fenômenos que contribuem para a elevação da pressão.

Usamos faixas de pressão para determinar a qualidade do vácuo:

Faixas	Pressão em Torr	Pressão em Pa
Baixo (primário)	0,1 a 760	$10$ a $10^5$
Médio Vácuo	$10^{-4}$ a $10^{-1}$	$10^{-2}$ a $10$
Alto Vácuo	$10^{-8}$ a $10^{-4}$	$10^{-7}$ a $10^{-2}$
Ultra Alto Vácuo	$<10^{-8}$	$<10^{-7}$

*Tabela 3: Faixas de Pressão*

### 3.4. Metalização

Dá-se o nome metalização ao ato de depositar um filme fino de um material em uma superfície.

Pode-se fazer metalização usando processos de PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou Deposição física a vapor, e por CVD (*Chemical Vapor Deposition*). No caso da primeira o material sólido é vaporizado por calor ou por *sputtering*. Esse vapor é condensado sob a superfície do substrato para formar um filme fino.

Podemos fazer metalização basicamente por três métodos:

- Evaporação térmica ou por filamento aquecido.
- Evaporação por feixe de elétrons.
- *Sputtering* (espirramento catódico).

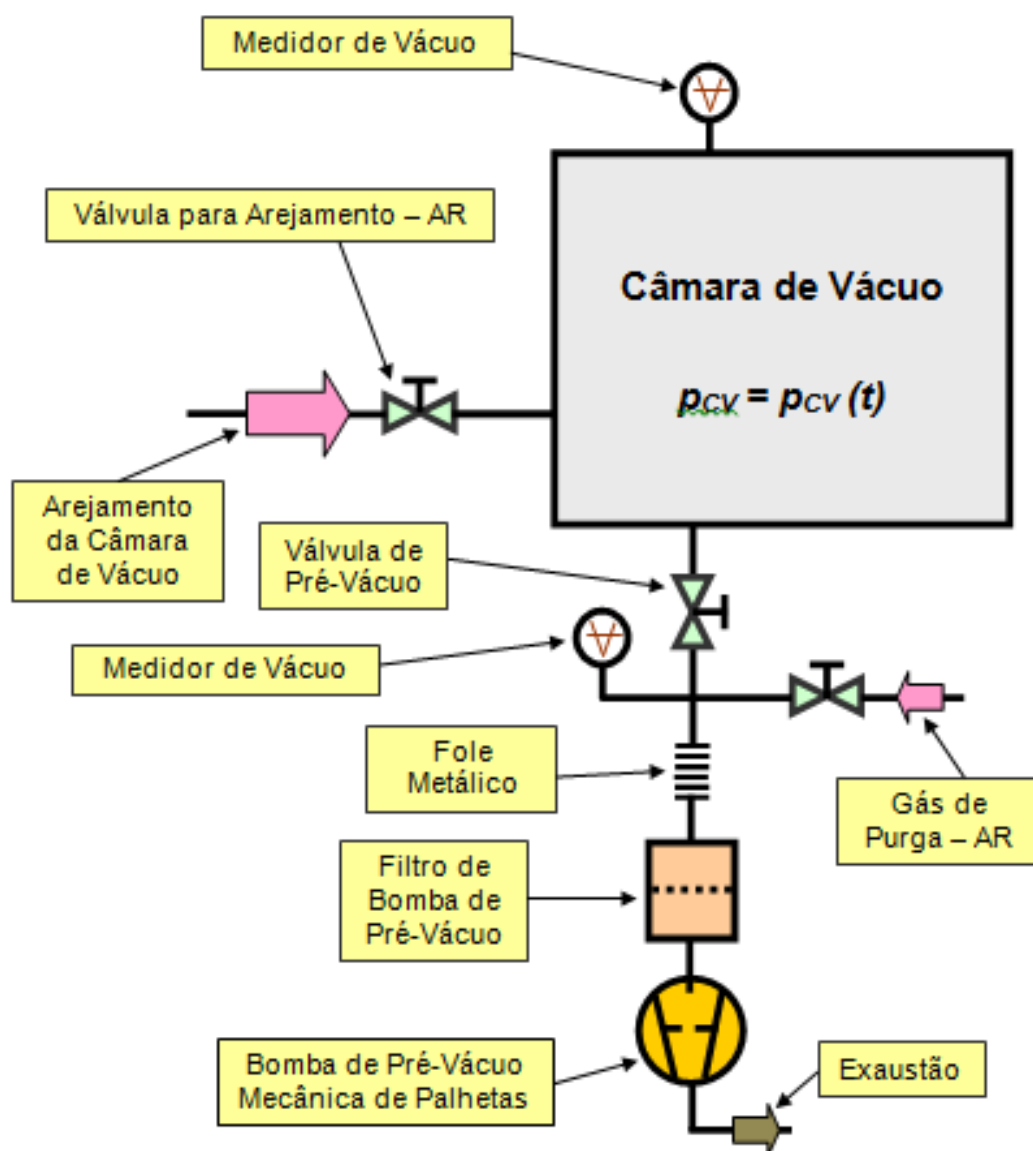
Para que não haja contaminação do filme depositado e como nos três métodos o que limita o processo é a quantidade de partículas que se chocam, o uso do alto- vácuo é fundamental, na ordem de  $10^{-6}$  Torr.

## **4. MATERIAIS, PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS**

### **4.1. Procedimentos:**

A conexão entre as câmaras de vácuo foram realizadas através de válvulas esfera com conexões tipo Swagelok com vedação metálica. Todas as válvulas, tubulações e conexões são fabricadas em aço inoxidável e eletro-polido, o que as torna ideais para trabalhar em ambientes que exigem limpeza para a realização dos experimentos, além de não oxidarem e possuir um Q de desgaseificação bem baixo.

Durante a montagem dos elementos do sistema de vácuo procuramos sempre manter as tubulações alinhadas em relação às conexões, de modo a evitar um esforço mecânico excessivo sobre as mesmas, diminuindo assim a possibilidade de vazamentos.



*Figura 9: Esquemático do Sistema Montado*

Primeiramente foi feito um teste com a intenção de averiguar a velocidade da bomba mecânica de palhetas e também para certificar a inexistência de vazamentos grosseiros. E para este fim fez-se o uso do sistema exibido abaixo:



*Figura 10: Foto do Sistema Montado de Verificação de Vazamentos*

O sistema é composto por uma câmara de vácuo fornecida pela empresa PrestVácuo Ltda., de volume determinado em  $(48 \pm 1)$  Litros, uma bomba de pré-vácuo mecânica de palhetas, um medidor de pressão de membrana capacitiva, um multímetro de bancada, uma válvula de acionamento elétrico, foles metálicos e flanges.

O multímetro de bancada conectado ao medidor de pressão fornece valores de tensão através de um software em uma tabela. É necessário usar a relação que existe entre pressão e tensão, quando esses dados são tratados utilizando como ferramenta o software *Origin's Pro 8*. Determina-se o valor de *Throughput*, através da relação matemática:

$$Q = P \frac{dV}{dt} \quad (26)$$

Representado pela letra Q dado em Torr. L.s<sup>-1</sup>.

E como a velocidade efetiva de bombeamento da bomba é dada por:

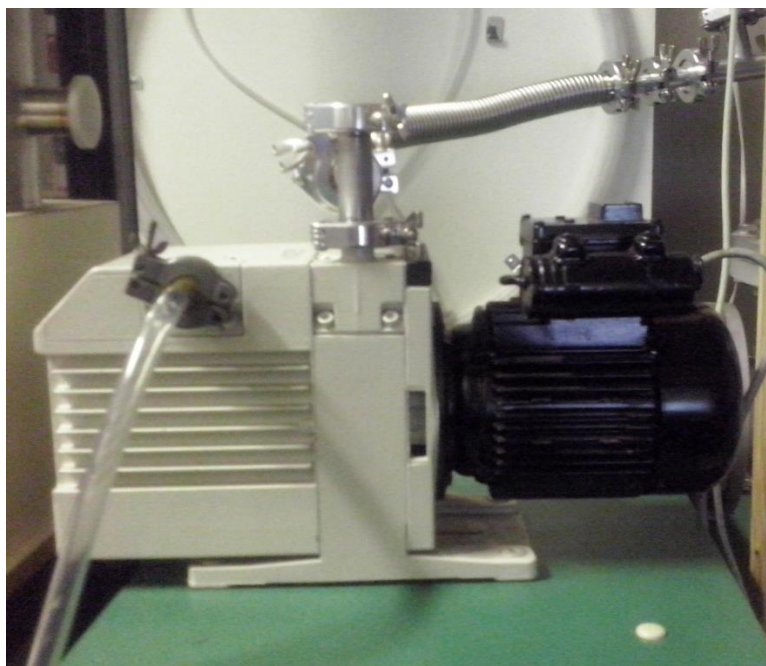
$$s(t) = \frac{Q(t)}{p(t)} \quad (27)$$

Determinamos a velocidade efetiva de bombeamento da bomba mecânica de palhetas.



#### 4.1.1. Bomba Mecânica de Palhetas

A bomba mecânica de palhetas rotativas TRIVAC D 8 B 60 Hz da figura 11 trabalha partindo da pressão atmosférica e pode chegar a pressões da ordem de  $10^{-2}$  Torr, dependendo da qualidade dos materiais que compõem o sistema.



*Figura 11: Foto da Bomba Mecânica de Palhetas*

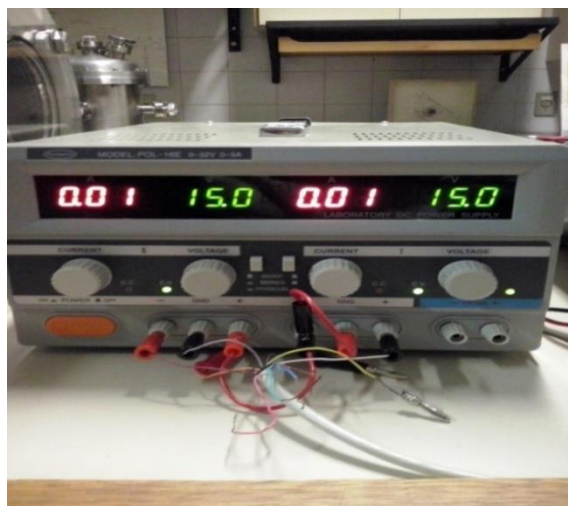
#### 4.1.2. Coleta de Dados:

Usamos um medidor de membrana capacitiva para determinar a pressão na câmara de vácuo:



*Figura 12: Foto Medidor de Pressão de Membrana Capacitiva*

Este medidor funcionava com alimentação de uma fonte *Model: POL-16E* 0-32V 0-5A variável:



*Figura 13: Fonte de Tensão Variável*

Também fizemos uso de um multímetro MDM-8165 de bancada que nos fornecia o valor de tensão do medidor. E através do fator de escala do mesmo, usamos a relação de que 1 V é equivalente a 100 Torr.



*Figura 14: Foto do Multímetro de Bancada*

Dessa forma, através da análise dos dados, obtivemos um gráfico de pressão no tempo:

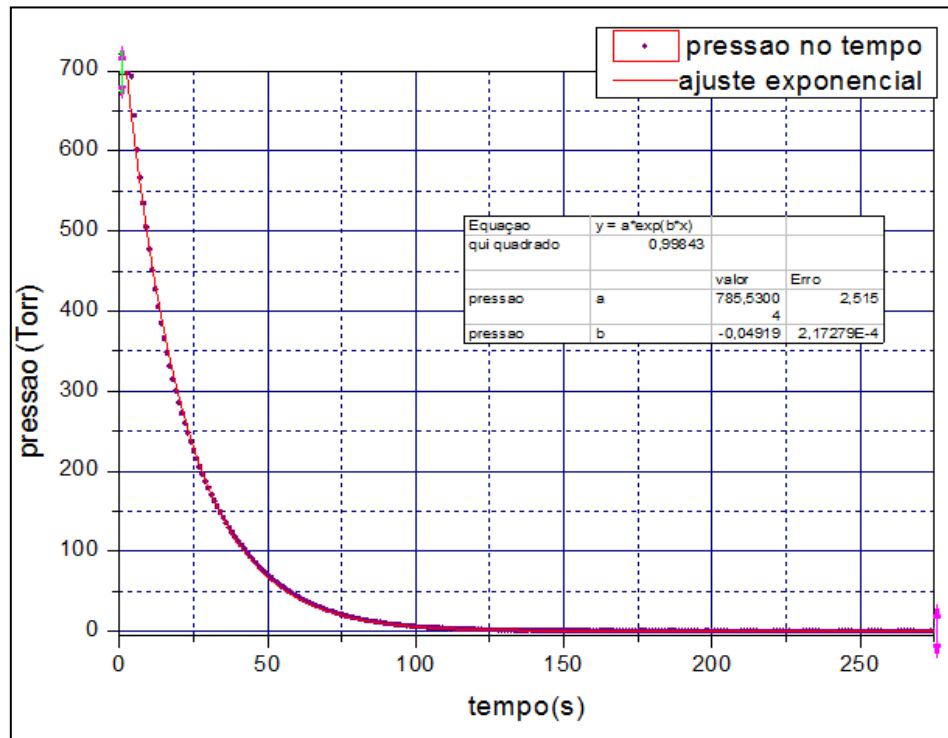


Gráfico 1: Pressão em Função do Tempo

Em teoria, a função da queda da pressão no tempo é dada por:

$$p(t) = p_0 \cdot e^{\frac{-S_b}{V_{cv}} \cdot t}$$

Fazendo a linearização desta função:

$$\log p(t) = \log p_0 - \frac{S_b}{V_{cv}} t \cdot \log e$$

$$\log e \cong \frac{1}{2,303}$$

Essa função resulta em:

$$\log p(t) = \log p_0 - \frac{1}{2,303} \cdot \frac{S_b}{V_{cv}}$$

Logo o coeficiente angular fica sendo:

$$\frac{d \log p}{dt} = - \frac{1}{2,303} x \frac{S_b}{V_{cv}}$$

Para isso mudando o gráfico para uma escala logarítmica:

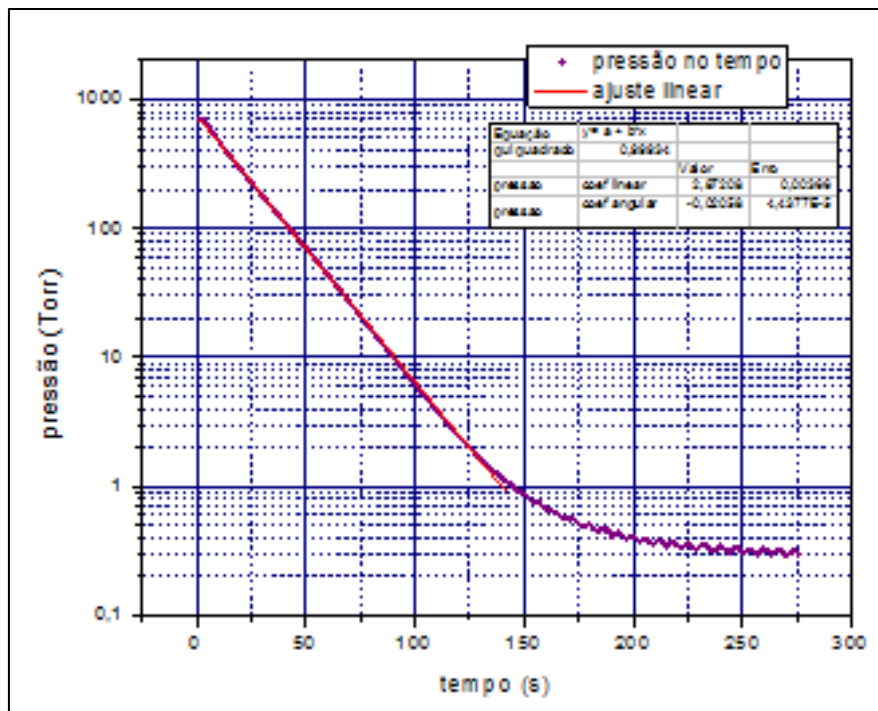


Gráfico 2: Pressão em Função do Tempo

Dessa forma podemos achar a velocidade efetiva de bombeamento:

$$-0,02058 = -\frac{1}{2,303} \times \frac{S_b}{48}$$

$$S_b = 2,3 \text{ L/s}$$

A velocidade de bombeamento fornecida pelo fabricante era de:

$$S_b = 2,8 \text{ L/s}$$

Sendo assim a diferença percentual entre as velocidades, obtida experimentalmente e dada pelo fabricante era de:

$$\text{Diferença Percentual} = \frac{2,8 - 2,3}{2,8} \times 100 = 17,9 \%$$

Logo após foi feito testes para quantificar o quanto existia de vazamento no sistema.

### 4.1.3. Teste de Vazamento 1:

Após baixar a pressão no sistema de vácuo, foi desligada a bomba mecânica de palhetas a fim de saber qual era o vazamento do sistema, através da subida de pressão, o chamado *throughput* de vazamento:  $Q_{\text{vazamento}}$ .

Usando um cronômetro e um medidor de membrana capacitiva, foi verificado uma pressão a cada segundo durante doze segundos e dessa forma foi plotado um gráfico utilizando o programa *Oring's* para verificar a curva de vazamento.

Dessa forma podemos obter um gráfico com um vazamento linear e muito pequeno:

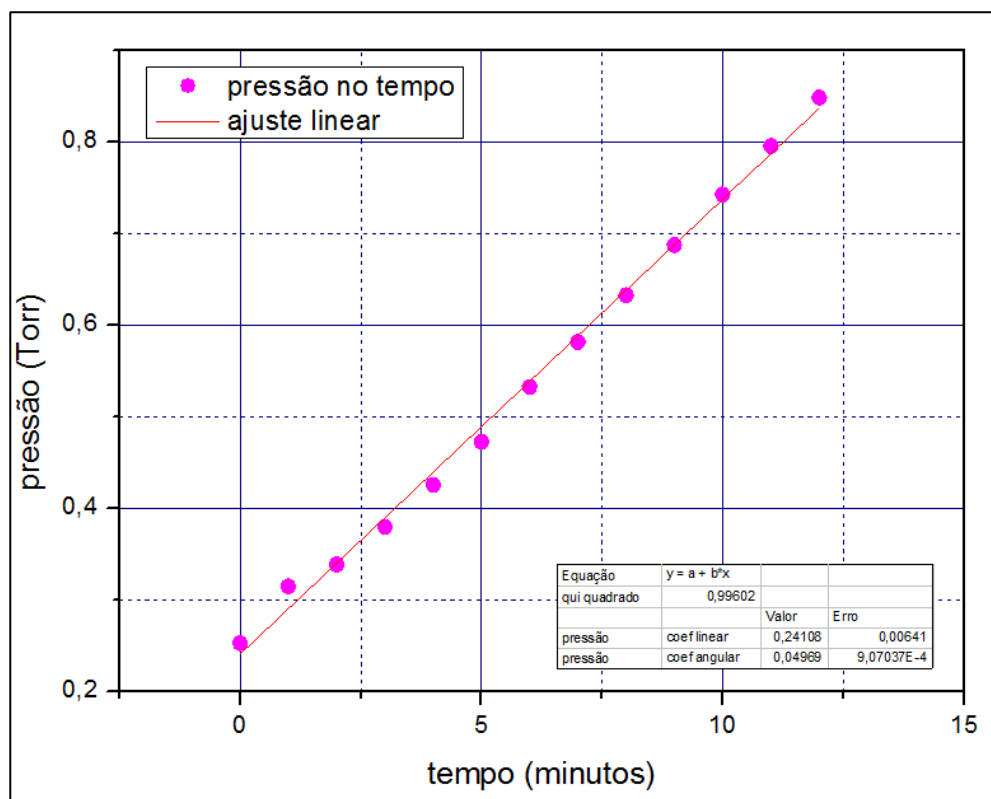


Gráfico 3: Teste de Vazamento 1, através da análise por Pressão x Tempo

Utilizando os pontos do gráfico e a relação que nos diz que o *throughput* é o produto da diferença de pressão pela variação no tempo, com o volume da câmara, temos:

Tempo (minutos)	Pressão (Torr)
0	0,253
1	0,315
2	0,339
3	0,380
4	0,426
5	0,473
6	0,533
7	0,582
8	0,633
9	0,688
10	0,743
11	0,76
12	0,849

*Tabela 4: Dados Adquiridos no Teste de Vazamento*

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{\Delta P}{\Delta t} \cdot V_{cv}$$

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{0,849 - 0,253}{12 \times 60} \times 48$$

$$Q_{\text{vazamento}} = 3,97 \text{ Torr} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$$

Assim determinamos como o nosso sistema se comporta quando a bomba de vácuo é desligada.

#### 4.1.4. Teste de Vazamento 2:

Foi feito mais testes de vazamentos para averiguar a veracidade do procedimento anterior, e a curva continuava linear e o vazamento muito próximo:

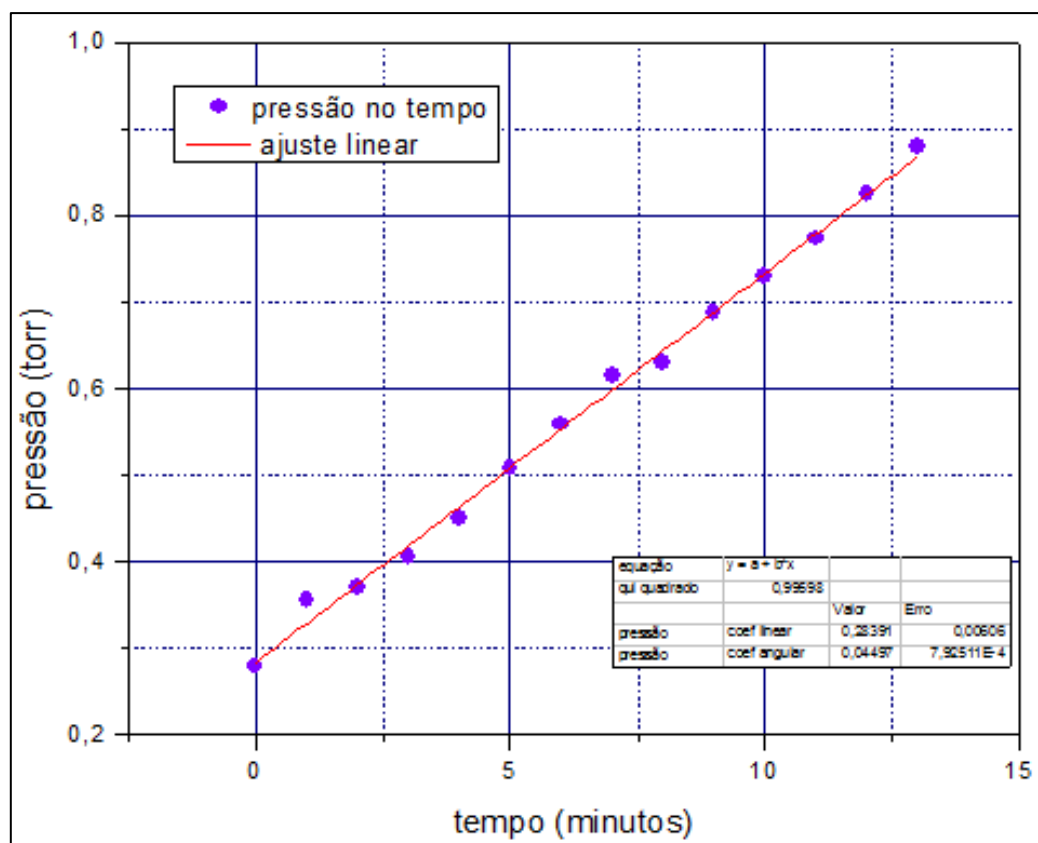


Gráfico 4: Teste de Vazamento 2, através da análise por Pressão x Tempo

A partir dos pontos do gráfico, foi usada a mesma relação anterior, para calcular o *throughput*, que dizia que o mesmo era a diferença de pressão no tempo, vezes o volume da câmara de vácuo.

Tempo (minutos)	Pressão (Torr)
0	0,279
1	0,355
2	0,371
3	0,406
4	0,45
5	0,508
6	0,559
7	0,615
8	0,63
9	0,688
10	0,729
11	0,773
12	0,825
13	0,879

*Tabela 5: Dados Adquiridos no Teste de Vazamento*

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{\Delta P}{\Delta t} \cdot V_{cv}$$

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{0,879 - 0,279}{13 \times 60} \times 48$$

$$Q_{\text{vazamento}} = 3,63 \text{ Torr.litro.s}^{-1}$$

O resultado também foi reproduzido com um valor similar de vazamento com a diferença percentual de:

$$\text{Diferença Percentual} = \frac{3,97 - 3,63}{3,97} \times 100 = 8,56\%$$

Com uma média de:

$$Q_{\text{Vazamento médio}} = 3,8 \text{ Torr.litro s}^{-1}$$

Podemos concluir até aqui que o procedimento adotado além de coerente é reprodutível, de forma que podemos dar continuidade com as outras experiências.



#### 4.1.5. Comparação dos Medidores

Visto em teoria que quando a condutância de um sistema de vácuo for muito maior que a velocidade efetiva de bombeamento da bomba mecânica, o bombeamento efetivo do sistema fica sendo limitado pela própria velocidade efetiva de bombeamento. Dessa forma podemos assumir que a velocidade efetiva de bombeamento do sistema é aproximadamente a velocidade efetiva da bomba de pré-vácuo.

Calculando a condutância do sistema temos que:

$$C_V = 180 \frac{d^4}{L} p_{atm}$$

Tendo as dimensões das tubulações e assumindo a pressão atmosférica local com um valor aproximado de 700 Torr verificado em laboratório, podemos calcular a condutância do sistema.

$$C_V = 180 \frac{2,5^4}{100} 700$$
$$C_V = 48230 \text{ Torr.litro.s}^{-1}$$

Podemos verificar que a condutância é muito maior que a velocidade efetiva de bombeamento dada pelo fabricante:

$$S_b = 2,8 \text{ L/s}$$

E calcular a velocidade efetiva de bombeamento do sistema de vácuo teoricamente:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_b} + \frac{1}{C \cdot p_{atm}}$$

$$S_{ef} = 2,8 \text{ L/s}$$

Com a diferença percentual de 0%.

Podemos também verificar experimentalmente que a velocidade efetiva de bombeamento do sistema de vácuo, é aproximadamente a velocidade de bombeamento da bomba, e para tal foi utilizado um circuito de vácuo como o mostrado na Figura 15, onde foram colocados dois medidores de pré- vácuo um na entrada da câmara, outro na entrada da bomba de vácuo.

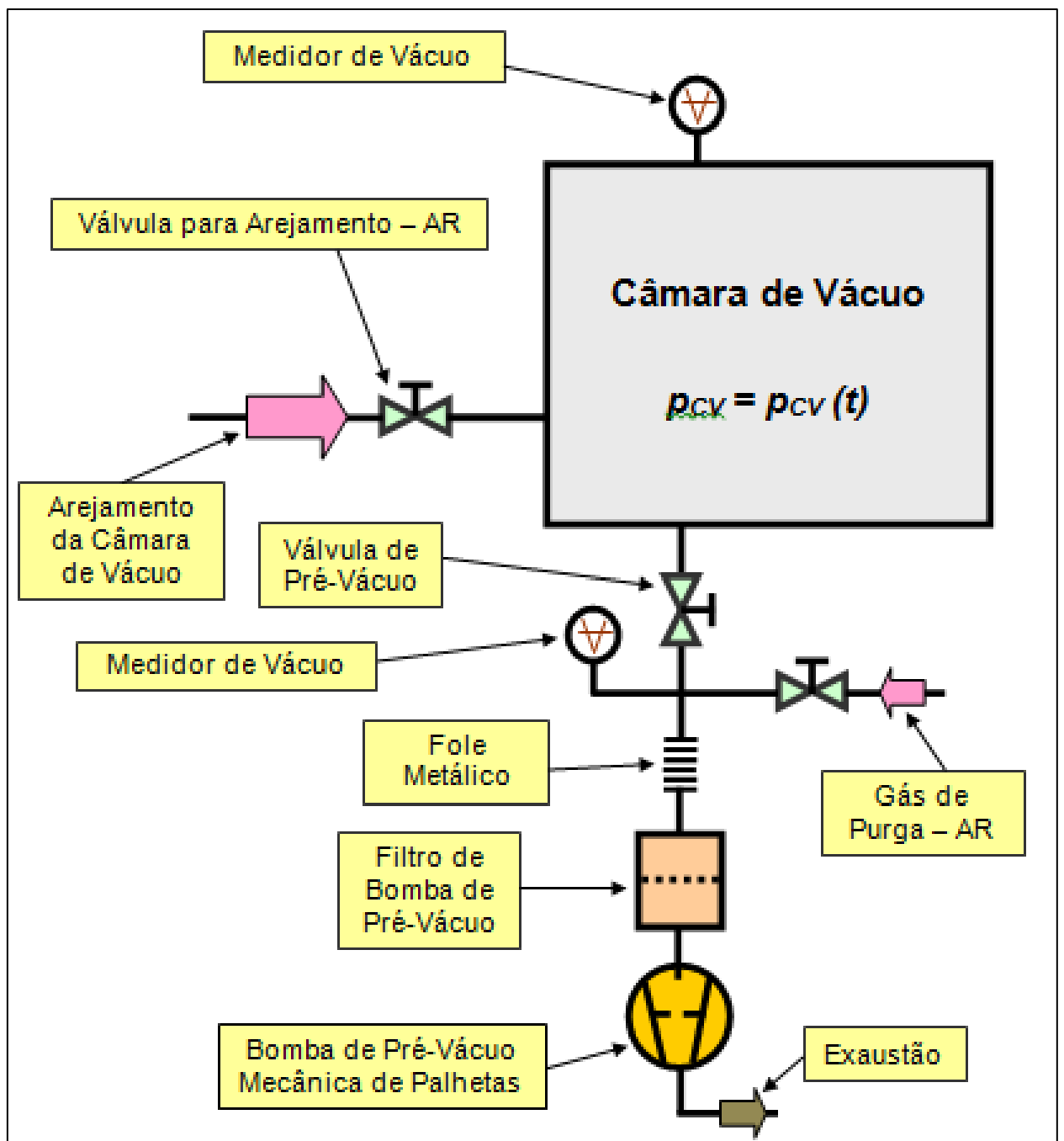
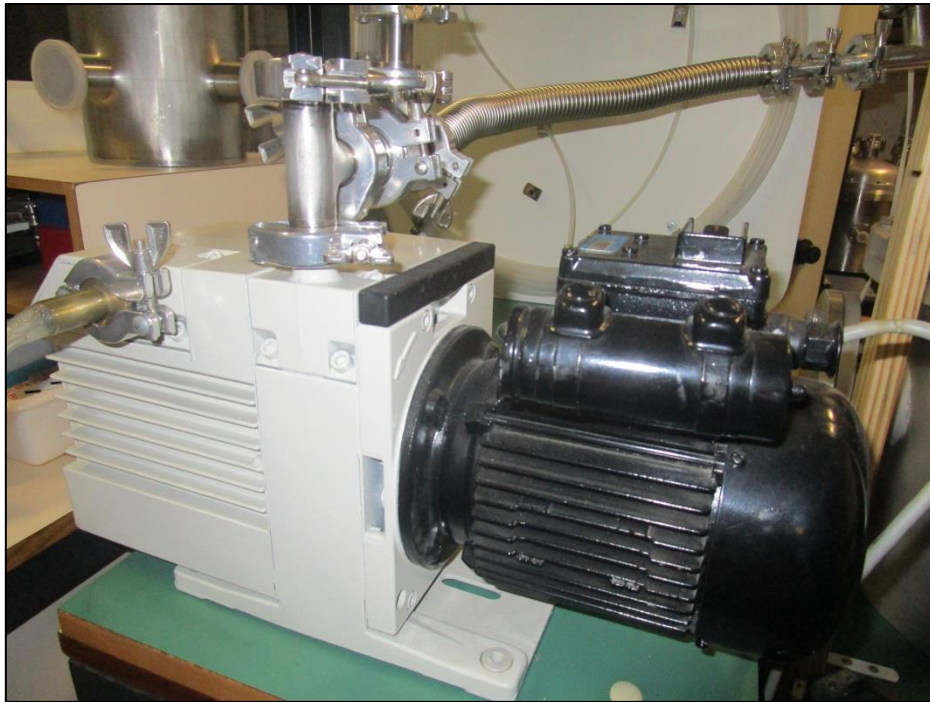


Figura 15: Esquemático do Teste de Velocidade Efetiva de Bombeamento



*Figura 16: Foto da Bomba Mecânica de Palhetas*

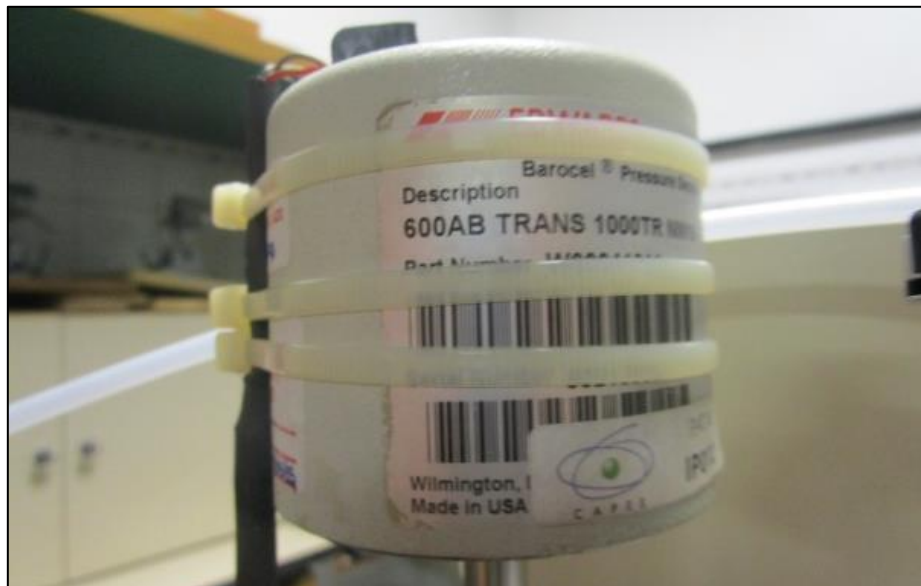
O experimento foi realizado com medidores de membrana capacitiva (MMC), um na saída da bomba (modelo MKSBaratron) e outro na entrada da câmara (modelo Edwards Barocel).

<i>Siglas</i>	<i>Medidor de Membrana Capacitiva</i>	<i>Pressão Inicial (Torr)</i>
MMC 1	MKS Baratron	698,9±0,1
MMC 2	Edwards Barocel	699,6±0,1

*Tabela 6: Comparação de Medidores de Membrana Capacitiva (MMC)*



*Figura 17: Medidor de membrana capacitiva BARATRON com fundo de escala de 1000 torr, resolução de 0,001 % F.S. e precisão de 0,25 % da leitura. (CORTESIA DA MKS).*



*Figura 18: Medidor de membrana capacitiva BAROCEL com fundo de escala de 1000 torr, resolução de 0,001 % F.S. e precisão de 0,25 % da leitura*

A curva de pressão no tempo para o MMC Edwards *Barocel*:

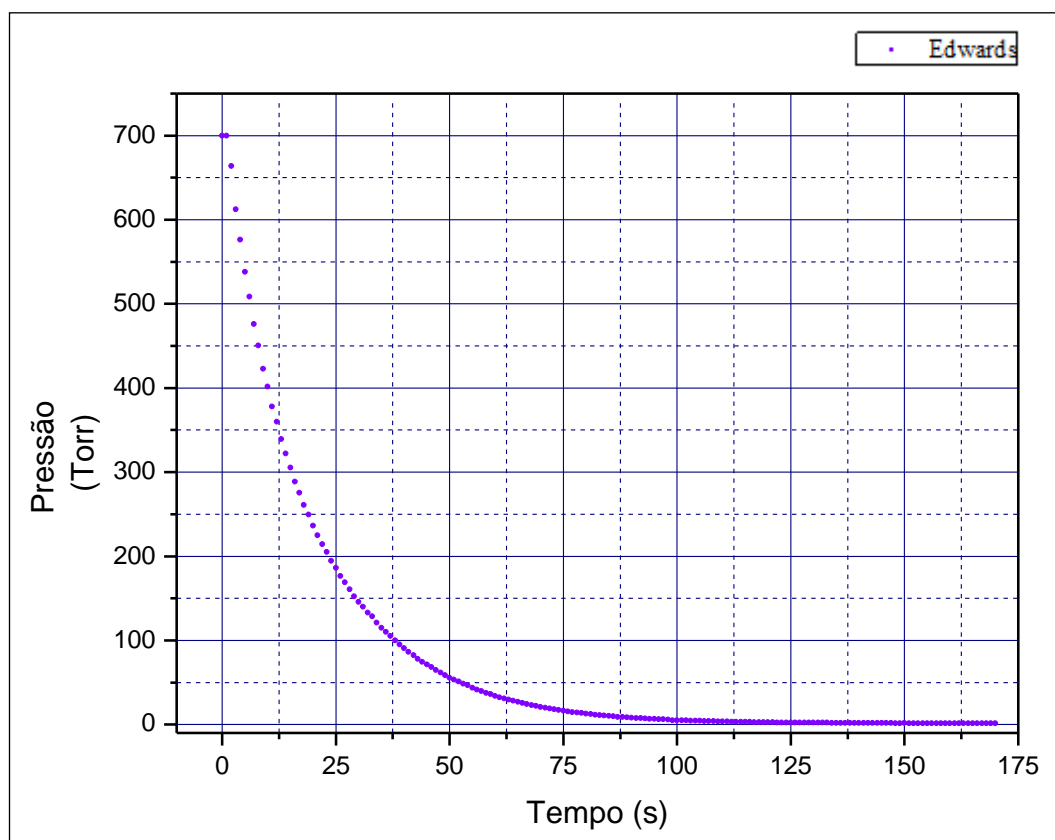


Gráfico 5: Curva de Pressão x Tempo no MMC Edwards Barocel

Adotando o mesmo procedimento anterior mudamos o gráfico para uma escala logarítmica:

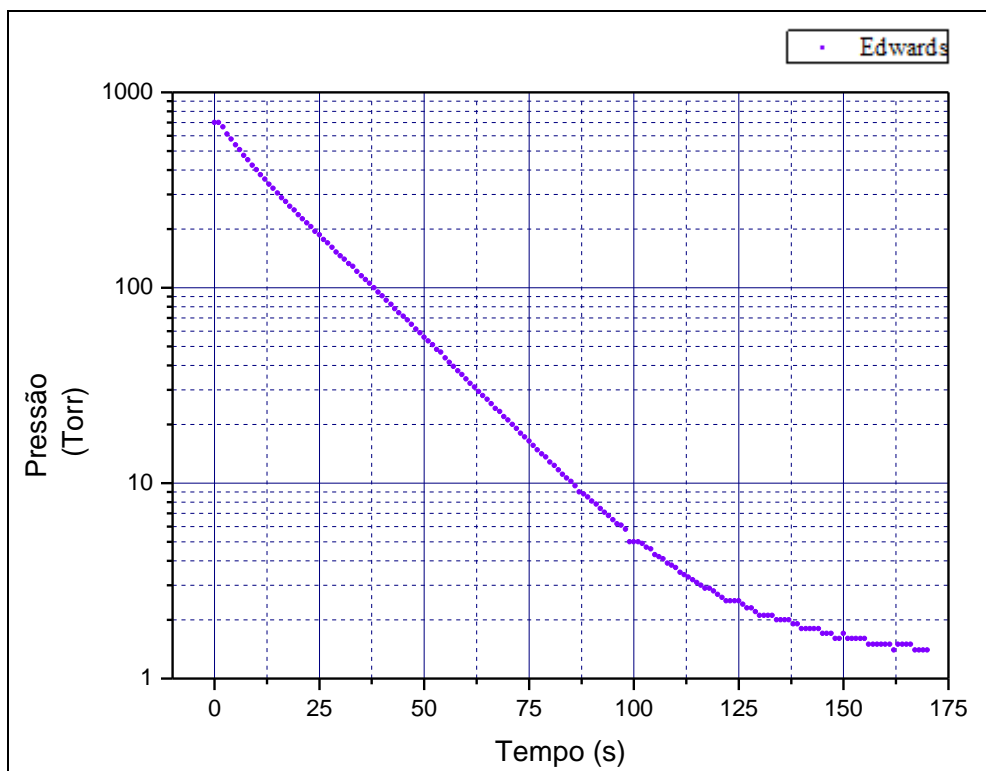


Gráfico 6: Curva de Pressão x Tempo na escala logarítmica no MMC Edwards Barocel  
E fazendo um ajuste linear:

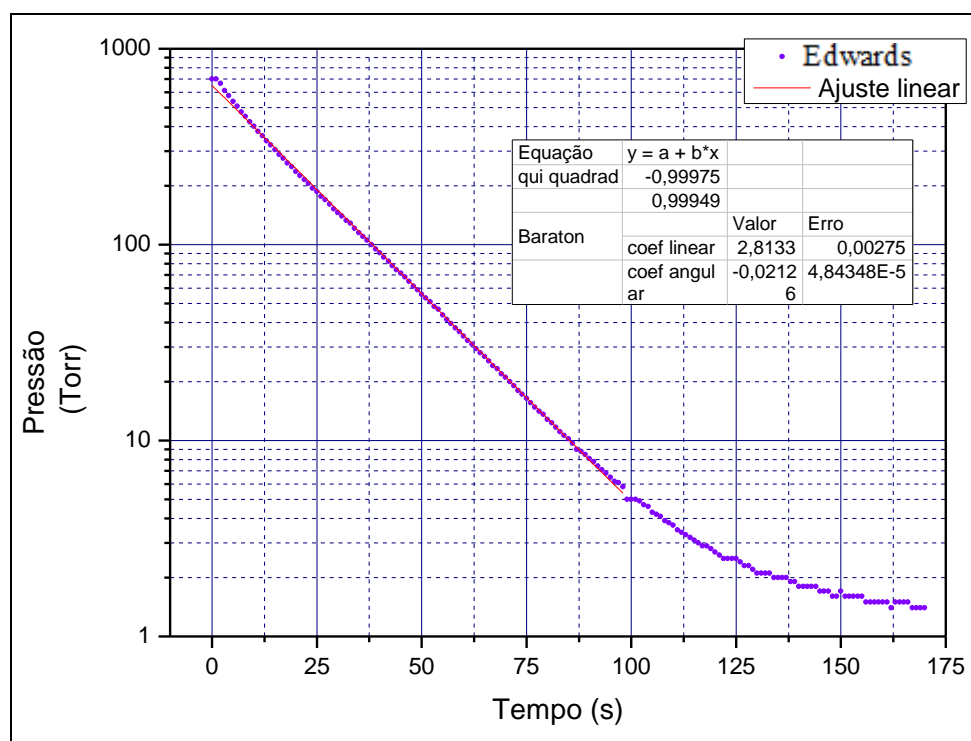


Gráfico 7: Curva de Pressão x Tempo com Ajuste Linear no MMC Edwards Barocel

Temos que a função da queda da pressão no tempo é dada por:

$$p(t) = p_0 \cdot e^{\frac{-S_b}{V_{cv}} \cdot t}$$

Fazendo a linearização desta função:

$$\log p(t) = \log p_0 - \frac{S_b}{V_{cv}} t \cdot \log e$$
$$\log e \cong \frac{1}{2,303}$$

Essa função resulta em:

$$\log p(t) = \log p_0 - \frac{1}{2,303} \cdot \frac{S_b}{V_{cv}}$$

Logo o coeficiente angular fica sendo:

$$\frac{d \log p}{dt} = - \frac{1}{2,303} \cdot \frac{S_b}{V_{cv}}$$

Dessa forma podemos achar a velocidade efetiva de bombeamento:

$$-0,02126 = - \frac{1}{2,303} \cdot \frac{S_b}{48}$$

$$S_b = 2,35 \text{ L/s}$$

Do mesmo modo podemos fazer a análise para o medidor MKS *Baratron*:

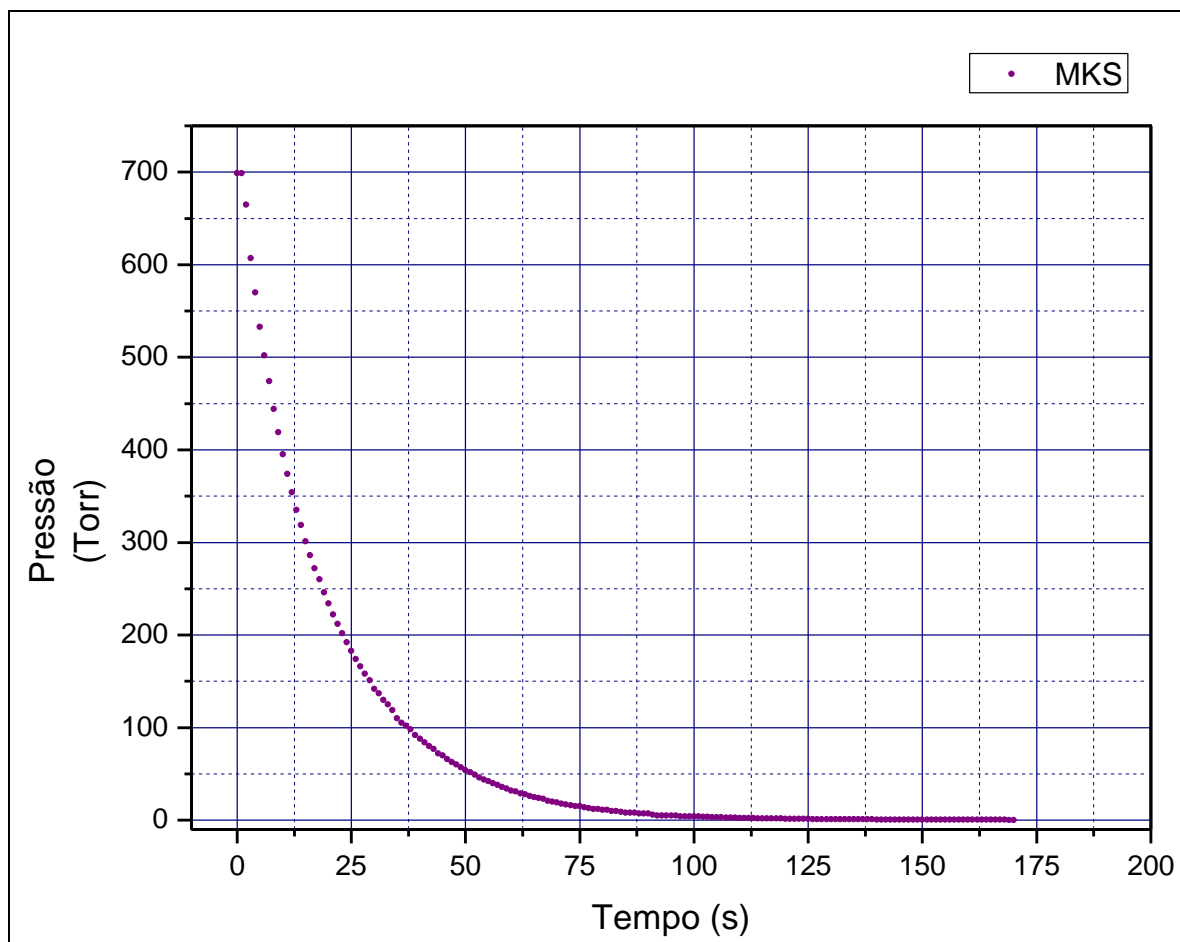


Gráfico 8: Curva de Pressão x Tempo no MMC MKSBaratron



Colocando em escala logarítmica:

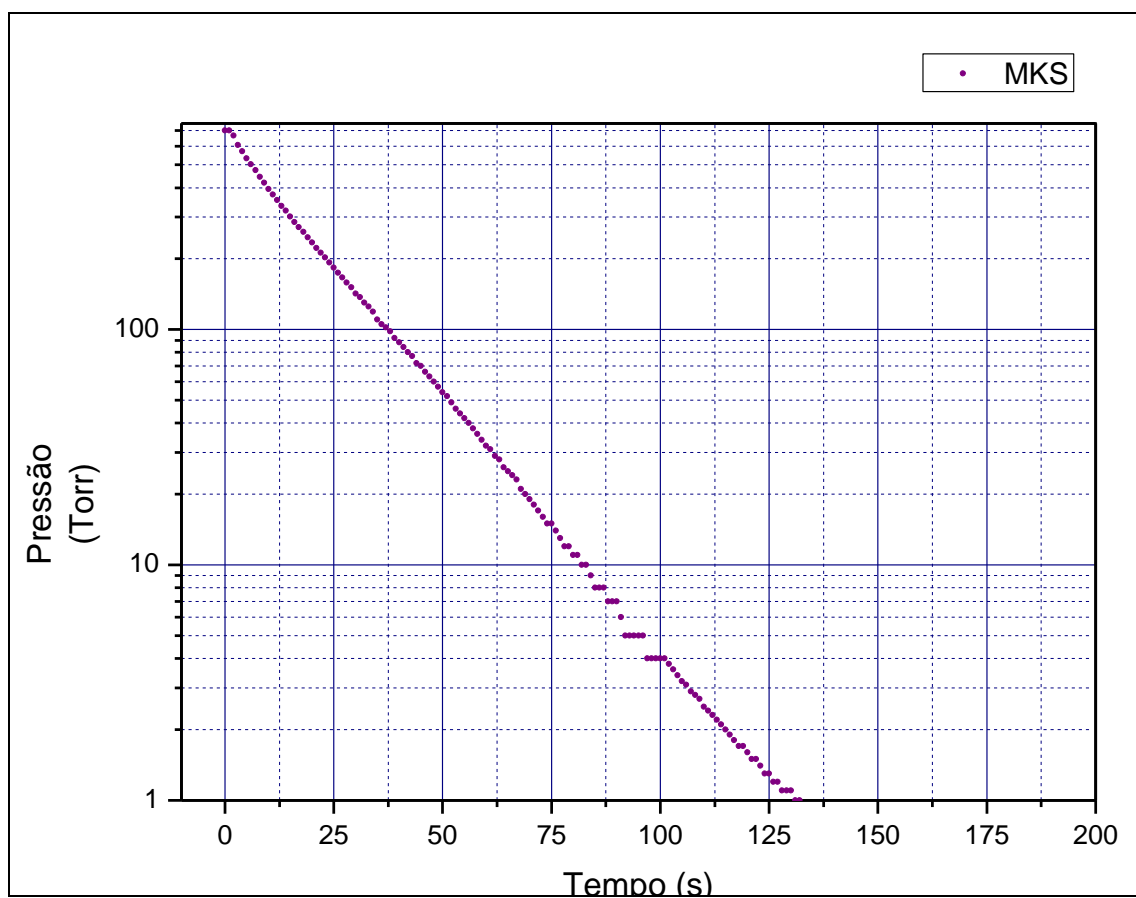


Gráfico 9: Curva de Pressão x Tempo na escala logarítmica no MMC MKSBaratron

E fazendo um ajuste linear até onde a pressão passa a ser constante:

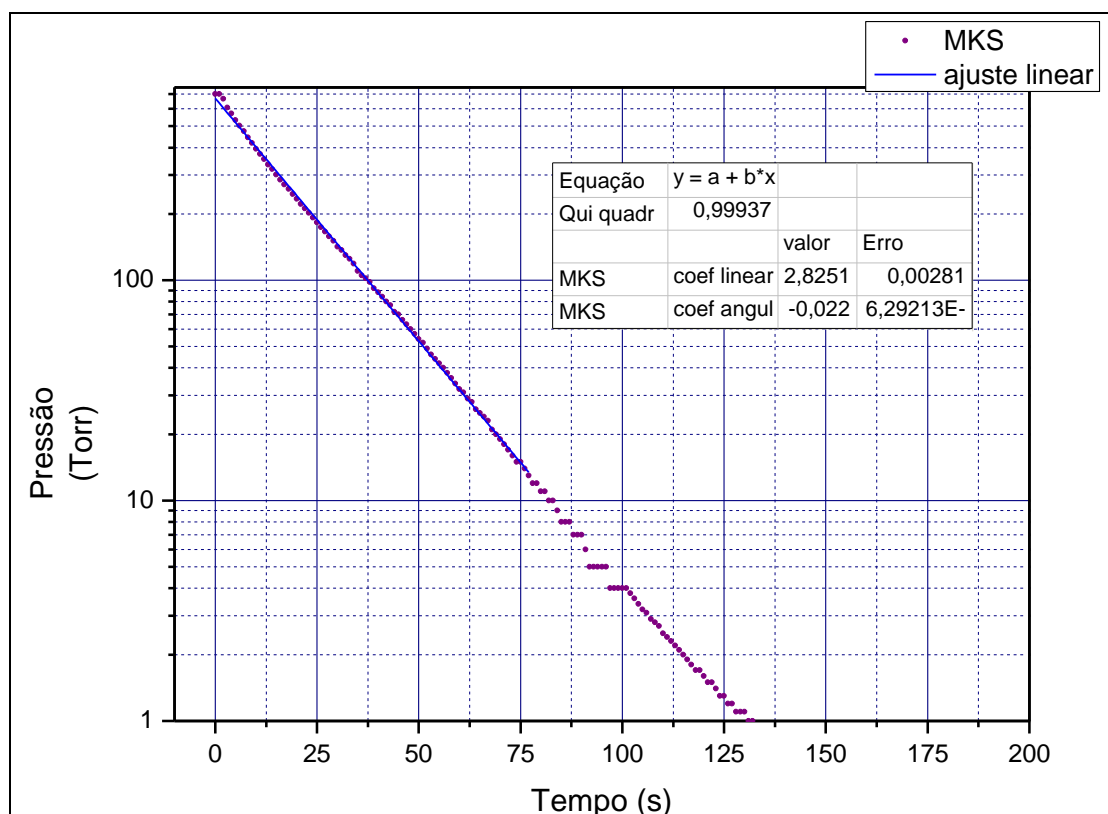


Gráfico 10: Curva de Pressão x Tempo com ajuste linear no MMC MKSBaratron

Da mesma forma do anterior:

$$0,02203 = \frac{1}{2,303} X \frac{S_b}{48}$$

Logo a velocidade de bombeamento  $S_b$  será

$$S_b = 2,44 \text{ L/s}$$

Com esse teste conclui-se que a velocidade efetiva de bombeamento do sistema é aproximadamente a velocidade efetiva de bombeamento da bomba.

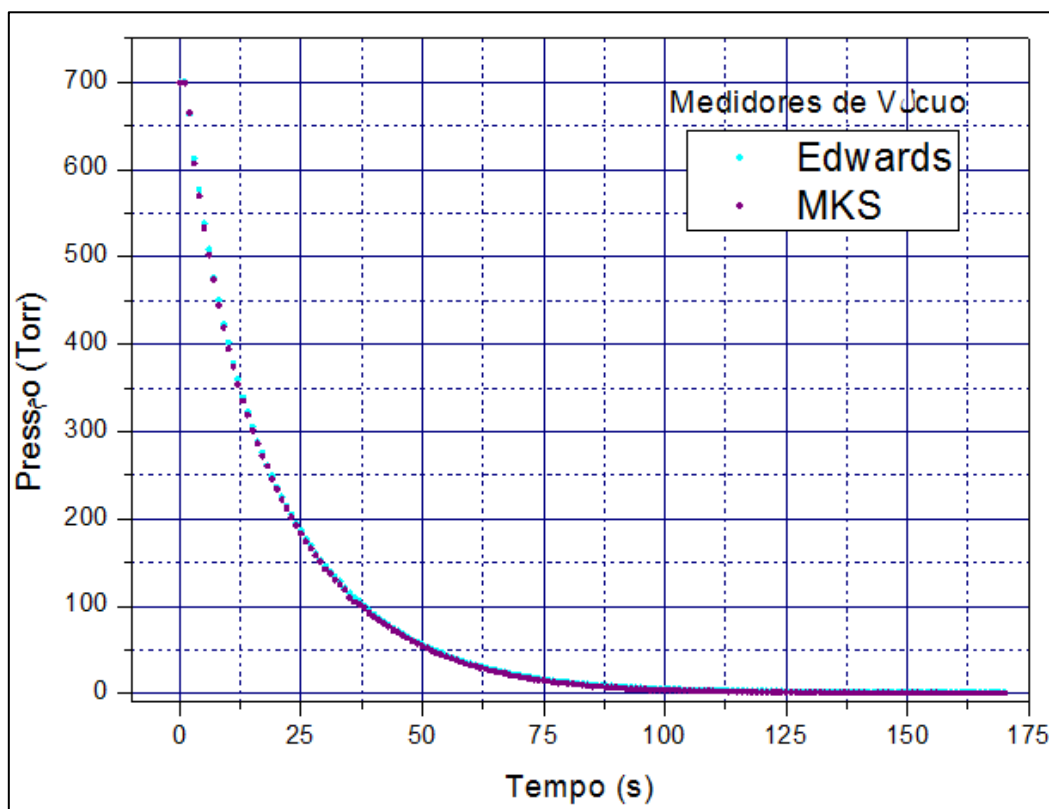
$$\text{Diferença Percentual} = \frac{2,44 - 2,35}{2,44} \times 100\%$$

$$\text{Diferença Percentual} = 3,69\%$$

Velocidades de Bombeamento	L/s	Erro em Relação ao Fabricante
$S_b(\text{MKS})$	$2,44 \pm 0,02$	13,8
$S_{ef}(\text{Baratron})$	$2,35 \pm 0,02$	17,0
$S_{fabricante}$	$2,83 \pm 0,02$	-

*Tabela 9: Comparação das Velocidades de Bombeamento*

Graficamente também se pode ver a coincidência das curvas:



*Gráfico 10: Comparação das Velocidades de Bombeamento pelos Medidores do Tipo Edwards e MKS*

Após isso prosseguimos para os próximos experimentos.

## 4.2.Método da Pipeta

O método da pipeta ou método do volume variável tem o arranjo similar ao da figura 19.

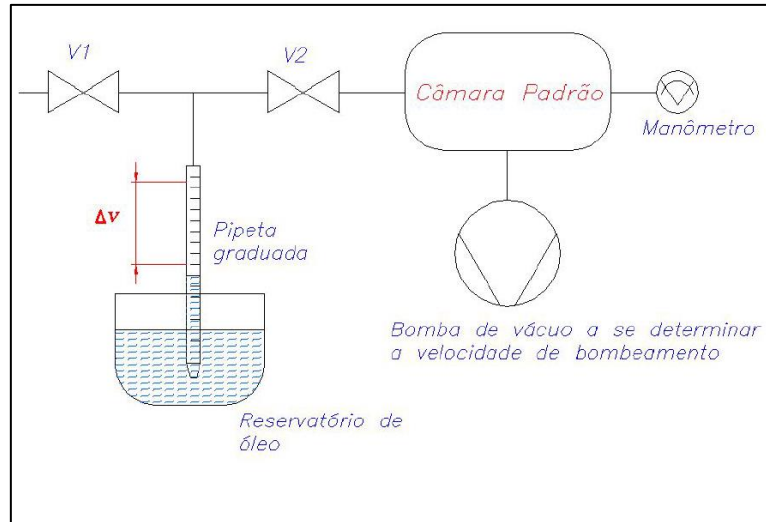


Figura 19: Esquemático do Método da Pipeta

Primeiramente determinamos a pressão final ( $p_f$ ) do sistema mantendo a válvula um (V1), que é a válvula agulha e a válvula dois (V2), que é a válvula comum, fechadas. Isso é importante, pois a bomba de vácuo deve não apresentar efeitos típicos de início de bombeamento; ou seja, tem que estar em regime estacionário.

Depois de estabilizar o sistema em uma pressão final, vemos que a velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ ), será fixa para este valor de pressão e podemos calcular o throughput (Q) total do sistema:

$$Q_t = S_{ef} \cdot p_f$$

Onde:  $S_{ef}$  como já visto anteriormente pode ser considerada a velocidade efetiva de bombeamento da bomba de vácuo.

Deixamos agora a válvula comum aberta e ajustamos a injeção de gases no sistema de vácuo através da válvula agulha (que estará aberta), neste momento o manômetro de membrana capacitiva registra uma elevação na pressão. Fazemos novamente o ajuste para uma dada pressão, que deve permanecer constante.

Fecha-se a válvula comum e o gás bombeado é contido no tubo da pipeta e na tubulação adjacente. Isso faz com que a pressão na tubulação diminua e como uma extremidade da pipeta está imersa em um líquido, no caso, o óleo de silicone (com

especificação: 704 DC - Dow Corning) e esse líquido possui viscosidade, com o efeito da pressão atmosférica, ele tende a subir pela pipeta.

Dessa forma temos uma equação que descreve o equilíbrio na coluna da pipeta:

$$p_{atm} = p_p + \rho gh$$

$$p_p = p_{atm} - \rho gh$$

Que depende de:  $\rho$ , que é a densidade do óleo de silicone no recipiente,

$h$  é a altura que o óleo atinge,

$p_p$  é a pressão na pipeta e

$p_{atm}$  é a pressão atmosférica.

Fazendo uma dedução matemática apresentada no apêndice desse trabalho chegamos a expressão.

$$S_b = \frac{p_{atm} \times \Delta V}{(p - p_f) \Delta t}$$

Para este experimento foi usado o seguinte arranjo de um sistema de vácuo, representado na figura 20.



*Figura 20: Foto do Sistema de Vácuo Utilizado Para o Método da Pipeta*

Esse sistema de vácuo foi baseado no seguinte esquemático:

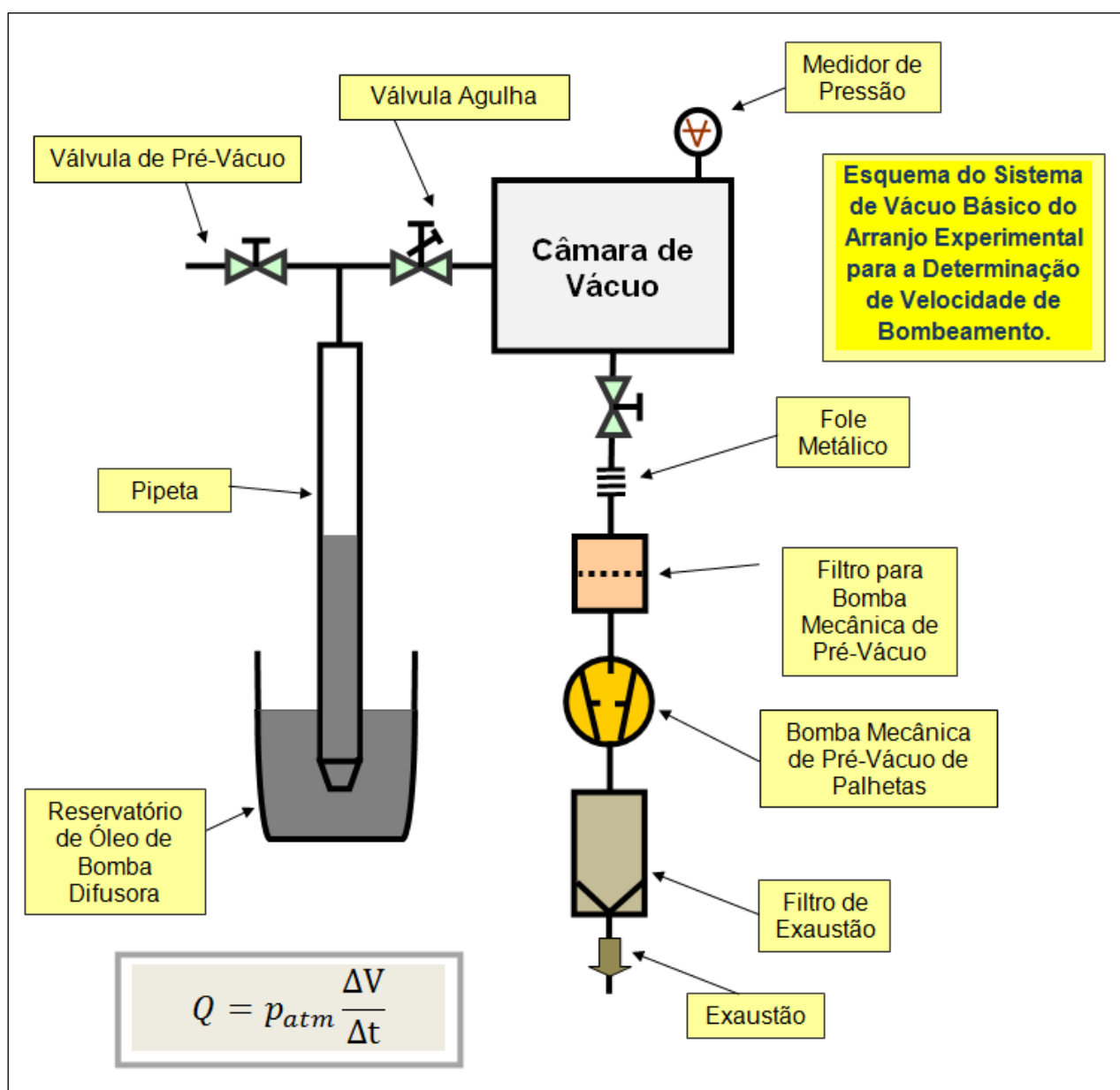


Figura 21: Esquemático do Método da Pipeta

Depois de obter vários valores de volume no tempo, foi plotado um gráfico de volume no tempo, onde está apresentado um ajuste linear e podemos ver que a pressão na pipeta se mantém constante.

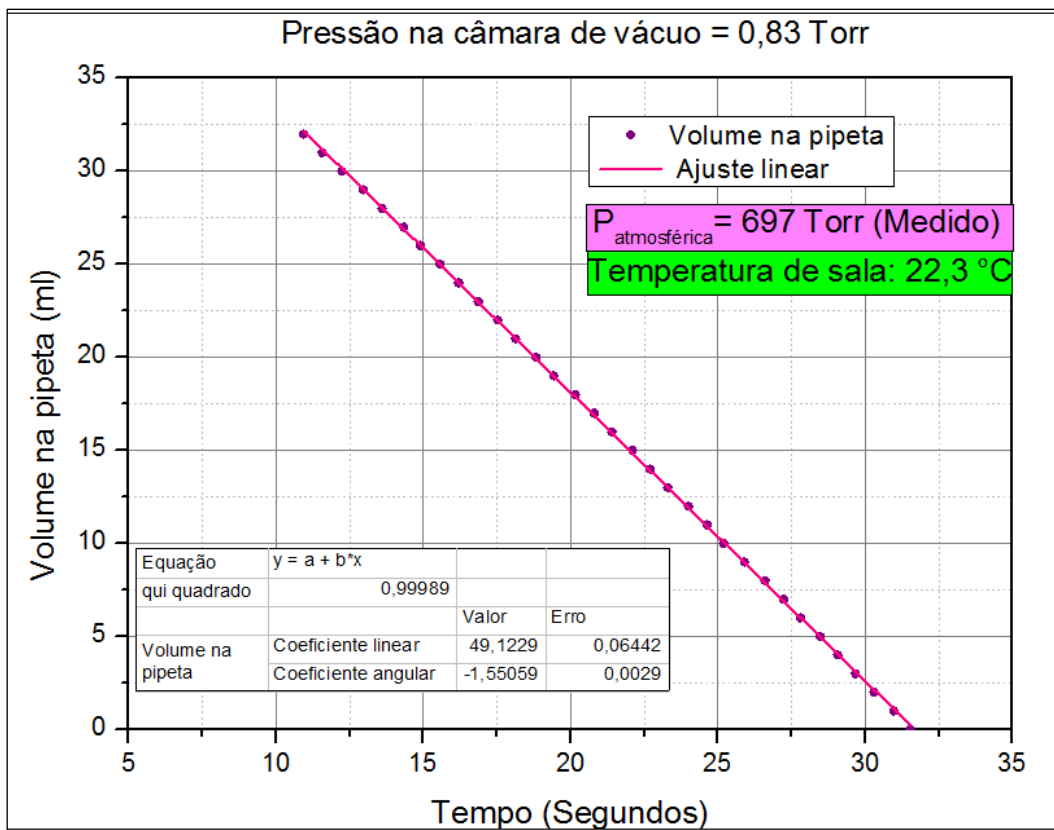


Gráfico 11: Ajuste Linear do Volume pelo Tempo

E conforme a expressão vista anteriormente

$$S_b = \frac{p_{\text{atm}} \cdot \Delta V}{(p - p_f) \cdot \Delta t}$$

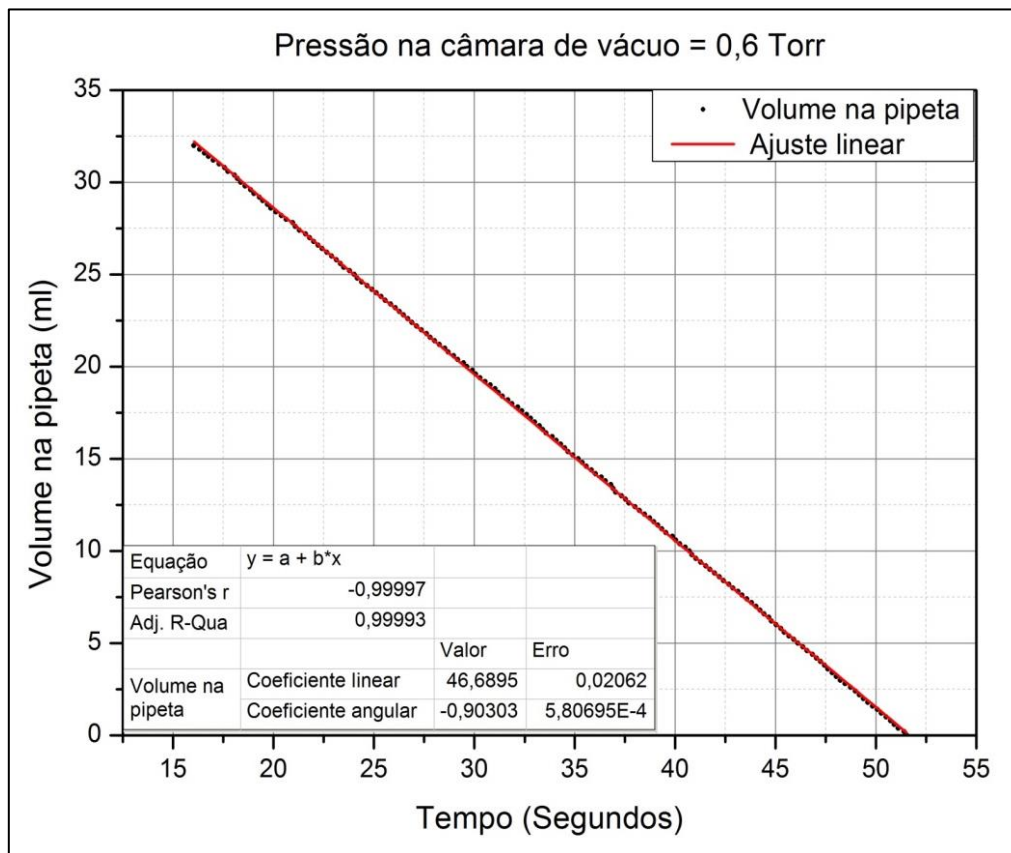
Considerando que  $\frac{dv}{dt}$  é o coeficiente angular  $\frac{dv}{dt} = 1,55059$ :

$$S_b = \frac{697 \cdot 1,55059 \times 10^{-3}}{(0,83 - 0,37)}$$

$$S_b = 2,35 \text{ L/s}$$



Usando o mesmo procedimento, mudando a pressão na câmara de vácuo temos:



*Gráfico 12: Volume da Pipeta no Tempo.*

E novamente:

$$S_b = \frac{p_{atm} \cdot \Delta V}{(p - p_f) \cdot \Delta t}$$

Considerando que  $\frac{dv}{dt}$  é o coeficiente angular  $\frac{dv}{dt} = 0,90303$ :

$$S_b = 2,24 \text{ L/s}$$

### 4.3. Alto-Vácuo

O processo de metalização é feito na faixa de pressão que chamamos de alto vácuo. Para fazermos um sistema de alto vácuo foi utilizado uma bomba de vácuo turbomolecular modelo Alcatel ATP 80, acoplada ao sistema de pré-vácuo anterior.



*Figura 22: Bomba Turbomolecular Acoplada com Bomba Mecânica de Palhetas.*

A informação que tínhamos era que essa bomba de vácuo chegava a pressões de  $10^{-6} \text{ Torr}$ , com velocidade efetiva de bombeamento  $S_{ef} = 80 \text{ L/s}$ .



*Figura 23: Bomba Mecânica de Palhetas (lado esquerdo da imagem) e Bomba Turbomolecular (lado direito da imagem)*

Primeiramente foi ligado o sistema de vácuo para ver qual era a pressão final do sistema e com um medidor Penning verificou-se que ela chegava a pressões de:

$$p_f = 4 \times 10^{-4} \text{ mbar}$$

Após isso, foi feito um teste de vazamento similar aos outros para verificar a acurácia do sistema.

Do mesmo modo foi utilizado um cronômetro e um medidor Penning. Foi verificada uma pressão a cada segundo durante doze segundos e dessa forma foi plotado um gráfico utilizando o programa *Oring's* para verificar a curva de vazamento.

Dessa forma podemos obter um gráfico com um vazamento linear e muito pequeno.

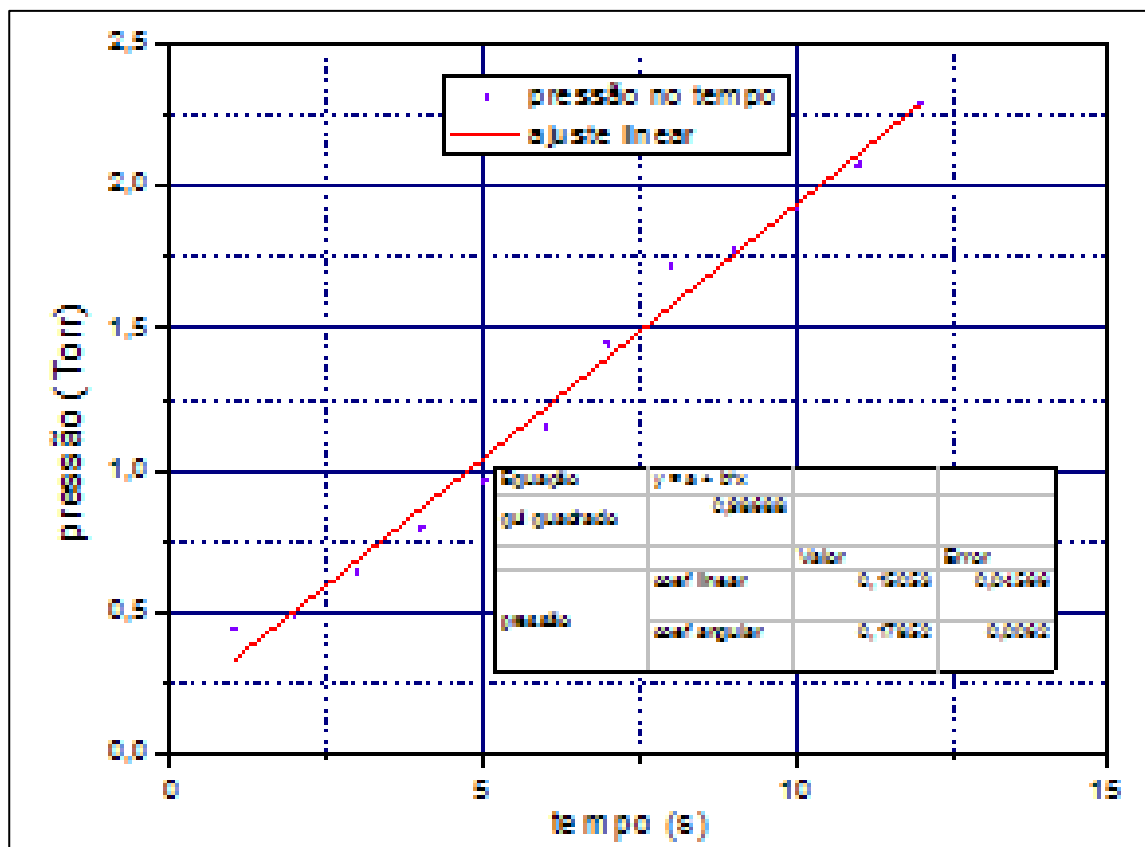


Gráfico 12: Teste de Vazamento do Sistema de Alto Vácuo

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V_{cv}$$

$$Q_{\text{vazamento}} = \frac{2,293 - 0,443}{(12 - 1) \cdot 60} \cdot 48$$

$$Q_{\text{vazamento}} = 3,39 \text{ Torr} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$$

Era pretendido chegar a pressões equivalentes a uma metalizadora industrial, usando como exemplo a metalizadora da empresa Arteb, em que era utilizada a mesma pipeta que a utilizada no método anterior.

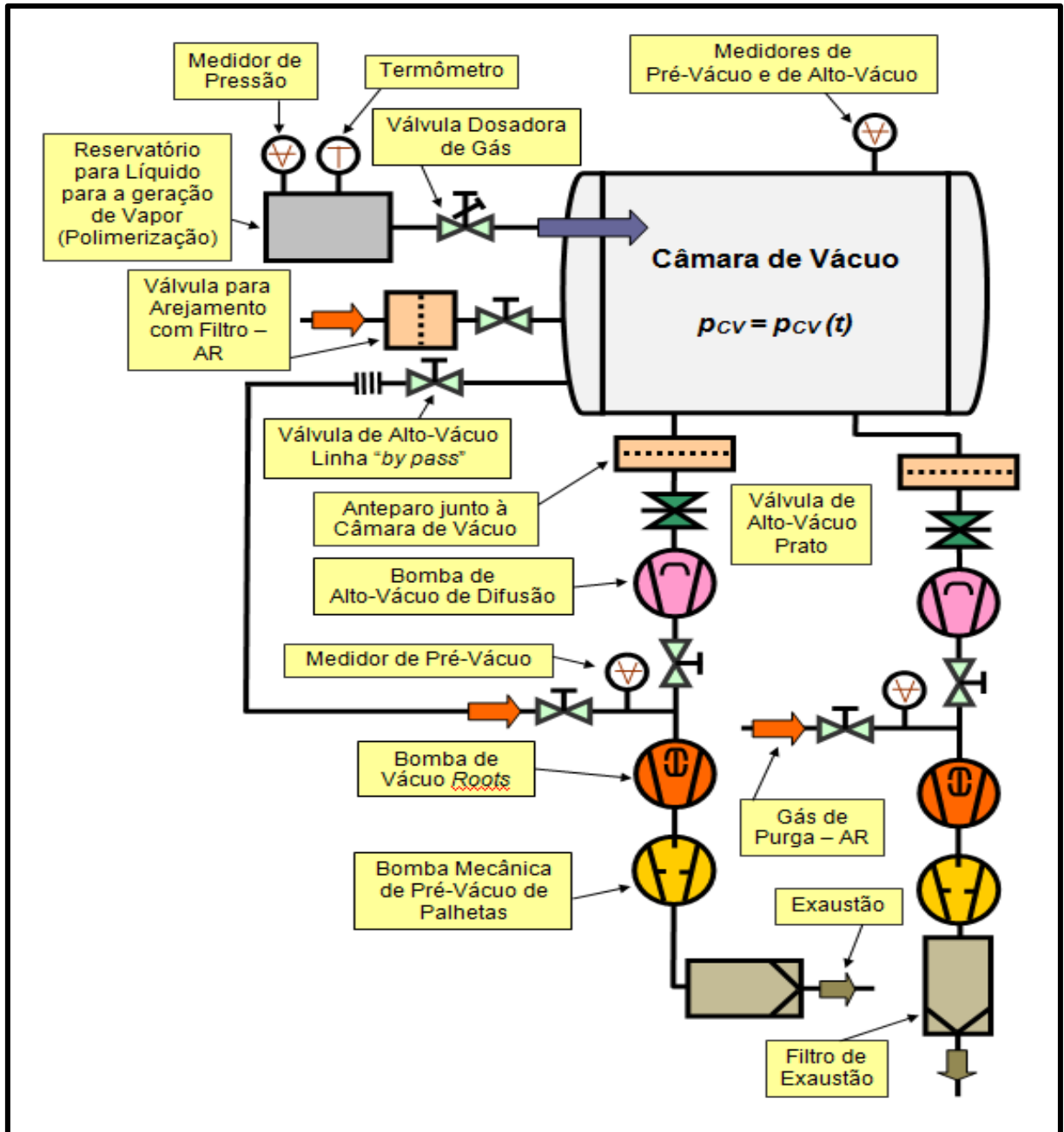


Figura 24: Esquema do Circuito de Alto-Vácuo da Metalizadora Arteb – 1900





*Figura 25: Fotos da Metalizadora Industrial Arteb.*

Através da medição de pontos de volume no tempo com a metalizadora industrial através do método da pipeta temos:

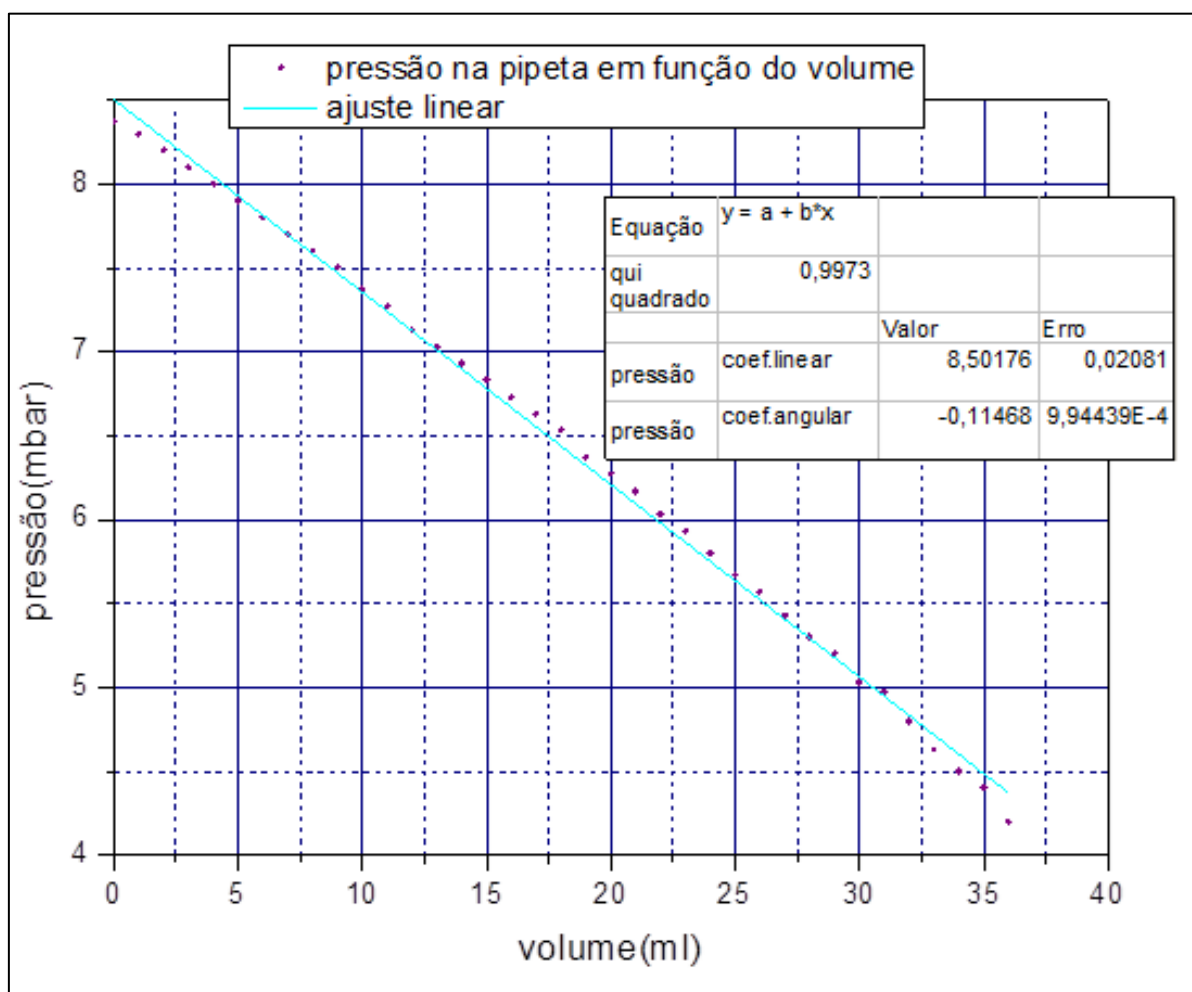


Gráfico 15: Pressão na pipeta em função do Volume

Podemos então calcular a velocidade efetiva de bombeamento do sistema através da equação.

$$S_b = \frac{p_{atm} \cdot \Delta V}{(p - p_f) \cdot \Delta t}$$

Os resultados de pressão obtidos com a metalizadora industrial da empresa ARTEB estão demonstrados na tabela:

Variação do Tempo	Variação do Volume	Throughput	$p_f$	$p_{cv}$	$S_{ef}$
s	L	mbar.L.s <sup>-1</sup>	Mbar	mbar	L.s <sup>-1</sup>
5,5	0,034	5,8	2,00E-04	4,00E-04	29213,89
3,1	0,028	8,4	1,70E-04	4,00E-04	36444,19
8,1	0,032	3,7	1,40E-04	3,00E-04	23124,23

*Tabela 10: Resultados da Metalizadora da Arteb*

Vemos os seguintes resultados das pressões finais obtidas com a metalizadora:

$$p_f = 1,7 \times 10^{-4} \text{ mbar} \quad \text{e} \quad p_f = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mbar}$$

Na tabela 11, há várias medições, que consistem na utilização de uma linha de bombeamento ou ambas as linhas de bombeamento (que se tornava necessária, devido às altas taxas de desgaseificação):

	Variação do Tempo	Variação do Volume	Throughput	$p_f$	$p_{cv}$	$S_{ef}$	Comentários
	s	L	mbar.L.s <sup>-1</sup>	mbar	mbar	L.s <sup>-1</sup>	
1º medição	24,4	0,030	1,2	1,6E-04	2,3E-04	16531	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.
2º medição	11,6	0,028	2,3	1,6E-04	2,8E-04	18973	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.
3º medição	9,1	0,034	3,5	1,6E-04	3,4E-04	19447	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo. Houve uma alteração da pressão durante a medição para 3,2E-4.
4º medição	8,6	0,032	3,5	1,6E-04	3,4E-04	19522	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.
7º medição	3,6	0,032	8,3	3,60E-05	4,40E-04	20511	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.
8º medição	6,4	0,034	5,0	5,20E-05	4,00E-04	14417	Uma bomba difusora bombeando a câmara de vácuo - linha A.
9º medição	6,5	0,035	5,1	5,50E-05	3,80E-04	15574	Uma bomba difusora bombeando a câmara de vácuo - linha B.
10º medição	6,1	0,033	5,1	3,00E-05	3,20E-04	17535	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.
11º medição	4,0	0,035	8,1	3,00E-05	4,00E-04	22010	Duas bombas difusoras bombeando a câmara de vácuo.

*Tabela 11: Resultados da Metalizadora da Arteb*



Comparação dos Resultados em Relação ao Obtido no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC/SP e o Industrial, Obtido na Empresa ARTEB:

<b>Pressão de Trabalho do Laboratório</b>	<b>Pressão de Trabalho ARTEB</b>
$3,0 \times 10^{-4}$ Torr	$1,25 \times 10^{-4}$ Torr

*Tabela 12: Pressões de Trabalho*

Os resultados foram discrepantes, pois o sistema industrial utilizava a bomba difusora com o apoio de bomba roots, e nós utilizamos apenas uma bomba turbomolecular. O importante fora a reprodução do sistema em linguagem didática, tanto que conseguimos chegar à mesma ordem de grandeza.

## 5.CONCLUSÃO

Concluimos que a modelagem é importante na tecnologia de vácuo de modo que ela permite analisar o comportamento de sistemas de vácuo em pequena escala, e reproduzi-lo em escalas maiores. Os procedimentos adotados para fazer esses experimentos foram coerentes e conseguimos chegar a pressões de trabalho similares as pressões de trabalho de uma metalizadora industrial com uma bomba de vácuo.

Conseguimos determinar a velocidade efetiva de bombeamento da bomba mecânica de palhetas rotativas de duplo estágio que foram  $S_b = 2,3 \text{ L.s}^{-1}$ , que comparado ao do fabricante ( $S_b = 2,8 \text{ L.s}^{-1}$ ) obtivemos a diferença percentual de 17,9 %. Nos testes de vazamentos obtivemos  $Q_{\text{vazamento médio}} = 3,8 \text{ Torr.L.s}^{-1}$  com uma diferença de 8,6 %. E a velocidade efetiva de bombeamento é de  $S_{\text{ef}} = 2,8 \text{ L.s}^{-1}$ .

E os resultados obtidos em alto vácuo, obtivemos no laboratório:  $3,0.10^{-4} \text{ Torr}$  e na empresa Arteb o valor de:  $1,25.10^{-4} \text{ Torr}$ .

No quesito de comparar os medidores resultou em  $S_b = 2,44 \text{ L.s}^{-1}$  concluindo então que a velocidade efetiva de bombeamento é aproximadamente igual a velocidade de bombeamento da bomba.

Dessa forma seria interessante dar continuidade ao trabalho caracterizando a bomba de pré-vácuo e colocando no sistema mais uma bomba de alto vácuo, almejando alcançar também a mesma pressão ou pressão similar à pressão de trabalho da metalizadora da Arteb com duas bombas.

## 6. TRABALHOS ANTERIORES:

### MODELAGEM E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE FLUXO DE MISTURA DE GASES PARA SISTEMAS DE VÁCUO

Juliana Aline Hespanhol Neves, Dayane de Jesus da Silva, Matheus Marquis de Andrade,  
Edelson da Silva Procópio Venuto e Francisco Tadeu Degasperri  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP - CEETEPS - São Paulo - SP - Brasil  
ftd@fatecsp.br



#### Introdução

Este trabalho consiste em projetar, construir, testar e analisar experimentalmente uma bancada metrológica para mistura de gases e determinar o fluxo dessas misturas gasosas em sistemas de pré-vácuo, condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar e testes de vazamentos e medição de pressão pelo método de expansão estática. Ainda, com este sistema de vácuo pode-se analisar e possíveis melhorias no processo de bombeamento regime de escoamento viscoso laminar, presente em sistemas de pré-vácuo, considerando vários tipos de gases. E posteriormente utilizar métodos matemáticos usando como ferramenta o Mathcad, com o intuito de realizar comparações com os resultados obtidos experimentalmente.

#### 1-Base Teórica

A equação que rege o processo de bombeamento:

$$V_{cv} \left( \frac{dp_{cv}(t)}{dt} \right) = -S_{ef} \cdot P_{cv}(t) + Q_t$$

$$V_{cv} \left( \frac{dP_{cv}(t)}{dt} \right) = - \frac{S_{bv} \cdot C_{tot}}{S_{bv} + C_{tot}} \cdot P_{cv}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$P_{cv}(t=0) = p_0$$

O fluxo de gás  $Q$  (throughput)

$$Q = P_{interna} \cdot S_b = P_{interna} \left( \frac{dV}{dt} \right)$$

Para definição dos coeficientes gasosos:

$$Q = (P_1 - P_2) \cdot C$$

$$S_b = \frac{Q}{P_{interna}}$$

$$S_{cf} = \frac{P_1 \cdot C}{P_2 - P_1}$$

O fluxo de massa  $W$

$$Q = P \frac{dV}{dt} = \left( \frac{d}{dt} \right) \left( \frac{W}{M} \right) RT$$

$$= \left( \frac{RT}{M} \right) \left( \frac{dW}{dt} \right)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{M}{RT} \cdot Q$$

#### 3-Resultados



#### 4-Conclusões

A modelagem do sistema se mostrou satisfatória e bastante promissora abrindo a possibilidade de modelagens mais complexas como, por exemplo, a modelagem dos experimentos realizados. Vê-se que podemos determinar a vazão dos gases e também suas misturas gasosas por meio dos arranjos construídos.

#### 2-Construção



Figura 1- Sistema de vácuo para determinação de condutância, velocidade de bombeamento e fluxo de gases de misturas gasosas.

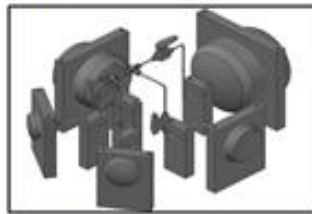


Figura 2- Desenho do arranjo experimental do misturador de gases.



Figura 3- Desenho esquemático do arranjo experimental do misturador de gases.

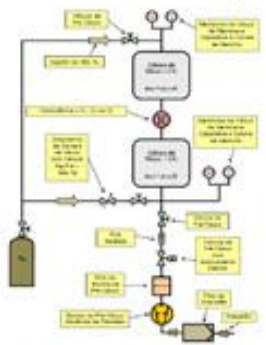


Figura 4- Desenho do arranjo experimental do misturador de gases.



Figura 5- Sistema de vácuo para determinação de condutância, velocidade de bombeamento e fluxo de gases de misturas gasosas.

#### Agradecimentos

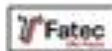
Ao CNPq pela bolsa PIBIC e às empresas PV- Prest Vácuo Ltda. e Resil Ltda. Pelo apoio concedido.



Figura 14: Pôster do Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica: Modelagem e Análise Experimental de Fluxo de Misturas de Gases de Sistemas de Vácuo

# MODELAGEM E CÁLCULO DE SISTEMAS DE PRÉ-VÁCUO A SER EMPREGADO EM METALIZADORAS INDUSTRIAIS

Dayane de Jesus da Silva, Juliana Aline Hespelho Neves, Christian Nemeth Macombino, Edelson da Silva Procopio Venúto e Francisco Tadeu Degasperini  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP - CEETPS - São Paulo - SP - Brasil



## Introdução

Foi planejado e montado um modelo de um sistema de vácuo que opere em pré-vácuo em pressões abaixo de 10<sup>-3</sup> mbar, a fim de simular uma metalizadora industrial (no seu pré-vácuo) e dessa forma estudar fenômenos presentes na tecnologia de vácuo, tais como condução no regime de escoamento viscoso, throughput e outras possíveis fontes de gases e vapores.

Para isso usamos sistemas compostos por câmaras de vácuo, bombas de vácuo, tubos com seções transversais diferentes e variados instrumentos de medida e ferramentas computacionais de análise. Ainda, com esta modelagem, pretendemos analisar e descrever a produção industrial no processo de bombear e a correlação com os resultados obtidos experimentalmente.

## 1-Base Teórica

A equação que rege o processo de bombeamento:

$$Fev \left( \frac{dp_v(t)}{dt} \right) = -S_{ef} \cdot P_v(t) + Q_t$$

$$Fev \left( \frac{dp_v(t)}{dt} \right) = -\frac{S_{ef} \cdot Q_{at}}{S_{at} + C_{at}} \cdot P_v(t) + \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$P_v(t) = P = p_0$$

Por definição throughput  $Q$ :

$$Q = \frac{d(p \cdot V)}{dt} = p \cdot \frac{dV}{dt} = V \cdot \frac{dp}{dt}$$

E sendo assim a velocidade de bombeamento  $S$ :

$$S_{ef} = \frac{Q}{P}$$

## 2-Construção



Figura 1 e 2-Sistema de vácuo para determinação da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo.

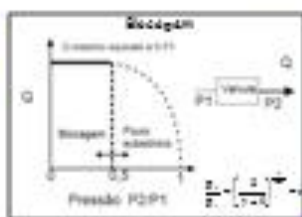


Figura 3- Diagrama de arranjo experimental.

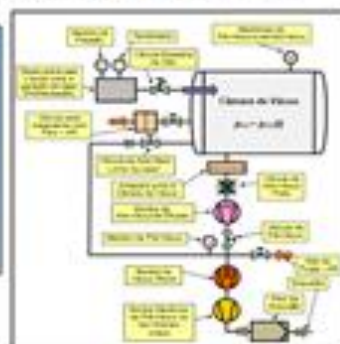


Figura 4- Diagrama de arranjo experimental de uma metalizadora.

## 3- Resultados

Primeiramente foi feito um teste com a intenção de averiguar a velocidade da bomba mecânica de palhetas e também para certificar a insensibilidade de vazamentos grosseiros e usando as equações descritas anteriormente obtidas:

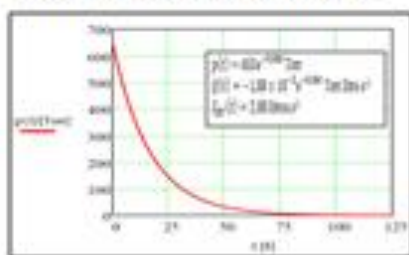


Gráfico 1- Ajuste exponencial de uma de pressão X tempo

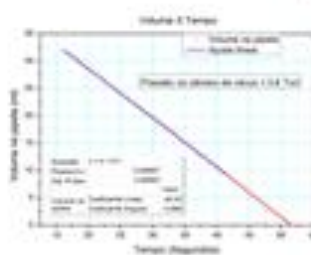


Gráfico 2- Ajuste Linear de volume de-n-pressão

## 4- Conclusões

A modelagem do sistema se mostrou satisfatória e bastante promissora dando a possibilidade de modelagens mais complexas como, por exemplo, a modelagem dos experimentos realizados. Concluímos que o sistema é confiável e que podemos achar a velocidade efetiva de bombeamento através de dados experimentais e compará-los com a teoria.

## Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa FIBIT e às empresas FV- Prest Vácuo Ltda. e Resil Ltda. pelo apoio concedido.



Figura 15: Pôster do Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica: Modelagem e Cálculo de Sistemas de Pré-Vácuo a ser Empregado em Metalizadoras Industriais

## REFERÊNCIAS

- 1.Silva, S. F.; Análise teórico-experimental de condutâncias em Pré-vácuo; Trabalho de Graduação para obtenção de título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos, FATEC – SP, Laboratório de Tecnologia do Vácuo, 2010.
- 2.Moutinho, A. M. C. - Tecnologia de vácuo – Universidade Nova de Lisboa.
- 3.R. Resnick, D. Halliday ; Fundamentos de Física, vol. 2, 7ª ed., Rio de Janeiro, 2006.
- 4.Jousten, Karl; Handbook of Vacuum Technology – WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- 5.A. Ribeiro Cerqueira, MODELAGEM, CÁLCULO DETALHADO COM AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS DE SISTEMAS DE PRÉ-VÁCUO APLICÁVEIS NA INDÚSTRIA, Sao Paulo, 2013.

Imagens:

6.que\_de\_mol%C3%A9culas\_e\_volume\_varrido.svg

7.<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap12.pdf>

8.<http://www.metrovac.eu/tmef/page2/page16/page16.html>

## Apêndice

### Medição do Vácuo

Para fazer a qualificação do vácuo temos disponíveis diversos medidores de pressão. Medimos o vácuo em uma escala de pressão absoluta.

No Sistema Internacional a unidade de pressão é o Pascal ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ ). Neste trabalho fizemos uso do Torr que relacionado com o Pascal é :

$$100 \times 10^3 \text{Pa} = 760 \text{ Torr}$$

Outra unidade utilizada com muita frequência é o bar, que por ser uma unidade com mensuração elevada, usamos submúltiplos desta (mbar), que relacionada com o Pascal é:

$$1 \text{ bar} = 760 \text{ Torr}$$

Podemos fazer então faixas de pressão correspondentes a qualidade do vácuo sendo essas:

	<b>Pa[SI]</b>	<b>Torr</b>
<b>Baixo Vácuo</b>	$100 \times 10^3$ à 100	760 à $760 \times 10^{-3}$
<b>Médio Vácuo</b>	100 à 0,1	$760 \times 10^{-3}$ à $76 \times 10^{-3}$
<b>Alto Vácuo</b>	0,1 à $10^{-6}$	$76 \times 10^{-3}$ à $760 \times 10^{-9}$
<b>Ultra Alto Vácuo</b>	$10^{-6}$ à $10^{-9}$	$760 \times 10^{-9}$ à $760 \times 10^{-12}$

*Tabela 1: Faixas de Pressão.*

É importante para a tecnologia do vácuo que se faça uma boa escolha dos medidores de pressão, pois eles dependem da faixa de pressão que estamos usando.



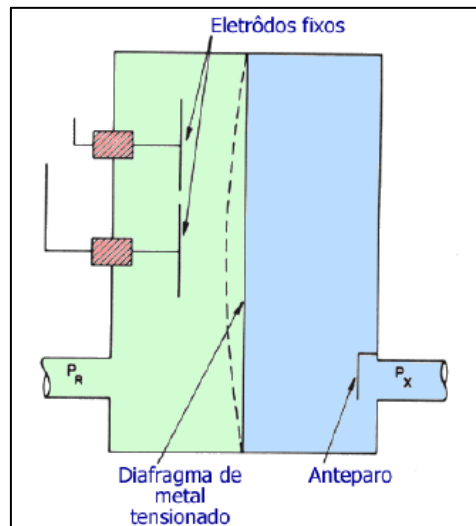
## Manômetro de Membrana Capacitiva, Pirani e Penning

### Manômetro de Membrana Capacitiva

O manômetro de membrana capacitiva é um medidor direto ou absoluto, apesar de ter a intervenção elétrica, ou seja, a determinação da pressão é feita de forma direta, isto é, da própria definição da pressão (P), que equivale a intensidade da força(F) por unidade de área(A).

$$P = \frac{F}{A}$$

Devido a variação da pressão, ocorre a mudança da posição da membrana, resultando na mudança de capacitância do capacitor.

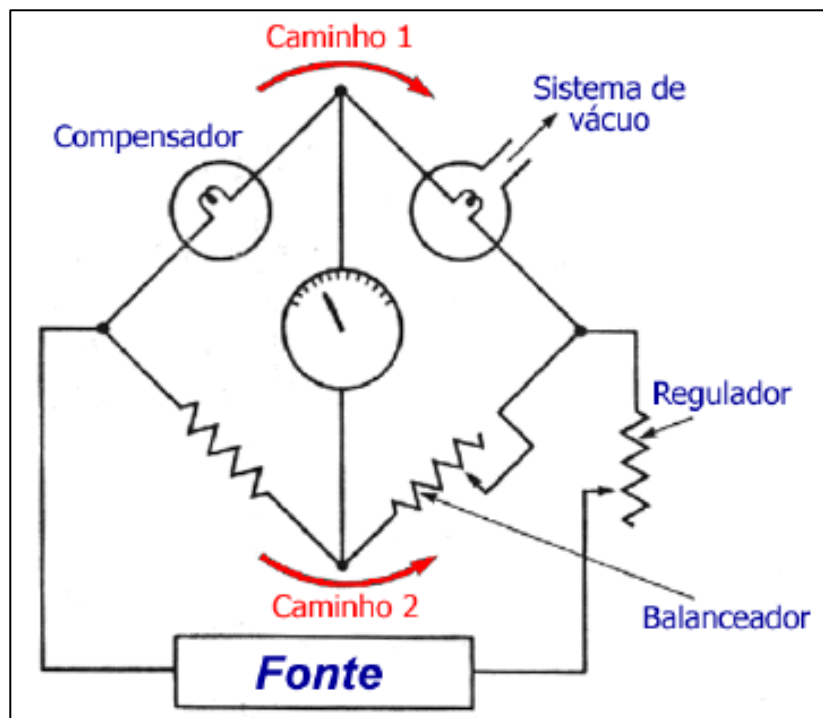


*Figura 1: Manômetro de Membrana Capacitiva.*

Vemos na figura que podemos criar a pressão de referência no processo de medição de pressão.

## Medidor Pirani

Os manômetros Pirani, são medidores indiretos, ou seja, a determinação da pressão é realizada a partir de alguma grandeza física que dependa da pressão, no caso do Pirani é através da troca de calor.



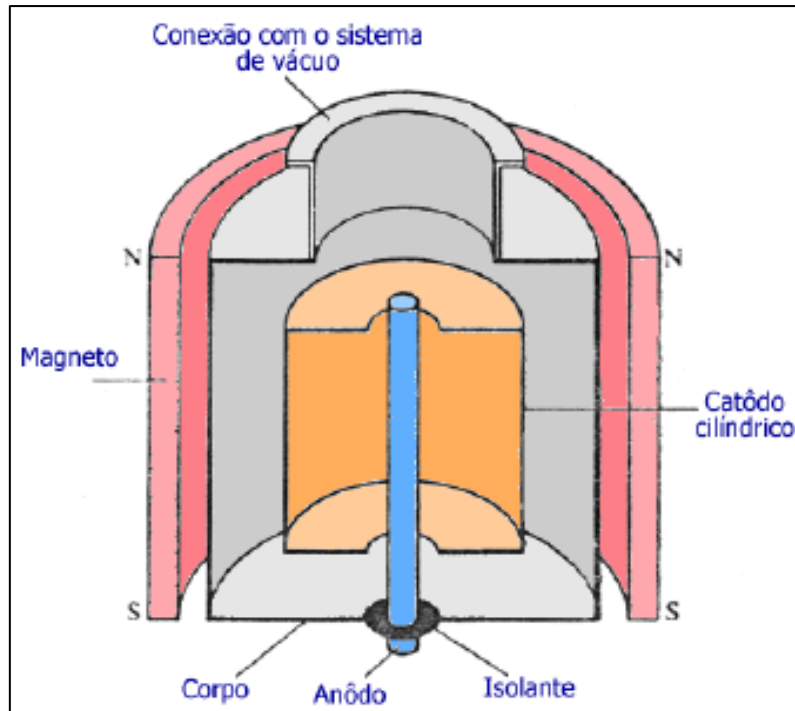
*Figura 2: Medidor Pirani*

Neste caso o resistor será o responsável por fazer a troca de calor e faz parte do braço de um circuito ponte de Wheatstone. Alguns modelos combinam a troca de calor convectiva e condutiva.



## Medidor de Ionização Indutiva Penning

O Manômetro de Ionização Penning ou medidor Penning é um medidor indireto baseado na ionização de átomos e moléculas do tipo catodo frio.



*Figura 3: Medidor Penning.*

Vemos as partes principais de um manômetro de ionização Penning. Temos os eletrodos, o envólucro e o imã permanente. Há a necessidade de um campo magnético para o funcionamento do sensor Penning.

A instalação correta dos sensores de vácuo é de muita importância a fim de obtermos uma determinação representativa da pressão no sistema de vácuo.

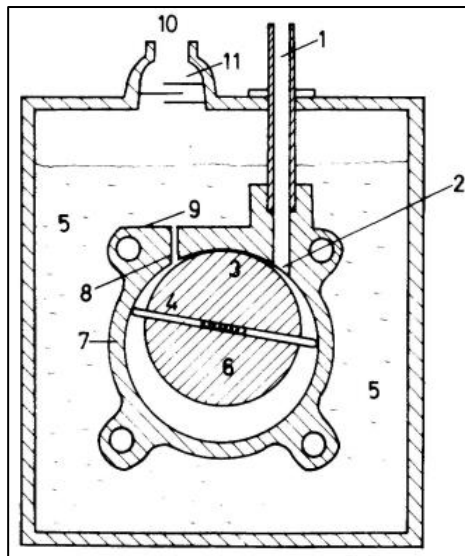
## Bomba Mecânica de Palhetas

As bombas mecânicas de palhetas são as bombas mais encontradas nos sistemas de vácuo atuais. Essa bomba trabalha partindo da pressão atmosférica e pode chegar a pressões da ordem de  $10^{-2}$  Torr, dependendo da qualidade dos materiais que compõem o sistema. Nesse tipo de bomba temos os seguintes componentes:

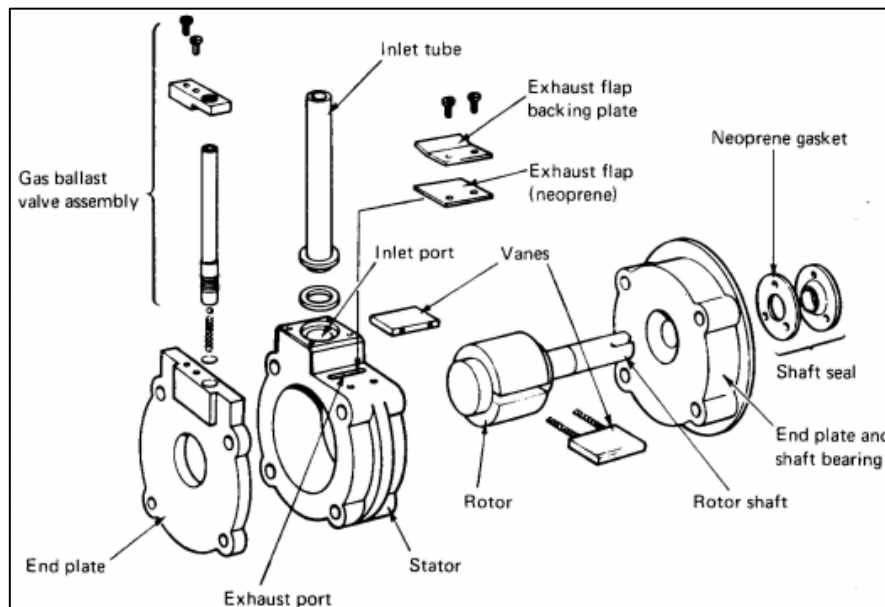
- rotor;
- estator;
- palhetas;
- válvula de entrada;
- válvula de saída.

Esta bomba é constituída de um estator cilíndrico que recebe um rotor excêntrico, como mostrado na figura 1. Este rotor possui duas fendas diametrais, nas quais correm duas palhetas que são forçadas contra a parede do estator por molas e/ou pela força "centrífuga" do movimento de rotação do rotor. Tanto o estator quanto o rotor são fabricados em aço, enquanto as palhetas podem ser de aço ou de um composto polimérico.

As extremidades do estator são fechadas por placas convenientes, que suportam o eixo do rotor. O estator também contém orifícios que são a entrada e a saída do gás. A entrada de gás é ligada ao sistema que se quer bombear por conexões e tubulações apropriadas, em geral contendo um filtro de pó, enquanto a saída é ligada a algum sistema conveniente de exaustão para a atmosfera. Esta saída é fechada por uma válvula que usualmente é uma lâmina de metal ou de borracha (neoprene) que se dobra em uma lateral. Esta válvula normalmente fica imersa em óleo, como mostrado na figura 1 e na figura 2, dá uma visão de todas as partes constituintes de um conjunto estator-rotor.



*Figura 4: Secção transversal esquemática de uma bomba de palhetas rotativas.*



*Figura 5: Vista de todas as partes de uma bomba de palhetas rotativas.*

Como já colocado acima, o rotor é um cilindro excêntrico ao estator, colocado de modo que a linha de contato entre ambos separe a entrada da saída de gás. Como os diâmetros são diferentes, esta morfologia dá origem a uma câmara, que é onde o gás será admitido a baixa pressão e comprimido a uma pressão ligeiramente acima da pressão atmosférica de modo a poder abrir a válvula de saída e ir para a atmosfera. Os outros limites desta câmara são as placas laterais que fecham o conjunto estator-rotor, e sustentam este último. Esta câmara será dividida em uma câmara de admissão (baixa pressão) e em uma câmara de compressão (alta pressão) à medida que as palhetas

passam pelas aberturas de entrada e de saída. Note que ambos, estator e rotor, não podem se tocar, mas devem manter uma distância muito pequena entre si, pois o filme de óleo que se localiza entre eles é que forma o selo entre as câmaras de entrada e de saída, denominado selo superior. O óleo também faz o selo dinâmico nas laterais do conjunto, onde o rotor e as palhetas “encontram” as placas laterais. Em geral, estes espaçamentos devem ser da ordem de 2 a 3  $\mu\text{m}$  para os selos funcionarem, e isto demonstra o nível de precisão da usinagem necessário para a fabricação deste tipo de Bomba.

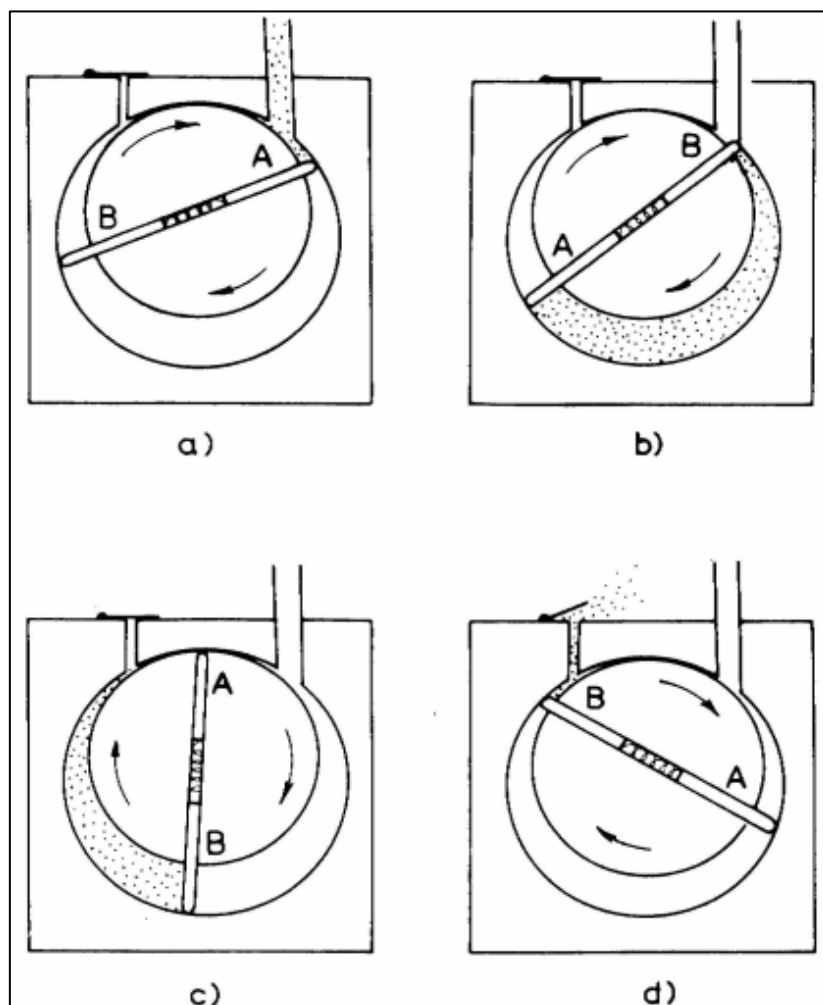
As palhetas são placas retangulares que se encaixam com folga muito pequena nas fendas do rotor e que podem deslizar livremente nestas fendas, tendo a extremidade que toca a superfície do estator arredondadas. Em geral, elas são mantidas separadas e em contato com o estator por molas. Como há contato contínuo entre as duas superfícies, elas devem estar sempre muito bem lubrificadas. Além disso, o óleo que faz a lubrificação também provê um filme de vedação (selo dinâmico) que isola as câmaras de alta e baixa pressão uma da outra. Todo o conjunto estator-rotor-placas é imerso em óleo, que fornece lubrificação, selagem e resfriamento a este conjunto.

A figura 4 ilustra o funcionamento deste tipo de bomba, quando a palheta A passa pelo orifício de entrada de gás, a câmara a ser evacuada é colocada em contato com o volume limitado pelo estator, pelo selo superior, pelo rotor e pela própria palheta. Este volume aumenta à medida que a palheta avança, produzindo um abaixamento de pressão na câmara, que continua até que a palheta B passe pela entrada, quando então o gás neste volume é isolado entre as duas palhetas. À medida que a rotação continua, o gás isolado passa a ser comprimido pela palheta B, até atingir pressão suficiente (aproximadamente 850 torr) para abrir a válvula de saída e ir para a atmosfera.

Uma vez que ambas as palhetas atuam sequencialmente, em uma rotação um volume igual ao dobro do mostrado na figura 4- b é retirado da câmara pela bomba, ou seja, a velocidade de bombeamento deste tipo de bomba pode ser escrito:  $S = 2 V n$ , em que V é o volume entre as palhetas na posição da figura 4- b e n é o número de rotações do motor por unidade de tempo.

Os contatos das palhetas e do rotor com o estator formam 3 câmaras separadas (veja a figura 4- d) que contém gás em diferentes pressões, e devem portanto serem estanques para vácuo (vacuum tight), principalmente o selo superior, que deve conter gás a pressão acima da atmosférica. Por essa razão, como já apontado acima, as superfícies internas do estator e externas do rotor e das palhetas devem ser cuidadosamente

usinadas, e deve-se ter o máximo cuidado para evitar a presença de qualquer elemento abrasivo nestas superfícies, ou qualquer gás corrosivo nesta câmara interna.

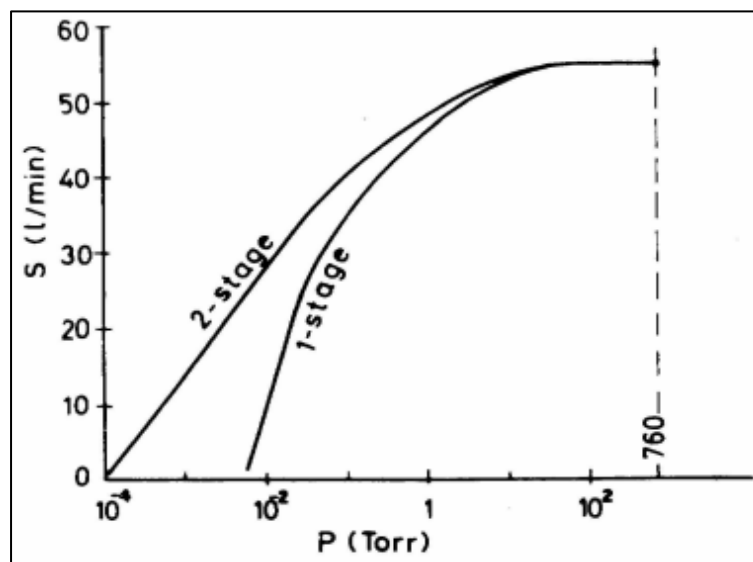


*Figura 6: Esquema de funcionamento de uma bomba de palhetas de um estágio.*

Em princípio, a menor pressão que este tipo de bomba pode alcançar é determinado apenas pelo fato de que o gás é comprimido em um pequeno, mas finito, volume morto. Quando a pressão do sistema evacuado fica tão baixa que na máxima compressão o gás não atinge a pressão necessária para abrir a válvula de saída, o gás fica retido no corpo da bomba, e subsequente bombeamento apenas re-expande e re-comprime o mesmo gás, sem mais abaixamento da pressão da câmara evacuada. A razão entre a pressão de exaustão e a pressão de entrada da bomba é chamada taxa de compressão da bomba. Para produzir pressões da ordem de  $10^{-2}$  Torr, devem-se ter bombas com taxas de compressão de  $10^5$ . Além de fornecer lubrificação e selamento, o óleo também serve para diminuir o volume morto, aumentando a taxa de compressão.

A mínima pressão obtida por uma bomba de palhetas rotativas de um estágio, medida por um medidor tipo McLeod é da ordem de  $5 \cdot 10^{-3}$  Torr. Esta mesma pressão medida por um medidor tipo Pirani dá valores da ordem de  $10^{-2}$  Torr. Esta discrepância jaz no princípio de medida dos dois medidores, evidentemente, e tem sua origem na pressão de vapor do óleo da bomba e nos produtos gasosos de sua decomposição. A conexão em paralelo de dois sistemas rotor-estator dará duas vezes a velocidade de bombeamento, mas com a mesma pressão mínima. Por outro lado, a conexão em série de dois conjuntos rotor-estator (dois estágios de bombeamento) resulta em pressão mínima significativamente menor para o conjunto.

A figura 7 ilustra a curva de velocidade de bombeamento para um estágio e dois estágios.

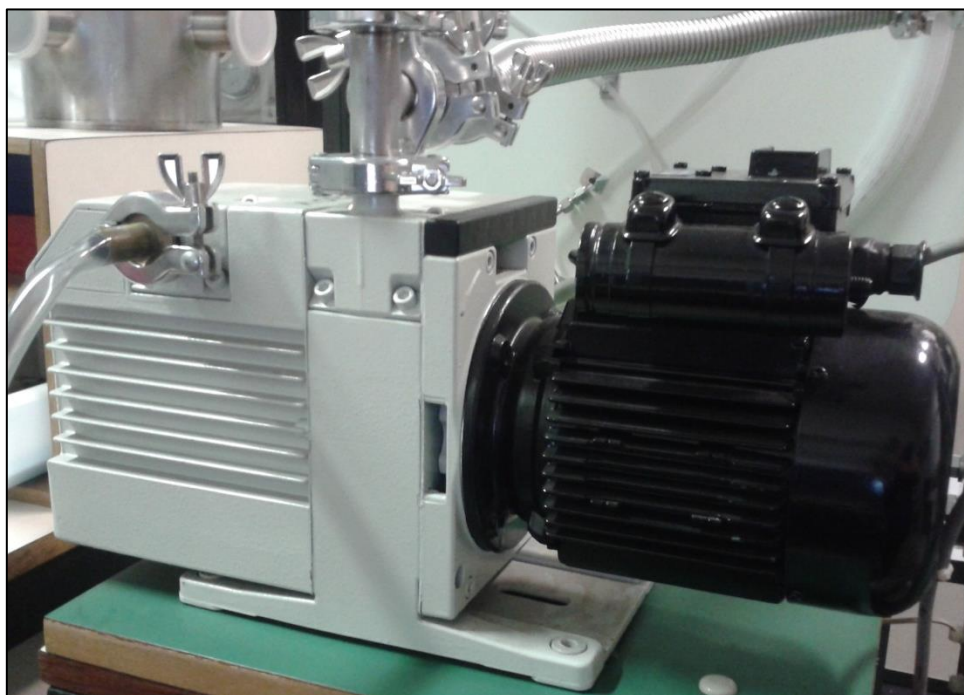


*Figura 7: Curvas de velocidades de bombeamento para bombas de palhetas rotativas de um e de dois estágios*

Vê-se que a bomba de duplo estágio pode alcançar pressão mínima da ordem de  $10^{-4}$  Torr (McLeod) ou  $2 \cdot 10^{-3}$  Torr (Pirani). Nota-se também que a velocidade de bombeamento é constante desde a pressão atmosférica até da ordem de 10 Torr, quando começa a variar, chegando até zero para a mínima pressão da bomba.

Utilizamos o modelo da empresa Leybold da figura 8 abaixo

:



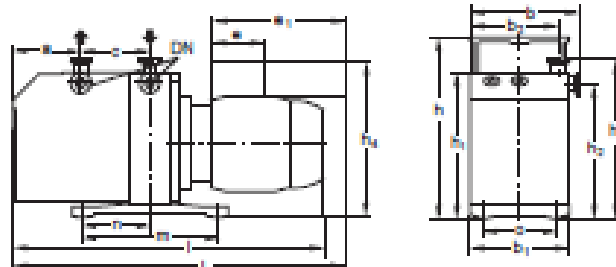
*Figura 8: Bomba Mecânica de Palhetas Utilizada*

A bomba de vácuo usada e caracterizada foi a bomba de palhetas rotativas TRIVAC D 8 B 60 Hz.

## TRIVAC D 4 B and D 8 B



TRIVAC D 8 B

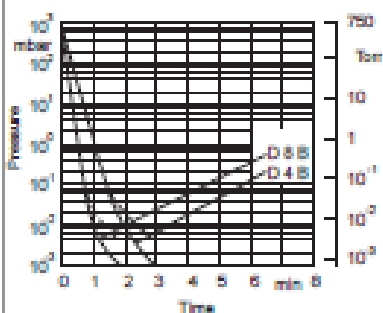


\* Depending on the motor

USA pump max. length  
D 4 B 485 mm (19.1")  
D 8 B 555 mm (21.9")

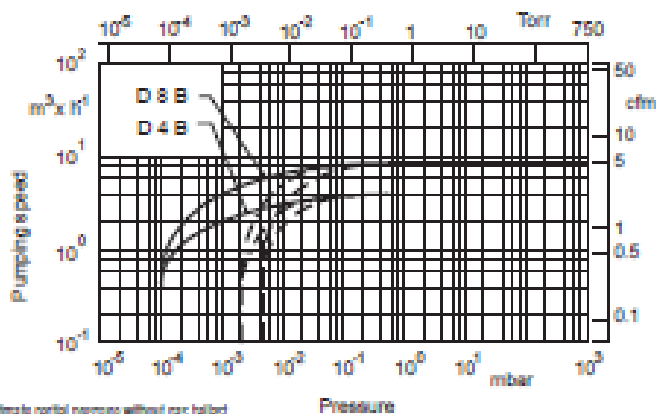
Type	DN	a	b	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	c	e	e <sub>1</sub>	h	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	l	l <sub>1</sub>	m	n	o	
D 4 B (Part No. 113 04, 113 08, 113 09)	16 KF	mm	75	162	147	132	100	—	170	265	215	200	230	250	—	455	198	90	108
		in.	2.95	6.38	5.79	5.23	3.94	—	6.69	10.43	8.46	7.87	9.06	10.20	—	17.91	7.80	3.50	4.25
D 4 B (Part No. 113 02, 113 4e)	16 KF	mm	75	162	147	132	100	102	—	265	215	200	230	254	437	—	198	90	108
		in.	2.95	6.38	5.79	5.23	3.94	4.02	—	10.43	8.46	7.87	9.06	9.21	17.21	—	7.80	3.50	4.25
D 4 B (Part No. 113 4G)	16 KF	mm	75	162	147	132	100	80	—	265	215	200	230	233	438	—	198	90	108
		in.	2.95	6.38	5.79	5.23	3.94	3.1	—	10.43	8.46	7.87	9.06	9.26	17.34	—	7.80	3.50	4.25
D 8 B (Part No. 113 14, 113 18, 113 21)	16 KF	mm	100	162	147	132	100	—	170	265	215	200	230	250	—	480	198	90	108
		in.	3.94	6.38	5.79	5.23	3.94	—	6.69	10.43	8.46	7.87	9.06	10.20	—	18.90	7.80	3.50	4.25
D 8 B (Part No. 113 12, 113 3e)	16 KF	mm	100	162	147	132	100	102	—	265	215	200	230	254	462	—	198	90	108
		in.	3.94	6.38	5.79	5.23	3.94	4.02	—	10.43	8.46	7.87	9.06	9.21	18.19	—	7.80	3.50	4.25
D 8 B (Part No. 113 3G)	16 KF	mm	100	162	147	132	100	80	—	265	215	200	230	233	463	—	198	90	108
		in.	3.94	6.38	5.79	5.23	3.94	3.1	—	10.43	8.46	7.87	9.06	9.26	18.23	—	7.80	3.50	4.25

Dimensional drawings for the TRIVAC D 4 B and D 8 B



— without gas ballast  
--- with gas ballast

Ramp-down characteristic of a 10 l vessel at 50 Hz



— Ultimate partial pressure without gas ballast  
--- Ultimate total pressure without gas ballast  
--- Ultimate total pressure with gas ballast

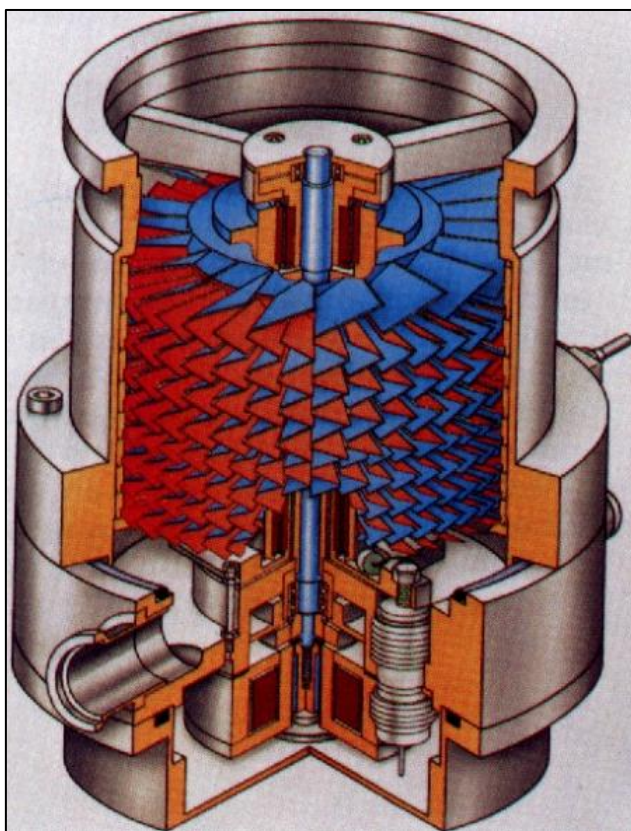
Pumping speed characteristic of 50 Hz (50 Hz is at the end of the section)

Figura 9: Catálogo: Leybold Vacuum, Products and Reference Book, 2003



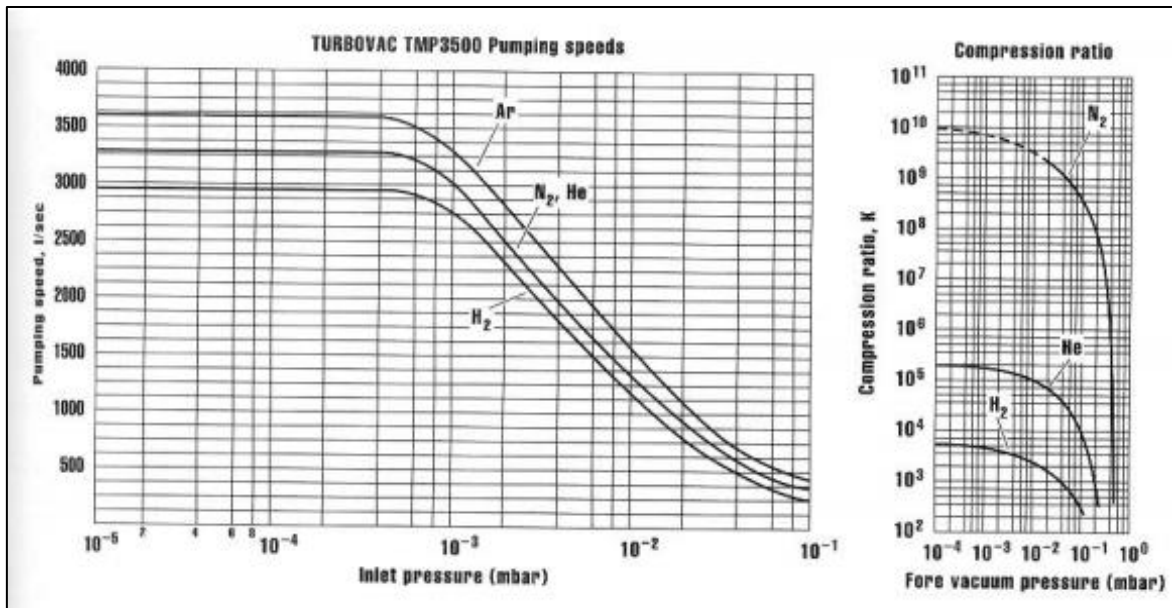
## Bomba Turbomolecular

As bombas turbomoleculares são bombas de compressão que funcionam através da transferência de momentum por impacto de moléculas, com palhetas que giram em alta velocidade. Nela vários sistemas de palhetas são presas a um eixo impulsionado por um motor de alta rotação, um rotor, esse sistema se movimenta a alta velocidade passando de 20000 rpm. Outro sistema de palhetas é preso a carcaça da bomba, um estator, o espaço entre o estator e o rotor é da ordem de 1mm.



*Figura 10: Bomba Turbomolecular (Corte Longitudinal)*

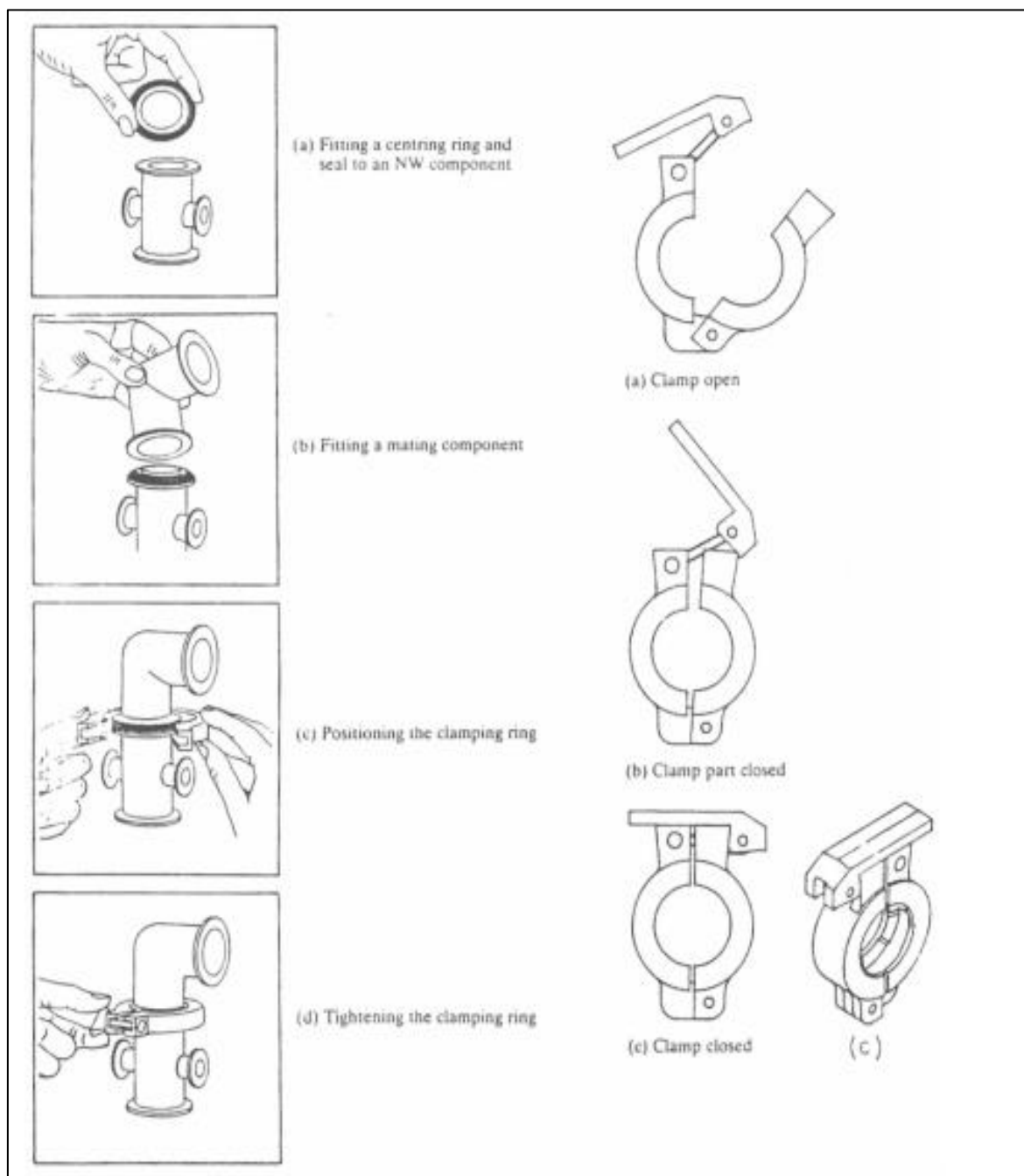
As bombas turbomoleculares precisam de uma bomba de apoio que geralmente é uma bomba mecânica de palhetas, e esta é conectada ao lado de alta pressão, uma vez que a pressão de saída deve ser mantida a baixa pressão. Como a transferência de momentum é dependente da massa da molécula de gás, a taxa de compressão também depende do gás a ser bombeado. A taxa de compressão dessa bomba pode chegar a  $10^9$ .



*Figura 11: Velocidade de Bombeamento e Taxa de Compressão de uma Bomba Turbomolecular Típica em Função da Pressão de Entrada.*

A figura mostra a velocidade de bombeamento e taxa de compressão de uma bomba turbomolecular típica em função da pressão de entrada, para vários gases. Uma bomba típica que tenha taxa de compressão para N<sub>2</sub> igual a  $10^9$ , terá uma taxa de compressão para o H<sub>2</sub> de  $10^3$ .

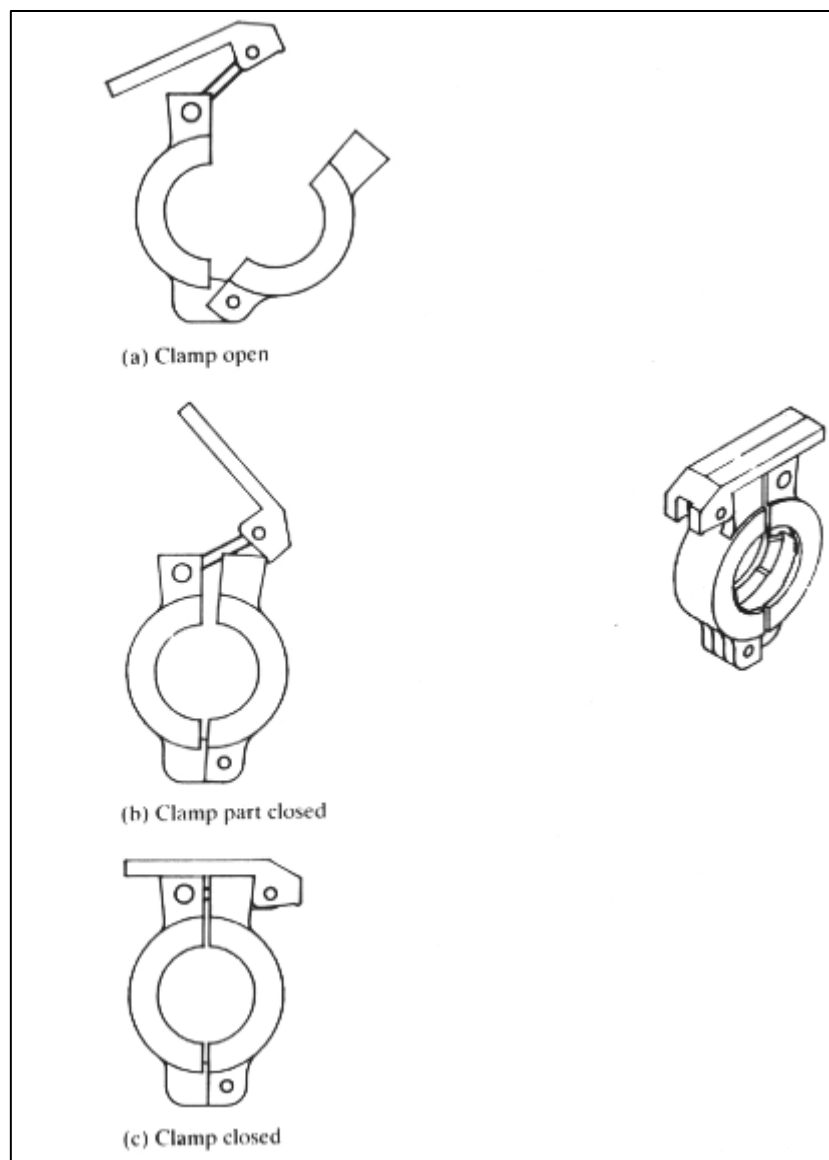
## Componentes e Acessórios Utilizados



*Figura 12: Ligação de Componentes Tubular e Grampo Tipo Dobradiça em Vários Estágios de Funcionamento*



*Figura 13: Foto das Tubulações Utilizadas no Trabalho*



*Figura 14: Presilhas Utilizadas na Tecnologia do Vácuo.*



*Figura 15: Foto das Presilhas e Anéis de Vedações Utilizadas*