

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP**

**EDELSON DA SILVA PROCOPIO VENUTO**

**MODELAGEM E MEDIÇÃO DE CONDUTÂNCIAS NO REGIME DE  
ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR COM GASES MONOATÔMICOS  
BLOCADOS**

**SÃO PAULO**

**2013**

**EDELSON DA SILVA PROCOPIO VENUTO**

**MODELAGEM E MEDIÇÃO DE CONDUTÂNCIAS NO REGIME DE  
ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR COM GASES MONOATÔMICOS  
BLOCADOS**

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**

**2013**

*Dedico este trabalho à minha família por todo o apoio durante esta longa, porém  
prazerosa jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos aqueles que tornaram a realização deste trabalho possível, em especial ao meu orientador prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi por todo apoio e paciência para comigo e aos meus colegas de laboratório que tanto me ajudaram.

Agradeço também a todos os meus professores da Faculdade de Tecnologia de São Paulo pelo conhecimento transmitido durante estes três anos e pelos “puxões de orelha” que sempre me guiaram pelos caminhos corretos. Os meus colegas de curso também merecem algumas palavras por compartilharem comigo todo este tempo de momentos de alegria e tristeza, de alívio e apreensão, de brincadeiras e momentos sérios, mas, sobretudo de extensa camaradagem que tornou mais suave este longo e árduo caminho.

E por fim gostaria de estender meus agradecimentos ao Laboratório de Integração e Testes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo empréstimo dos medidores de membrana capacitiva e pelo mesmo motivo agradeço também a empresa PV Prest Vácuo, sem o auxílio destas instituições a realização deste trabalho seria muito mais difícil.

A glória é tanto mais tardia quanto mais duradoura há de ser, porque todo fruto delicioso amadurece lentamente.

Arthur Schopenhauer

## RESUMO

A tecnologia do vácuo ocupa um papel importante em muitos processos industriais e também em atividades de pesquisa; identifica-se que está se intensificando cada vez mais as suas aplicações nestas áreas. E, dentro deste cenário, encontra-se a necessidade de se trabalhar com o enriquecimento de gases especiais nestas atmosferas reduzidas para execução de algum processo ou simplesmente para manter o controle desta. Para esta tarefa, geralmente utilizam-se *mass flow meters*, cujo funcionamento é baseado na capacidade térmica dos gases. Como todo instrumento de medição, os *mass flow meters* precisam ser calibrados periodicamente para manter-se a confiabilidade do processo em que participam.

O intuito deste trabalho é estudar o fenômeno do escoamento compressível ou *choked flow* em tubos de diversos diâmetros e comprimentos utilizando os gases argônio e hélio, bem como determinar o ponto de blocagem para estes diferentes tubos. Entende-se por ponto de blocagem o valor numérico da razão da pressão de saída pela pressão de entrada, a partir do qual o *throughput* não é mais constante. A grande aplicação do estudo deste fenômeno está na utilização como padrão metrológico de calibração de medidores de fluxo, já que é um método simples e baseado em primeiros princípios. E também há a oportunidade de enriquecimento da teoria vigente com resultados experimentais sobre o assunto.

## **ABSTRACT**

The vacuum technology plays an important role in many industrial processes and also in research activities, it is identified that is ever intensifying its applications in these areas. And in this scenario is the need to work with these special gas enrichment reduced to execution of some process atmosphere or simply to keep track of it. For this task is usually utilize mass flow meters whose operation is based on thermal capacity of the gases. Like any instrument measuring the mass flow meters need to be calibrated periodically to maintain the reliability of the process in which they participate.

The purpose of this work is to study the phenomenon of compressible flow or choked flow in pipes of various diameters and lengths using argon and helium gases, as well as determine the point of blocking for these different tubes, the term point of choked pressure ratio value the ratio of output pressure by the inlet pressure at which the throughput is not constant. The major application of the study of this phenomenon is in use as metrological calibration standard flow meters, since it is a simple method based on first principles. And there is also the opportunity to enrich the current theory with experimental results on the subject.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Choque elástico de uma partícula com o recipiente que contém o gás.....	17
Figura 2: Percurso de uma molécula, por unidade de tempo em um gás constituído por diferentes espécies moleculares (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA).....	20
Figura 3: Influência da condutância na velocidade de bombeamento efetiva. (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA). ....	24
Figura 4: Regime de escoamento turbulento (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).....	26
Figure 5: Regime de escoamento viscoso laminar (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).....	27
Figure 6: Regime de escoamento intermediário (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).....	28
Figura 7: Regime de escoamento molecular (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).....	29
Figura 8: Processo de limpeza dos capilares. ....	33
Figura 9: Capilares após a limpeza, à esquerda, e armazenados nos tubos de PVC, à direita. ....	33
Figura 10: Desenho em AutoCAD 2013 do corte da vista frontal do engate rápido que liga o capilar ao sistema de vácuo; à esquerda temos a componente fêmea do conjunto enquanto que à direita se encontra o componente macho. ....	34
Figura 11: Desenho em AutoCAD 2013 do corte da vista frontal de um conjunto porta amostra para o capilar de 1,3 mm.....	35
Figura 12: Desenho em AutoCAD 2013 da vista expandida do conjunto completo montado. ....	35
Figura 13: Imagem do engate rápido montado com o capilar posicionado.....	36
Figura 14: Diagrama unifilar do sistema de vácuo.....	37
Figure 15: Imagem do sistema de vácuo montado. ....	38
Figura 16: Sistema antes da expansão. ....	39
Figura 17: Sistema após a expansão. ....	39



Figure 18: Desenho de conjunto feito no Inventor 2013 retratando um detalhe do arranjo experimental. ....	43
Figura 19: Procedimento para determinação da região linear das curvas pressão X tempo. ....	54
Figure 20: Simulador para cálculo de fluxo de gases rarefeitos (SHARIPOV, F. - Rarefied Gas Flow Through a Thin Orifice) .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação dos graus de classificação de pressão (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DEVÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA). .....	14
Tabela 2: Parâmetros a e b para alguns gases comuns. ....	19
Tabela 3: Relação entre o número de Knudsen e o regime de escoamento. (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DEVÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA). ....	25
Tabela 4: Relação entre o número de Reynolds e o regime de escoamento (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DEVÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA). ....	26
Tabela 5: Parâmetro $\gamma$ em função do tipo de gás (LAFFERTY, J. M. - FOUNDATIONS OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY - JOHN WILEY & SONS) .....	30
Tabela 6: Dimensões dos capilares. ....	32
Tabela 7: Resultados das expansões. ....	41
Tabela 8: Volume das câmaras de vácuo. ....	42
Tabela 9: Parâmetros da reta ajustada. ....	55
Tabela 10: Parâmetros da reta ajustada. ....	55
Tabela 11: Parâmetros da reta ajustada. ....	55
Tabela 12: Parâmetros da reta ajustada. ....	56
Tabela 13: Parâmetros da reta ajustada. ....	56
Tabela 14: Parâmetros da exponencial ajustada. ....	59
Tabela 15: Parâmetros da exponencial ajustada. ....	59
Tabela 16: Parâmetros da exponencial ajustada. ....	59
Tabela 17: Parâmetros da exponencial ajustada. ....	60
Tabela 18: Comparação entre o <i>throughput</i> teórico e o <i>throughput</i> experimental para um orifício. ....	61
Tabela 19: Comparação entre o <i>throughput</i> simulado e o <i>throughput</i> experimental para um orifício. ....	63
Tabela 20: Parâmetros da reta ajustada, hélio. ....	64
Tabela 21: Parâmetros da reta ajustada, argônio. ....	64

Tabela 23: Parâmetros da reta ajustada, argônio. ....	65
Tabela 22: Parâmetros da reta ajustada, hélio. ....	65
Tabela 24: Parâmetros da reta ajustada, hélio. ....	66
Tabela 25: Parâmetros da reta ajustada, argônio. ....	66
Tabela 27: Parâmetros da reta ajustada, hélio. ....	66
Tabela 26: Parâmetros da reta ajustada, argônio. ....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Throughput em função das razões entre as pressões para os dois modelos. .	31
Gráfico 2: Detalhe do gráfico pressão X tempo. ....	45
Gráfico 3: Curvas experimentais que geraram o gráfico 2. ....	46
Gráfico 4: Pressão X tempo para o gás Ar, 0,5 mm de $\phi$ . ....	46
Gráfico 5: Pressão X tempo para o gás Ar, 0,8 mm de $\phi$ . ....	46
Gráfico 7: Pressão X tempo para o gás Ar, 2,0 mm de $\phi$ . ....	47
Gráfico 6: Pressão X tempo para o gás Ar, 1,3 mm de $\phi$ . ....	47
Gráfico 8: Pressão X tempo para o gás Ar, 3,3 mm de $\phi$ . ....	47
Gráfico 9: Pressão X tempo para o gás He, 0,5 mm de $\phi$ . ....	48
Gráfico 10: Pressão X tempo para o gás He, 0,8 mm de $\phi$ . ....	48
Gráfico 12: Pressão X tempo para o gás He, 3,3 mm de $\phi$ . ....	48
Gráfico 11: Pressão X tempo para o gás He, 1,3 mm de $\phi$ . ....	48
Gráfico 13: Pressão X tempo para o gás He, 3,3 mm de $\phi$ . ....	49
Gráfico 15: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento, $CV_1$ . ....	49
Gráfico 14: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento, $CV_2$ . ....	49
Gráfico 17: Pressão X tempo para o gás Ar, 240 mm de comprimento, $CV_1$ . ....	50
Gráfico 16: Pressão X tempo para o gás Ar, 240 mm de comprimento, $CV_2$ . ....	50
Gráfico 18: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento. ....	50
Gráfico 19: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 30 mm de comprimento e 1,3 mm de $\phi$ . ....	51
Gráfico 20: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 60 mm de comprimento e 1,3 mm de $\phi$ . ....	51
Gráfico 21: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 120 mm de comprimento e 1,3 mm de $\phi$ . ....	51
Gráfico 22: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 240 mm de comprimento e 1,3 mm de $\phi$ . ....	51
Gráfico 23: Derivada da pressão em função do tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento e 0,5 mm de $\phi$ . ....	52
Gráfico 24: $r_c$ X Comprimento para o gás Ar, 0,5 mm de $\phi$ . ....	55

Gráfico 25: $r_c$ X Comprimento para o gás Ar, 0,8 mm de $\phi$ .....	55
Gráfico 26: $r_c$ X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de $\phi$ .....	55
Gráfico 27: $r_c$ X Comprimento para o gás Ar, 2,0 mm de $\phi$ .....	56
Gráfico 28.....	56
Gráfico 29: $r_c$ X Comprimento para o gás Ar, 3,3 mm de $\phi$ .....	56
Gráfico 30: $r_c$ X Diâmetro para o gás Ar, 30 mm de comprimento.....	57
Gráfico 32: $r_c$ X Comprimento para o gases Ar e He, 1,3 mm de $\phi$ .....	58
Gráfico 31: $r_c$ X Comprimento para o gases Ar e He, 2,0 mm de $\phi$ .....	58
Gráfico 33: Q X Comprimento para o gás Ar, 0,5 mm de $\phi$ . ....	59
Gráfico 34: Q X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de $\phi$ . ....	59
Gráfico 35: Q X Comprimento para o gás He, 0,5 mm de $\phi$ .....	59
Gráfico 36: Q X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de $\phi$ . ....	60
Gráfico 37: Q X Comprimento para o gás He, 0,8 mm de $\phi$ .....	62
Gráfico 38: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 30 mm. ....	64
Gráfico 39: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 60 mm. ....	65
Gráfico 40: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 120 mm. ....	65
Gráfico 41: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 240 mm. ....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – área

a – relação entre as forças atrativas

a. C. – antes de Cristo

b – forças moleculares de repulsão

C<sub>total</sub> – condutância total

c<sub>p</sub> – calor específico molar a pressão constante

c<sub>v</sub> – calor específico molar a volume constante

D – diâmetro do tubo

d – distância

d<sub>1</sub> – diâmetro da molécula 1

d<sub>2</sub> – diâmetro da molécula 2

k – constante de Boltzmann

kn – número de Knudsen

m – massa da partícula

N – número de moléculas

n – densidade do gás

p – pressão

p<sub>cv</sub> – pressão na câmara de vácuo

p<sub>0</sub> – pressão na câmara de entrada

p<sub>i</sub> – pressão inicial

p<sub>f</sub> – pressão final

Q – throughput

Re – número de Reynolds

r<sub>c</sub> – razão crítica

S – volume de gás retirado por unidade de tempo

S<sub>bv</sub> – velocidade de bombeamento da bomba de vácuo

S<sub>ef</sub> – velocidade efetiva de bombeamento

V – volume

V<sub>p</sub> – volume padrão

$v$  – velocidade

$v_r$  – velocidade média quadrática

$v_x$  – velocidade na direção  $x$

$T$  – temperatura

$t$  – tempo

$X$  – em função de

$\gamma$  – razão entre o calor específico à pressão constante pelo calor específico à volume constante

$\eta$  – coeficiente de viscosidade

$\lambda$  – livre caminho médio

$\rho$  – densidade

$\phi$  – diâmetro do capilar

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LIT – Laboratório de Integração e Testes

LTV – Laboratório de Tecnologia do Vácuo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1 Objetivo	10
1.2 História da Ciência e Tecnologia do Vácuo	10
1.3 Vácuo	13
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1 Teoria Cinética dos Gases	15
2.1.1 Temperatura	16
2.1.2 Pressão	16
2.2 Equações de Estado	18
2.3 Livre Caminho Médio	20
2.4 Elementos para o Cálculo de Sistemas de Vácuo	22
2.5 Regimes de Escoamento de Gases em Tubos e Orifícios	25
2.5.1 Regime de Escoamento Viscoso Turbulento	26
2.5.2 Regime de escoamento Viscoso Laminar	27
2.5.3 Regime de escoamento Intermediário ou de Knudsen	28
2.5.4 Regime de escoamento Molecular	28
2.6 Escoamento Através de Orifícios	29
<b>3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
3.1 Especificações e Limpeza dos Tubos	32
3.2 Construção dos Componentes Auxiliares	34
	<b>36</b>
3.3 Montagem do Sistema de Vácuo	36
3.4 Determinação dos Volumes das Câmaras de Vácuo Através do Método de Expansão Estática	38



3.5 Métodos Experimentais	42
3.6 Coleta de Dados Computadorizada	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>45</b>
4.1 Tratamento Matemático dos Resultados Experimentais	52
4.1.1 Razão Crítica	52
4.1.2 <i>Throughput</i>	58
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>68</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>70</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é estudar o escoamento compressível de gases rarefeitos através de tubos de vários diâmetros e comprimentos, bem como determinar o ponto de bloqueio para esses diferentes tubos. Para este estudo serão utilizados os gases argônio e hélio.

O trabalho será desenvolvido no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV), da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP).

### **1.2 História da Ciência e Tecnologia do Vácuo**

A palavra vácuo vem do vocábulo latino *vacuum* e é utilizada no cotidiano com diferentes sentidos: vazio, que nada contém, espaço em que não há pressão atmosférica, entre outros. Durante muito tempo, o conceito do que seria o vácuo foi discutido e debatido pelos filósofos gregos e, depois, no campo das Ciências Naturais na época do renascimento científico europeu.

Na Grécia antiga, houve a primeira tentativa de encontrar uma interpretação racional aos fenômenos físicos que ocorriam na natureza. Através desta metodologia de pensamento que Leucipo e seu aluno Demócrito, em 420 a.C., propuseram uma explicação para a natureza das coisas a partir do princípio de que tudo seria composto por átomos, partículas minúsculas, indivisíveis e que se diferenciavam entre si através de suas formas geométricas. Estas partículas se reuniram ao acaso, formando assim

toda a matéria conhecida, e entre elas nada haveria. Então, entre estes átomos haveria o vácuo. (1)

Quase meio século depois das ideias de Leucipo e Demócrito serem propostas, outro filósofo grego chamado Aristóteles, que era contrário as teorias atômicas, negando assim a existência do vácuo, propôs que “A natureza tem ojeriza ao vácuo”; para provar seu raciocínio Aristóteles utilizava a experiência da queda dos corpos. Todo corpo ao cair sofre a resistência do meio em que cai, alterando deste modo sua velocidade de queda, alguns meios oferecem mais resistência, outros menos, se um corpo caísse em um espaço onde nada houvesse (vácuo) este, alcançaria uma velocidade infinita, o que seria impossível. (1)

Como o pensamento aristotélico foi o que mais influenciou a maneira de se pensar durante séculos, suas ideias foram tidas como verdades universais até a época do renascimento. Somente no século XVII, quando a utilização da experiência para auxílio do raciocínio científico entrou em prática, foi que o homem começou a cogitar a natureza do ar e a possibilidade de produzir uma região sem ar ou em uma quantidade muito pequena deste.

Em 1640, Galileu considerou o motivo pelo qual as bombas d'água não conseguiam elevar a água dos reservatórios a alturas maiores que 10,3 m. Para compreender este fenômeno, Galileu fabricou dois recipientes de vidro: um com ar e outro que fora aquecido para reduzir a quantidade de ar em seu interior; a partir deste simples experimento percebeu que os recipientes tinham pesos diferentes, chegando a conclusão de que o ar tinha massa. Galileu não chegou a desenvolver maiores pesquisas neste campo e sua conclusão foi de que a água rompia-se por não suportar o próprio peso. Entretanto, um aluno de Galileu chamado Evangelista Torricelli aprofundou-se na questão sobre o “peso do ar” e sua relação com o tamanho da altura da coluna de água. (1)

Durante suas pesquisas Torricelli desenvolveu o primeiro barômetro que consistia em um tubo de ensaio cheio de mercúrio em que a extremidade aberta do tubo é temporariamente fechada e, então, se emborça este recipiente em uma vasilha contendo mercúrio. O nível do mercúrio no tubo de ensaio desce até alcançar o

equilíbrio em 76 cm, no nível do mar. Torricelli observou que a relação entre a altura da coluna de água e a altura da coluna de mercúrio é igual à relação entre a densidade de ambos. Utilizando-se do invento do barômetro de Torricelli, um cientista francês chamado Blaise Pascal verificou que, à medida que nos afastamos do nível do mar, a altura da coluna de mercúrio tende a diminuir, ou seja, o “peso do ar” diminui em altitudes maiores que a marítima.

Outro importante pesquisador da área de ciência e tecnologia do vácuo foi Otto von Guericke que, na segunda metade do século XVII, desenvolveu as primeiras bombas de vácuo a pistão, estas bombas ainda eram muito utilizadas nos laboratórios de física nos séculos XVIII e XIX. De fato, as espetaculares experiências de von Guericke foram um importante avanço na pesquisa com atmosferas reduzidas, todo o seu trabalho foi publicado no livro *Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgia de vácuo spacio* publicado em 1672. (1)

Desde os filósofos gregos com suas conjecturas até os dias atuais onde a ciência é baseada na experiência, observa-se o significativo avanço na ciência e tecnologia do vácuo. As primeiras pesquisas na área foram feitas a título de curiosidade do homem, esta curiosidade natural possibilitou e nos possibilita o desenvolvimento de uma série de processos e técnicas que não seriam possíveis ou seriam muito ineficientes se realizadas a pressões da ordem da pressão atmosférica. Como exemplo, podemos citar aplicações práticas nas mais diversas áreas, como as garrafas térmicas, as lâmpadas incandescentes, as válvulas eletrônicas utilizadas em larga escala até pouco mais da metade do século XX, a fabricação dos componentes eletrônicos que substituíram em parte estas válvulas, os estudos sobre a estrutura da matéria, lasers, fabricação de células solares, liofilização de vacinas e alimentos, entre outros. Mas por mais que nosso conhecimento seja maior do que o dos gregos de séculos atrás ainda há muito para se descobrir sobre o “nada”.

### 1.3 Vácuo

Uma definição científica mais aceita atualmente diz que um determinado recipiente se encontra em vácuo quando a densidade de partículas presentes em seu interior se encontra abaixo do que se encontra na atmosfera local. (2)

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades a unidade de medida de pressão é o pascal (Pa), isto é, o newton por metro quadrado. Mas dentro da Ciência e Tecnologia do Vácuo esta unidade é pouco utilizada; durante a redação deste trabalho será utilizado o milibar por dois motivos: o primeiro é que o milibar é de ordem de grandeza semelhante ao torr e segundo que a conversão de milibar para pascal é feita de maneira simples, bastando multiplicar a grandeza em milibar por 100 para obter-se o valor da pressão em pascal.

À medida que se reduz a pressão interna de um recipiente hermeticamente fechado o vácuo é classificado em primário, alto, muito alto e ultra-alto. Estas classificações são mostradas na tabela 1 juntamente com algumas grandezas físicas de interesse. Alguns autores utilizam classificações distintas desta apresentada na tabela 1, mas, em geral, esta classificação é bastante aceita.

Tabela 1: Comparação dos graus de classificação de pressão (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA).

Pressões (mbar)	Grau de classificação	Livre caminho médio (cm)	Número de colisões por $\text{cm}^3$	Número de colisões por segundo com 1 $\text{cm}^2$ de parede	Altitudes em relação à Terra com condições equivalentes (km)
$10^3$	Pressão atmosférica	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{23}$	Nível do mar
$10^2$					
10	Vácuo	$7 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{20}$	45
1					
$10^{-1}$					
$10^{-2}$	Vácuo primário	7	$2 \times 10^{13}$	$3 \times 10^{17}$	90
$10^{-3}$					
$10^{-4}$					
$10^{-5}$	Alto vácuo	$7 \times 10^3$	$2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{14}$	160
$10^{-6}$					
$10^{-7}$					
$10^{-8}$	Vácuo muito alto	$7 \times 10^6$	$2 \times 10^7$	$3 \times 10^{11}$	450
$10^{-9}$					
$10^{-10}$					
$10^{-11}$	Ultra-alto	$7 \times 10^9$	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^8$	1000
$10^{-12}$	Vácuo				
$10^{-13}$					

## **2. EMBASAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 Teoria Cinética dos Gases**

Gás é um dos três estados físicos da matéria presente em maior quantidade em nosso planeta; a matéria em fase gasosa caracteriza-se pela grande distância que há entre os átomos e/ou moléculas, as forças intermoleculares são muito pequenas e a única interação que ocorre entre as partículas dos gases são as colisões que ocorrem entre si. Um gás não tem forma nem volume definidos, assumindo geralmente a forma e o volume do recipiente que o contém. Há três variáveis que definem um gás – volume, pressão e temperatura – todas estas variáveis são consequência do movimento dos átomos e/ou moléculas. O volume é resultado da liberdade que os átomos e/ou moléculas tem de se espalhar ao longo do recipiente, a pressão é o resultado das colisões das partículas com as paredes do recipiente e a temperatura é o efeito da energia cinética média dos átomos e/ou moléculas do gás. (2)

Para a compreensão dos fenômenos dos sistemas de vácuo, devemos estudar a teoria cinética dos gases, pois a ciência e tecnologia do vácuo esta fundamentada em seus princípios, seja na área industrial ou científica. Para compreendermos adequadamente como se dá o comportamento do sistema de vácuo é necessário o estudo das propriedades dos gases a baixas pressões, estes fundamentos foram estabelecidos no século XIX por Maxwell e Boltzmann, com suas descobertas sobre a Teoria Cinética dos Gases. Essa teoria baseia-se na aplicação das leis da Mecânica às partículas durante seu perpétuo movimento e na interação que estas mantêm com as paredes do recipiente que contém o gás. (1)

### 2.1.1 Temperatura

As partículas que estão no estado gasoso têm velocidades distintas nas mais diversas direções, tanto a velocidade quanto a direção mudam constantemente a cada instante devido aos choques partícula/partícula ou partícula/parede, não possibilitando desta forma conhecer a velocidade das moléculas. Entretanto, é possível estabelecer uma relação entre a velocidade média do conjunto de partículas e a temperatura absoluta do sistema, cuja unidade é o Kelvin, esta relação é definida por uma escala proporcional à energia cinética média do centro de massa da molécula. (3)

$$\frac{1}{2}mv_r^2 = \frac{3}{2}kT \quad (1)$$

Onde  $m$  é a massa da partícula,  $v_r$  é a velocidade média quadrática,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ) e  $T$  é a temperatura. Somente para os gases monoatômicos a energia cinética é igual à energia total das moléculas. Em gases poliatômicos a energia total dependerá dos graus de liberdade da molécula, isto é, é preciso-se adicionar os termos correspondentes às vibrações e/ou rotações das moléculas.

### 2.1.2 Pressão

A pressão do gás está relacionada com os choques que as moléculas têm com as paredes do recipiente que o contêm, estes choques transferem certa quantidade de momento linear às paredes do recipiente exercendo deste modo uma força sobre ela. Esta força por unidade de área é conhecida como pressão e sua unidade no Sistema Internacional é o Newton por metro quadrado ( $\text{N.m}^{-2}$ ) também conhecido como pascal (Pa).



Se uma partícula de massa  $m$  cuja velocidade na direção  $x$  seja  $v_x$  chocar-se elasticamente com uma superfície, o momento linear desta partícula será  $mv_x$  antes do choque e  $-mv_x$  após o choque, resultando deste modo uma transferência de momento linear à parede equivalente a  $2mv_x$ . Nas direções  $y$  e  $z$  não há variação do momento linear.

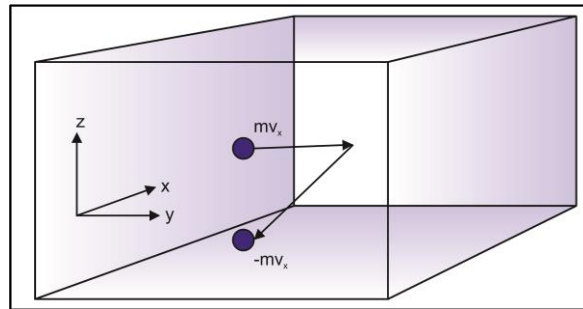


Figura 1: Choque elástico de uma partícula com o recipiente que contém o gás.

Durante certo intervalo de tempo  $t$  somente as partículas que estão a uma distância igual ou inferior a  $v_x t$  da parede do recipiente se chocaram com esta. Como a área da parede é  $A$  o volume ocupado pelas moléculas que podem chocar-se dentro do instante  $t$  é dado por  $v_x t A$  e o número de partículas que colidiram com a superfície do cubo será dado pelo produto do volume ocupado pela densidade do gás,  $n$ , e mais o fator de correção  $1/2$ , já que, estatisticamente somente metade das partículas nesta região do cubo se movimentam na direção da parede, logo, em cada intervalo de tempo  $t$ ,  $\frac{1}{2} n v_x A$  moléculas se chocarão com a parede do cubo. Assim, a componente da força na direção  $x$  será igual a:

$$F_x = \frac{1}{2} n v_x A \cdot 2 m v_x = n m v_x^2 A \quad (2)$$

Como na realidade não há distinção entre as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  pode-se considerar que as velocidades médias das moléculas são iguais em todas as direções e que estatisticamente um terço das partículas se movimenta em determinada direção logo, pode-se considerar que:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} v_r^2 \quad (3)$$

A pressão interna do cubo é dada pela seguinte expressão:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{nmv_x^2 A}{A} = \frac{1}{3} nmv_r^2 = \frac{2}{3} n \left( \frac{mv_r^2}{2} \right) \quad (4)$$

A pressão interna do recipiente está claramente relacionada com a energia cinética das moléculas do gás, demonstrando claramente que a pressão depende da temperatura em que se encontra o gás.

## 2.2 Equações de Estado

Equações de estado são relações matemáticas entre as variáveis termodinâmicas dos sistemas, tais como temperatura, pressão, volume, entropia, entre outras. Uma das mais importantes equações de estado conhecidas é a chamada lei dos gases ideais ou equação de Clapeyron-Mendeleev. É possível provar a partir das definições de pressão e temperatura mostradas nas seções 2.1.2 e 2.1.1, respectivamente, a lei dos gases ideais.

Sabendo que o número total de moléculas em um volume  $V$  é dado pela densidade do gás multiplicado por este volume ( $N = nV$ ), o produto da pressão pelo volume será:

$$pV = \frac{2}{3} n \left( \frac{mv_r^2}{2} \right) \frac{N}{n} = N \frac{2}{3} \left( \frac{mv_r^2}{2} \right) \quad (5)$$

Substituindo a equação (1) na equação (5), temos que:

$$pV = NkT \quad (6)$$

Apesar do método utilizado acima ser uma maneira simples de se provar a equação de Clapeyron-Mendeleev, originalmente esta foi provada através das leis de Boyle e de Charles.

O comportamento dos gases reais não obedece à equação dos gases ideais em todas as situações. Isto é especialmente válido quando o gás se encontra em altas pressões e baixas temperaturas, nestas situações as interações moleculares de repulsão e atração tornam-se significativas, como também se tornam importantes o tamanho das partículas quando comparado ao espaço entre as elas. (4)

Uma equação de estado mais abrangente que a equação dos gases ideais é a equação de van der Waals, proposta em 1873, esta nova descrição do estado gasoso prevê a influência do tamanho das moléculas e a força que atua entre elas, tais parâmetros afetam o comportamento dos gases. Estas forças intermoleculares são representadas através de dois parâmetros empíricos, o parâmetro  $a$  representa a relação entre as forças atrativas, enquanto  $b$  reflete as forças intermoleculares de repulsão. A tabela 2 fornece os parâmetros  $a$  e  $b$  para alguns gases comuns.

Tabela 2: Parâmetros  $a$  e  $b$  para alguns gases comuns.

Gás	$a$ (L <sup>2</sup> .atm.mol <sup>-2</sup> )	$b$ (L.mol <sup>-1</sup> )
He	0,0341	0,0237
Ne	0,211	0,0171
Ar	1,34	0,0322
H <sub>2</sub>	0,244	0,0266
N <sub>2</sub>	1,39	0,0391
O <sub>2</sub>	1,36	0,0318
CO <sub>2</sub>	3,59	0,0427

A forma geral da equação de van der Waals é dada pela expressão abaixo.

$$\left( p + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad (7)$$

Quando o volume do recipiente que contém o gás é muito grande, a equação de van der Waals recai na lei dos gases ideais, mostrando deste modo a influência das interações moleculares e do tamanho ocupado pelas partículas, que acabam tornando-se insignificantes em grandes volumes.

### 2.3 Livre Caminho Médio

A distância média percorrida por uma partícula entre duas colisões sucessivas é chamada de livre caminho médio. Como esta grandeza não é mensurável a única maneira de encontrar seu valor é por meio de equacionamento. Para isto, vamos considerar uma molécula que se move com velocidade  $v$  enquanto todas as outras moléculas ao seu redor permanecem paradas. Levando em conta um intervalo de tempo unitário a molécula estudada se chocará com todas as outras moléculas que estejam dentro de sua seção de choque, como mostrado na figura 2.

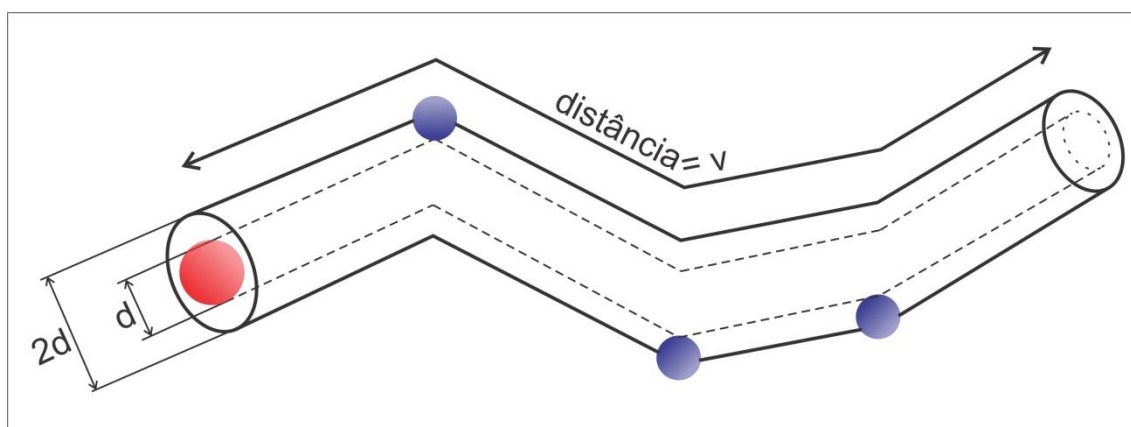


Figura 2: Percurso de uma molécula, por unidade de tempo em um gás constituído por diferentes espécies moleculares (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA).

Se as moléculas forem de espécies diferentes os diâmetros serão diferentes, logo, só haverá colisão quando os centros de ambas se encontrarem à distância igual a  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ . A seção eficaz de choque é dada pela área de  $d$ .

O volume do cilindro da figura 2 é igual ao produto da área pela altura, a área é igual a  $\pi d^2$  e a altura é igual à velocidade que a molécula se desloca, já que o intervalo de tempo considerado é unitário. O número de moléculas dentro do cilindro é proporcional à densidade molecular do gás, assim como o número de choques que ocorrem neste espaço hipotético. Desta forma, o número de colisões é dado pelo produto entre o volume do cilindro e a densidade do gás  $\pi d^2 v n$ .

O livre caminho médio é igual ao comprimento do cilindro pelo número de colisões que ocorrem enquanto a molécula percorre o cilindro. (3)

$$\lambda = \frac{v}{\pi d^2 n v} = \frac{1}{\pi d^2 n} \quad (8)$$

Esta equação, no entanto, não leva em consideração os vários tipos de colisões que podem ocorrer entre as moléculas, que podem ser desde colisões tangenciais até colisões frontais. Uma expressão mais rigorosa para o livre caminho médio que leva em consideração os diversos tipos de colisão é mostrada na equação 9. (3)

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (9)$$

É muito comum na literatura a expressão que mostra o livre caminho médio em função da temperatura e da pressão, em um primeiro momento isto parece lógico, pois ao aumentarmos a temperatura as partículas do gás se movimentarão mais, consequentemente será maior o número de colisões. Mas esta expressão está errada, pois de acordo com a lei de Charles, temperatura e pressão são proporcionais, desde que o volume seja mantido constante, ou seja, observando a equação 10 é possível notar que qualquer acréscimo ou decréscimo seja na temperatura será compensado pela pressão.

Mantém-se desta forma o livre caminho médio inalterado, mostrando deste modo que não há dependência do livre caminho médio com a temperatura.

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \quad (10)$$

## 2.4 Elementos para o Cálculo de Sistemas de Vácuo

A velocidade de bombeamento, representada pela letra  $S$ , pode ser definida como o volume de gás retirado por unidade de tempo,  $S = \frac{dV}{dt}$ . A quantidade de gás bombeada por unidade de tempo, conhecida como *throughput*  $Q$ , é proporcional à pressão do gás na câmara de vácuo, admitindo que a temperatura mantenha-se constante. (3)

$$Q = Sp \quad (11)$$

O *throughput* também pode ser definido a partir da lei dos gases perfeitos, se derivarmos no tempo a equação 6, obtemos uma expressão que relaciona o *throughput* com a variação de tempo. (5)

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{d(pV)}{dt} = \frac{d(NkT)}{dt} \\ Q(t) &= V \frac{dp}{dt} = kT \frac{dN}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

No Sistema Internacional de unidades, o *throughput* tem unidade de potência e podemos interpretá-lo como sendo diretamente proporcional à vazão da energia cinética média de translação das moléculas no sistema de vácuo. (5)

A equação diferencial que rege o bombeamento dos gases e vapores nos sistemas de vácuo é apresentada pela expressão 13, a partir dela é possível determinar a evolução temporal da pressão na câmara de vácuo.

$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = -S_{ef} p_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (13)$$

A partir da equação diferencial apresentada acima é possível observar que o termo  $-S_{ef} p_{CV}(t)$  é igual ao *throughput* removido do sistema de vácuo. O termo  $S_{ef}$  representa a velocidade efetiva de bombeamento, ou seja, a velocidade real com que os gases são removidos do sistema de vácuo pelas bombas de vácuo e  $\sum_{i=1}^n Q_i$  representa a somatória de todas as fontes de gases e vapores presentes, tais como: vazamento real ( $Q_{VR}$ ), vaporização ( $Q_{vap}$ ), Desgaseificação ( $Q_{deg}$ ) entre outras.

A velocidade de bombeamento efetiva não depende somente das especificações da bomba de vácuo ligada ao sistema, mas também do inverso da resistência à passagem dos gases pelos elementos que ligam a câmara de vácuo a bomba, também conhecida como condutância. Estes elementos dificultam a passagem do gás diminuindo desta forma a velocidade de bombeamento do sistema. A equação 14 apresenta o cálculo da velocidade de bombeamento efetiva em função da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo e da condutância total dos elementos que ligam a câmara de vácuo a bomba.

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{total}} \quad (14)$$

Em geral, o resultado deste tipo de somatória é menor do que a menor parcela dos termos que o compõe; na prática, isto significa que de nada adianta aumentar a velocidade de bombeamento do sistema de vácuo enquanto a condutância total permanece com um valor pequeno, já que a velocidade de bombeamento efetiva será menor do que este valor. Este fato fica claramente ilustrado na figura 3.

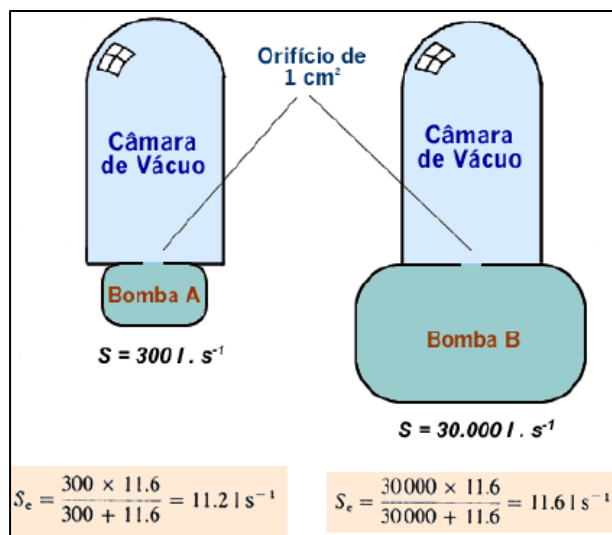


Figura 3: Influência da condutância na velocidade de bombeamento efetiva. (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).

Note que na ilustração à direita mesmo com uma velocidade de bombeamento cem vezes maior quando comparado com a figura à esquerda, a velocidade efetiva de bombeamento pouco mudou.

O cálculo da condutância total do sistema quando os elementos através dos quais o gás passa se encontram em série, que ocorre na maior parte dos sistemas de vácuo, também é dado pelo inverso da soma dos inversos, como apresentado na equação 15.

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \dots \frac{1}{C_n} \quad (15)$$

Isto demonstra que a velocidade de bombeamento do sistema será fortemente influenciada pelo componente que oferece a maior restrição a passagem do gás.



## 2.5 Regimes de Escoamento de Gases em Tubos e Orifícios

A condutância de um componente do sistema de vácuo seja ela um orifício ou um tubo depende não somente de suas dimensões, mas também do tipo de fluxo que se estabelece através dela. Os gases rarefeitos apresentam, basicamente, quatro tipos distintos de regimes de escoamento, que variam de acordo com a pressão e a velocidade de bombeamento.

O critério utilizado para definir a zona de transição entre os regimes de escoamento dos gases rarefeitos é obtido a partir do número de Knudsen,  $Kn = \frac{\lambda}{d}$ , onde  $\lambda$  é o livre caminho médio das moléculas do gás, definido pela equação 9 e  $d$  é uma dimensão característica do sistema, como por exemplo, o diâmetro da tubulação. A tabela 3 mostra as faixas de transição dos regimes de escoamento de gases rarefeitos.

Tabela 3: Relação entre o número de Knudsen e o regime de escoamento. (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA).

Número de Knudsen (Kn)	Regime de Escoamento
<b>Kn &lt; 0,01</b>	Turbulento
<b>Kn &lt; 0,01</b>	Viscoso laminar
<b>0,01 &gt; Kn &gt; 1,0</b>	Intermediário
<b>Kn &gt; 1,0</b>	Molecular

Como o número de Knudsen não define a transição entre os regimes de escoamento turbulento e viscoso laminar é preciso outro parâmetro físico que defina quando ocorre a transição entre estas formas de escoamento. O critério utilizado para delimitar a zona de transição é dado por outro número adimensional, o número de Reynolds,  $Re = \frac{Dv\rho}{\eta}$ , onde  $D$  é o diâmetro do tubo,  $v$  é a velocidade média do fluxo de

gás através da tubulação e  $\rho$  e  $\eta$  são a densidade e o coeficiente de viscosidade do gás, respectivamente. A tabela 4 define as faixas de transição entre os regimes de escoamento turbulento e viscoso laminar.

Tabela 4: Relação entre o número de Reynolds e o regime de escoamento (MOUTINHO, A. M. C. – TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA).

<b>Número de Reynolds (Re)</b>	<b>Regime de Escoamento</b>
<b>Re &gt; 2000</b>	Turbulento
<b>1000 &lt; Re &lt; 2000</b>	Turbulento ou Viscoso Laminar
<b>Re &lt; 1000</b>	Viscoso Laminar

### 2.5.1 Regime de Escoamento Viscoso Turbulento

Ocorre quando o sistema começa a ser bombeado a partir da pressão atmosférica. Neste regime a pressão e velocidade dos gases são elevadas, causando redemoinhos e oscilações no fluxo de gás como representado na figura 4. (3)

Em geral, o regime de escoamento turbulento não é considerado nos sistemas de vácuo. (5)

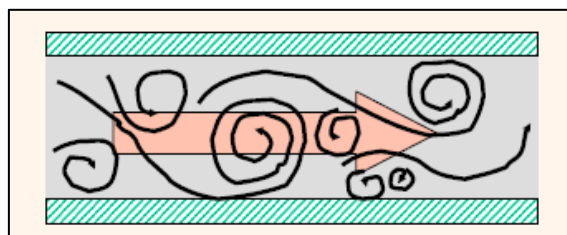


Figura 4: Regime de escoamento turbulento (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).

### 2.5.2 Regime de escoamento Viscoso Laminar

É o regime posterior ao viscoso turbulento, neste estágio a pressão e a velocidade dos gases já não são tão elevadas, e o comportamento das moléculas do gás, apesar de seu movimento caótico, dá-se de forma coletiva o que acaba permitindo ao gás deslocar-se em camadas finas, sobrepostas e contínuas umas às outras, como pode ser visto na figura 5. A maior velocidade das camadas se dá na parte central do tubo e consequentemente as menores velocidades estão junto às paredes. Neste regime o livre caminho médio ainda é muito pequeno quando comparado com o diâmetro do tubo através do qual o gás esco. (5)

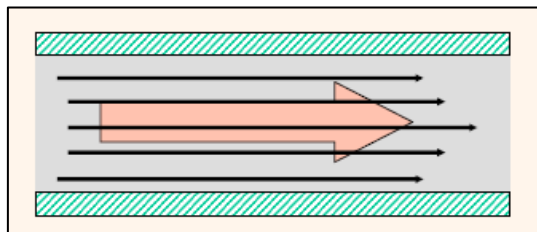


Figure 5: Regime de escoamento viscoso laminar (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).

Neste regime a condutância de um tubo cilíndrico comprido é dada por

$$C = 2,46 \times 10^{-2} \frac{D^4}{\eta L} p_m \quad [Ls^{-1}] \quad (16)$$

Para que o resultado seja dado em  $Ls^{-1}$ ,  $p_m$  deve estar em milibar, D e L em centímetros e  $\eta$  em poise.

### 2.5.3 Regime de escoamento Intermediário ou de Knudsen

Corresponde à transição entre o fluxo viscoso e o fluxo molecular; difere do fluxo viscoso pelo fato de que a velocidade do gás junto à parede do tubo não pode ser considerada nula. Para este regime de escoamento as moléculas apresentam frequências de colisões entre si comparáveis com as das paredes do tubo, figura 6. (5)

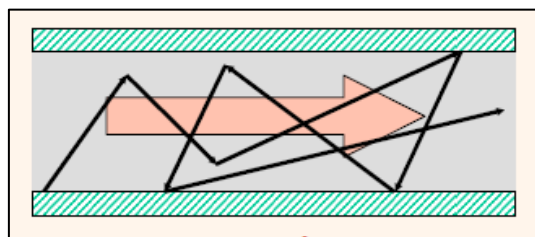


Figure 6: Regime de escoamento intermediário (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).

No regime de escoamento intermediário pode-se calcular a condutância considerando a soma de duas parcelas, uma devida ao fluxo viscoso e outra devido ao fluxo molecular:

$$C_{\text{int.}} = C_{\text{visc.}} + C_{\text{mol.}} \quad [Ls^{-1}] \quad (17)$$

### 2.5.4 Regime de escoamento Molecular

É o último regime de escoamento e caracteriza-se por ocorrer em baixas pressões, quando o livre caminho médio das partículas é muito maior que o diâmetro do tubo, como pode ser visto na figura 7, o que acaba dificultando enormemente o choque

entre as partículas; Praticamente o único tipo de colisão que ocorre neste regime é o da parede do tubo com as moléculas do gás. Neste tipo de escoamento o transporte das moléculas do gás ocorre exclusivamente devido a agitação térmica das partículas que compõem o gás, este movimento é caótico e permanente e é determinado pela distribuição de Maxwell-Boltzmann das velocidades, sendo assim, dependente da temperatura e da massa molecular. (5)

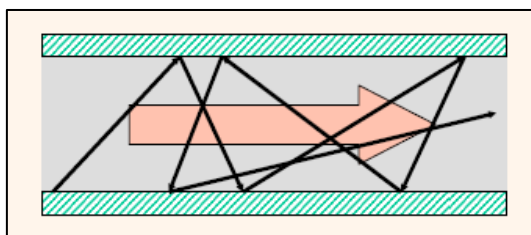


Figura 7: Regime de escoamento molecular (DEGASPERI, F. T. – NOTAS DE AULA).

A condutância neste regime é dada por

$$C = 3,8 \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{D^3}{L} \quad [Ls^{-1}] \quad (18)$$

## 2.6 Escoamento Através de Orifícios

Segundo a teoria de escoamento de fluidos compressíveis, passa de um volume a outro através de um orifício, em que a pressão em um dos volumes é mantida constante - digamos a pressão atmosférica - enquanto que o outro volume inicialmente se encontra em vácuo. Haverá o *throughput* de gás do recipiente de maior pressão para o que se encontra em vácuo, até que as pressões se igualem. O *throughput* de gás dá-se de maneira constante, até que a condição explicitada na equação 19 seja alcançada; nesta condição diz-se que o fluxo de gás se encontra bloqueado.

$$\frac{p_{CV}}{p_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = r_c \quad (19)$$

Onde  $r_c$  é a chamada razão crítica, cujo valor experimental é calculado pela razão da pressão na câmara de vácuo,  $p_{CV}$ , pela pressão no reservatório de gás à entrada do sistema,  $p_0$ . O valor teórico da razão crítica segundo os resultados da mecânica dos fluidos aplicada à dinâmica dos gases rarefeitos depende única e exclusivamente do parâmetro  $\gamma$  (que por sua vez depende de:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ) que é a razão entre o calor específico molar a pressão constante e o calor específico molar a volume constante. Estas propriedades termodinâmicas dependem do tipo de gás, como mostrado na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetro  $\gamma$  em função do tipo de gás (LAFFERTY, J. M. - FOUNDATIONS OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY - JOHN WILEY & SONS)

Tipo de Gás	$\gamma$	$r_c$
<b>Monoatômico</b>	1,66	0,4881
<b>Diatômico</b>	1,4	0,5281
<b>Triatômico</b>	1,3	0,5457
<b>Poliatômico</b>	1,1	0,5847

Cabe ressaltar que este modelo teórico foi desenvolvido para orifícios, considerando que a expansão do gás é adiabática e não leva em consideração a viscosidade do gás. Em tubos curtos ou orifícios o efeito da viscosidade do gás não se faz tão presente, mas à medida que o comprimento do tubo aumenta a viscosidade passa a ser um fator preponderante no modo como se dá o fluxo de gás.

Ao passar de um volume a outro o gás é acelerado na entrada, ocasionando uma queda tanto na pressão como na temperatura. À medida que o gás percorre a tubulação a aceleração continua, a pressão e a temperatura caem do mesmo modo, esta situação ocorre até que o gás alcance a velocidade do som no local,  $Mach = 1$ . (6)

Considerando uma expansão adiabática, conforme os resultados da dinâmica dos fluidos compressíveis o *throughput* passando por um orifício de área  $A$  é dado por dois modelos distintos como pode ser visto nas equações 20 e 21, sendo que a transição entre estes modelos é dada pela  $r_c$ .

1º modelo:  $0 \leq \frac{p_{CV}}{p_0} \leq r_c$

$$Q = A p_0 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\left( \frac{RT}{M} \right) \left( \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)} \quad (20)$$

2º modelo:  $\frac{p_{CV}}{p_0} \geq r_c$

$$Q = A p_0 \left( \frac{p_{CV}}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{RT}{M} \left[ 1 - \left( \frac{p_{CV}}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Quando a razão da pressão na câmara de vácuo pela pressão na entrada for menor que a razão crítica o *throughput* é constante, já que o modelo matemático desta região só relaciona constantes. Mas a partir do momento em que este modelo não é mais válido, o *throughput* passa a decair devido ao aumento da pressão na câmara de vácuo, e esta situação se mantém até que não haja mais fluxo de gás. O gráfico 1 representa esta situação; a região vermelha da curva mostra a validade do modelo 1, onde o

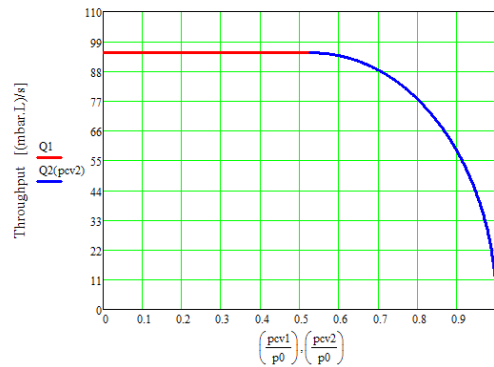


Gráfico 1: Throughput em função das razões entre as pressões para os dois modelos.

*throughput* é constante. Já a parte azul da curva representa o modelo 2, onde o *throughput* depende da pressão na câmara de vácuo e diminui à medida que esta cresce. A transição entre os dois modelos é dada quando a razão entre as pressões alcança a região crítica.

### 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Especificações e Limpeza dos Tubos

Para a realização deste trabalho serão utilizados capilares de vários diâmetros e comprimentos parametrizados em determinados valores. Isto possibilita a obtenção de *throughputs* de diversos valores. As dimensões dos tubos são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6: Dimensões dos capilares.

<b>Diâmetro</b>	<b>Comprimento</b>			
<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>			
<b>0,5 ± 0,1</b>	30 ± 2	60 ± 2	120 ± 2	240 ± 2
<b>0,8 ± 0,1</b>	30 ± 2	60 ± 2	120 ± 2	240 ± 2
<b>1,3 ± 0,1</b>	30 ± 2	60 ± 2	120 ± 2	240 ± 2
<b>2,0 ± 0,1</b>	30 ± 2	60 ± 2	120 ± 2	240 ± 2
<b>3,3 ± 0,1</b>	30 ± 2	60 ± 2	120 ± 2	240 ± 2

A limpeza dos capilares foi realizada com água quente misturada com detergente alcalino, os capilares ficaram imersos nesta mistura durante algumas horas. Posteriormente, para garantir que não houvesse nenhuma obstrução na parte interna dos capilares injetou-se por meio de uma seringa hipodérmica um fluxo de água para expulsar qualquer obstrução que porventura estivesse presa às paredes internas dos tubos, o procedimento pode ser visto na figura 8.



Para realizar a secagem da água utilizada nos processos anteriores utilizou-se álcool isopropílico, já que este produto tem uma alta pressão de vapor, facilitando o processo de evaporação. Estas etapas de limpeza foram realizadas uma única vez antes da prática dos experimentos. Cabe ressaltar também que os capilares já estavam cortados e armazenados em ambiente adequado no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV) e as etapas de limpeza foram realizadas somente para garantir maior confiabilidade.



Figura 8: Processo de limpeza dos capilares.

Após a limpeza e secagem dos capilares, os mesmos foram armazenados em tubos de PVC, como mostra a figura 9. Estes tubos foram cortados em tamanhos adequados e limpos para evitar que houvesse qualquer sujeira que pudesse obstruir a parte interna dos capilares. Posteriormente, houve a identificação dos tubos de PVC com etiquetas informando as dimensões dos capilares armazenados.



Figura 9: Capilares após a limpeza, à esquerda, e armazenados nos tubos de PVC, à direita.

### 3.2 Construção dos Componentes Auxiliares

Para a realização deste trabalho foi necessário a construção de peças para inserção dos capilares no sistema de vácuo, já que os mesmos têm dimensões reduzidas e certa fragilidade. Estas peças foram projetadas e construídas visando sempre manter as exigências necessárias para um sistema que trabalhe na faixa do pré-vácuo.

Durante o projeto destes componentes auxiliares procurou-se sempre reduzir ao máximo a possibilidade de vazamento nas peças e que os materiais utilizados nas mesmas mantivesse uma baixa taxa de desgaseificação, boa resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Para isto, as peças foram construídas em aço inoxidável 304L e polidas mecanicamente. Para a vedação das mesmas, utilizamos anéis de vedação tipo O-rings fabricados com borrachas adequadas para faixa de pré-vácuo. A figura 10 mostra a vista frontal em corte das duas peças que compõem o conjunto responsável por conectar o capilar ao resto do sistema de vácuo.

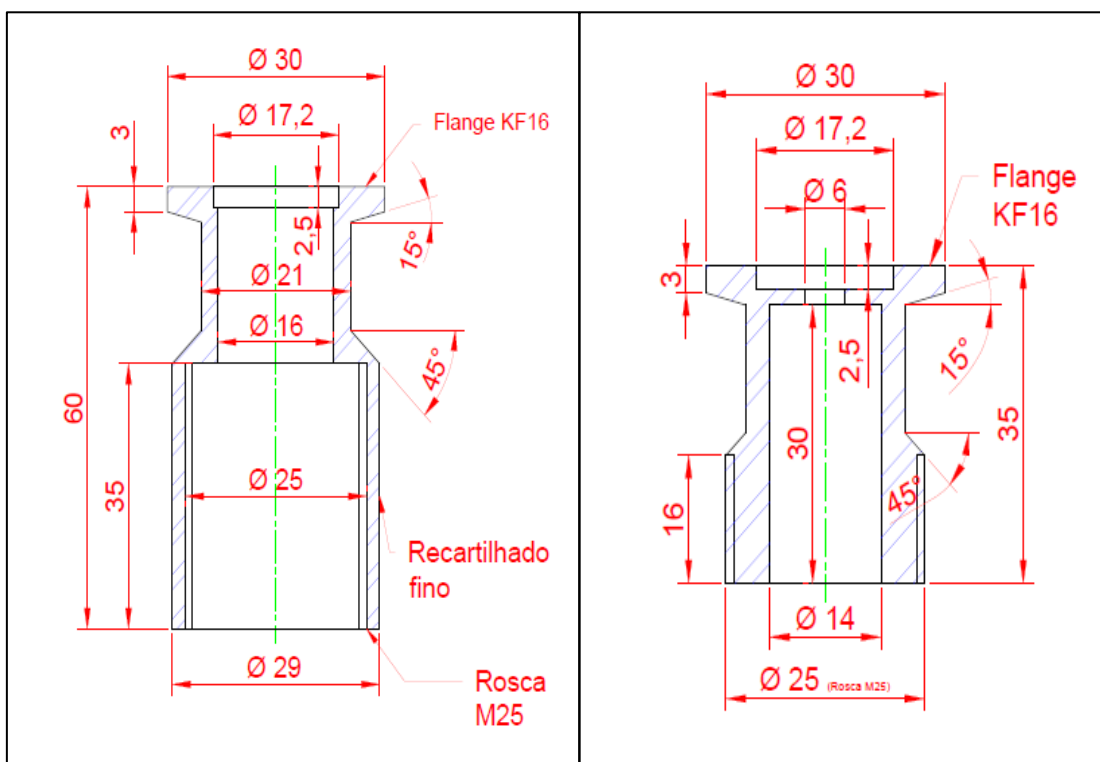


Figura 10: Desenho em AutoCAD 2013 do corte da vista frontal do engate rápido que liga o capilar ao sistema de vácuo; à esquerda temos a componente fêmea do conjunto enquanto que à direita se encontra o componente macho.

Mas, por si só o engate rápido não consegue dar suporte mecânico ao capilar, para resolver este problema projetou-se outro conjunto de peças para dar sustentação mecânica ao capilar e impedir a possibilidade de vazamentos grosseiros através desta parte do sistema de vácuo. Estas peças são chamadas de porta amostra, a figura 11 mostra em detalhes a forma destes componentes.

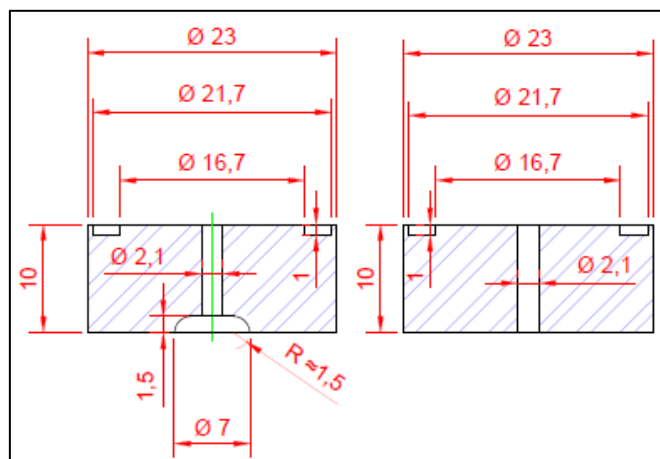


Figura 11: Desenho em AutoCAD 2013 do corte da vista frontal de um conjunto porta amostra para o capilar de 1,3 mm.

Cabe ressaltar que o engate rápido pode ser utilizado para todos os capilares que serão estudados, enquanto que o porta amostra só pode ser utilizado para um diâmetro específico, de forma a garantir uma boa vedação do conjunto e do suporte mecânico das amostras, quando inseridas no sistema de vácuo. A figura 12 mostra o desenho em vista expandida de todo o conjunto, enquanto que a figura 13 mostra uma fotografia do conjunto montado.

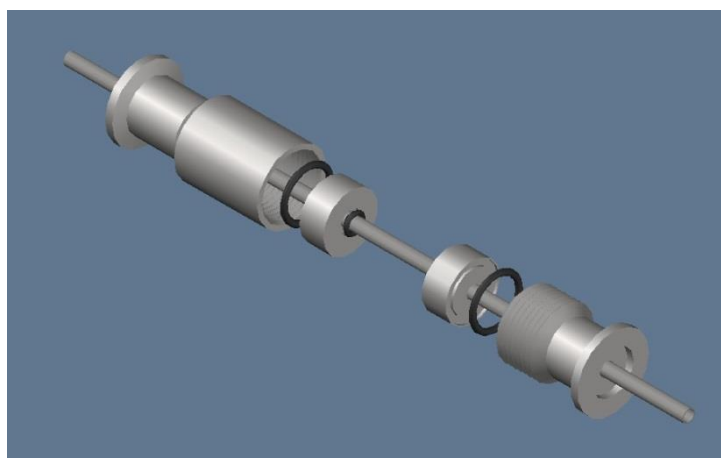


Figura 12: Desenho em AutoCAD 2013 da vista expandida do conjunto completo montado.



Figura 13: Imagem do engate rápido montado com o capilar posicionado.

### 3.3 Montagem do Sistema de Vácuo

A montagem do arranjo experimental seguiu os mesmos cuidados utilizados durante a limpeza das peças, procurou-se manter o ambiente de trabalho limpo para evitar a contaminação das câmaras de vácuo, válvulas e tubulações. Como as câmaras de vácuo utilizadas para este trabalho e os outros componentes deste sistema já haviam passado pelos mesmos processos de limpeza citados no tópico anterior e, em geral, estes componentes não trabalham com algo que possa contaminá-los, não foi preciso realizar novamente a limpeza destes acessórios.

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 eletro polido, o que as torna ideais para trabalhar em ambientes que exigem limpeza para a realização dos processos. Durante a montagem dos elementos do sistema de vácuo procurou-se 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.

A figura 14 mostra o diagrama de montagem do sistema de vácuo utilizado durante a realização dos experimentos, o sistema é composto por duas câmaras de vácuo, um recipiente para entrada de gás, uma bomba mecânica de palhetas de duplo

estágio, medidores de pressão tipo membrana capacitiva entre outros componentes comuns aos sistemas de vácuo.

A utilização de duas câmaras de vácuo de volumes distintos para o estudo do fenômeno da bloqueio se deve ao fato de haver vários capilares com dimensões bem distintas entre si. No caso de um gás que sai do reservatório de entrada e passa por um capilar de pequeno diâmetro, digamos 0,5 mm, e vai para a câmara de vácuo 1 (CV<sub>1</sub>) o tempo da realização do experimento será muito grande, já que o volume a ser preenchido é considerável e a resistência à passagem do gás também é elevada, desta maneira a quantidade de gás utilizada durante o processo será maior. A situação oposta ao caso especificado anteriormente também não é vantajosa, já que o estudo do fenômeno pode ser prejudicado pelo rápido aumento da pressão no tempo. Por estes motivos, optou-se por utilizar a câmara de menor volume (CV<sub>2</sub>) para os capilares de 0,5 mm e 0,8 mm de diâmetro, enquanto que a câmara de vácuo 1 (CV<sub>1</sub>) seria utilizada para os capilares de dimensões superiores: 1,3 mm, 2,0 mm e 3,3 mm de diâmetro. Isto em nada atrapalha o estudo efetuado neste trabalho, somente altera o tempo utilizado para a realização de um experimento.

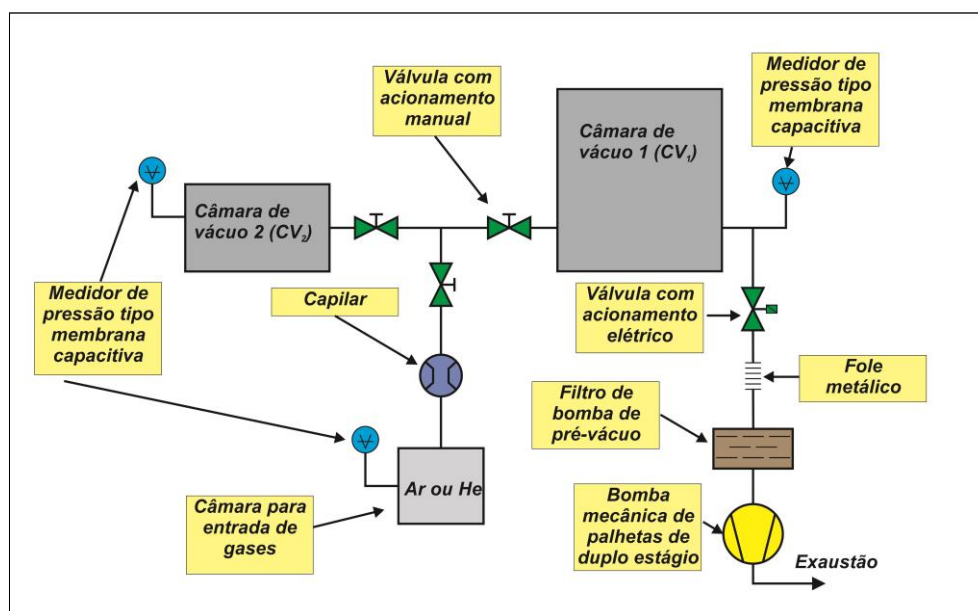


Figura 14: Diagrama unifilar do sistema de vácuo.



Figure 15: Imagem do sistema de vácuo montado.

### 3.4 Determinação dos Volumes das Câmaras de Vácuo Através do Método de Expansão Estática

A equação 12 nos fornece o *throughput* a partir da derivada da pressão em função do tempo multiplicada pelo volume da câmara de vácuo que está sendo preenchida pelo gás. Para aplicações metrológicas, a determinação dos volumes das câmaras de vácuo é de vital importância e o método de expansão estática fornece uma maneira simples e baseada em primeiros princípios para determinar o volume com elevada exatidão e precisão.

O método de expansão estática é baseado na lei de Boyle-Mariotte, onde temos que o produto da pressão pelo volume de um recipiente se mantém constante, como mostrado na equação 22.



$$p_i V_p = p_f (V_{cv} + V_p)$$

$$V_{cv} = \frac{p_i}{p_f} V_p - V_p \quad (22)$$

Se tanto a pressão ( $p_i$ ) como o volume inicial ( $V_p$ ) forem determinados com baixa incerteza relativa, esta baixa incerteza será transmitida ao resultado do volume da câmara de vácuo. A pressão é determinada através de um medidor de membrana capacitiva BARATRON®, este manômetro pertence ao Laboratório de Integração e Teste (LIT) filiado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Dentro dos serviços prestados pelo LIT se encontra a calibração de medidores de vácuo, área onde grande exatidão e precisão são necessárias. Já o recipiente inicial denominado de  $V_p$  teve seu volume determinado através do método gravimétrico em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV). (7)

O procedimento experimental para determinação dos volumes das câmaras de vácuo foi realizado da seguinte maneira: inicialmente reduziu-se a pressão da câmara de vácuo que deveria ter seu volume determinado aproximadamente até 1 milibar, após isto abre-se a válvula que separa a câmara de vácuo do volume-padrão, que se encontra a pressão atmosférica, dando passagem ao fluxo de gás entre as câmaras até que ocorra o equilíbrio entre as pressões. As figuras 16 e 17 retratam as condições inicial e final da expansão dos gases.

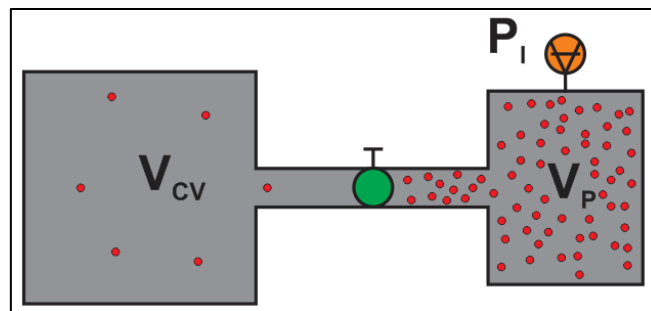


Figura 16: Sistema antes da expansão.

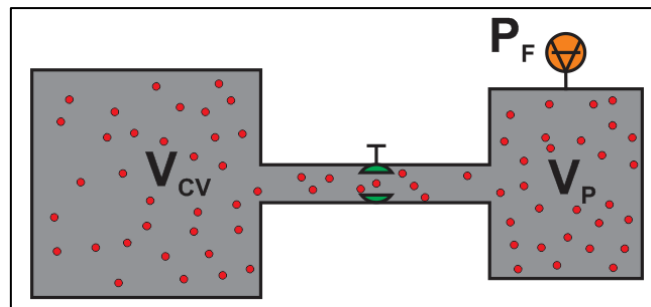


Figura 17: Sistema após a expansão.

As expansões foram realizadas em um ambiente isolado de maneira a manter a temperatura constante durante todo o processo. No total, realizaram-se cinco expansões em cada sistema: uma expansão para determinar o volume da câmara de vácuo 1, a segunda expansão foi utilizada para determinar o volume da câmara de vácuo 2 e por fim a terceira expansão foi realizada de maneira a determinar o volume do sistema de vácuo como um todo, com as câmaras de vácuo 1 e 2 juntas. Se todo o procedimento experimental foi seguido de maneira correta, a soma dos volumes obtidos nas expansões 1 e 2 deve ser aproximadamente igual ao volume obtido experimentalmente na terceira expansão. Os resultados das expansões são mostrados na tabela 7.



Tabela 7: Resultados das expansões.

Câmara Menor			Câmara Maior			Sistema		
Expansão	Pressão de partida (torr)	Pressão final (torr)	Expansão	Pressão de partida (torr)	Pressão final (torr)	Expansão	Pressão de partida (torr)	Pressão final (torr)
1	1,072	132,39	1	1,043	13,12	1	1,074	12,3
2	1,098	132,35	2	1,079	13,148	2	1,058	12,293
3	1,035	132,26	3	1,065	13,14	3	1,081	12,318
4	1,092	132,31	4	1,078	13,216	4	1,073	12,301
5	1,076	132,26	5	1,068	13,131	5	1,062	12,295
<b>Média</b>	1,0746	132,314	<b>Média</b>	1,0666	13,151	<b>Média</b>	1,0696	12,3014
<b>Desvio padrão</b>	0,022033	0,05083	<b>Desvio padrão</b>	0,013002	0,03381	<b>Desvio padrão</b>	0,009397	0,00986
<b>Erro relativo</b>	2,050%	0,038%	<b>Erro relativo</b>	1,219%	0,257%	<b>Erro relativo</b>	0,879%	0,080%
<b>Antes da Expansão</b>			<b>Antes da Expansão</b>			<b>Antes da Expansão</b>		
Pressão atmosférica (torr)		706,47	Pressão atmosférica (torr)		706,17	Pressão atmosférica (torr)		705,6
Termômetro digital (°C)		17,9	Termômetro digital (°C)		18,6	Termômetro digital (°C)		18,9
Termômetro analógico (°C)		20	Termômetro analógico (°C)		21	Termômetro analógico (°C)		21
<b>Após a Expansão</b>			<b>Após a Expansão</b>			<b>Após a Expansão</b>		
Pressão atmosférica (torr)		706,45	Pressão atmosférica (torr)		705,6	Pressão atmosférica (torr)		705,24
Termômetro digital (°C)		18,4	Termômetro digital (°C)		18,8	Termômetro digital (°C)		19,1
Termômetro analógico (°C)		21	Termômetro analógico (°C)		21	Termômetro analógico (°C)		21,5

Aplicando os resultados da tabela 7 na equação 22 é possível calcular o volume das câmaras de vácuo, os resultados juntamente com suas respectivas incertezas estão disponíveis na tabela 8.

Tabela 8: Volume das câmaras de vácuo.

<b>Expansão</b>	<b>Volume</b>
<b>Câmara de Vácuo 1</b>	$(4,6 \pm 0,1) \text{ L}$
<b>Câmara de Vácuo 2</b>	$(56,4 \pm 0,8) \text{ L}$
<b>Sistema</b>	$(60,3 \pm 0,6) \text{ L}$

Por meio da tabela 8 nota-se que a soma do volume das câmaras de vácuo 1 e 2 é muito próxima ao volume obtido experimentalmente na terceira expansão e a diferença entre ambas está dentro da incerteza da medição. Isto ratifica o método utilizado para determinação dos volumes garantindo uma maior confiabilidade nos resultados que serão obtidos a partir dos valores destes volumes.

### 3.5 Métodos Experimentais

A utilização dos capilares descritos na tabela 6 juntamente com o uso de duas espécies gasosas distintas, Hélio e Argônio, resulta em um total de quarenta combinações diferentes, já que é possível variar o diâmetro do capilar, o comprimento e o tipo de gás. Cada combinação foi repetida duas vezes, possibilitando a execução do tratamento estatístico dos dados, resultando desta forma a diminuição da possibilidade de erros aleatórios durante a realização dos experimentos, essa repetição aumenta o número de testes realizados para oitenta.

O procedimento experimental utilizado para o estudo do fluxo bloqueado de gases monoatômicos é semelhante ao utilizado para determinação dos volumes das câmaras de vácuo através do método de expansão estática. Inicialmente uma câmara de vácuo é bombeada até pressões da ordem de  $10^{-2}$  milibar, ao alcançar-se esta pressão a válvula

que dá acesso à bomba de vácuo é desligada e o sistema permanece estanque, então a passagem da válvula que liga as câmaras de vácuo ao recipiente de entrada de gás é aberta e o gás flui através do capilar preenchendo a câmara de vácuo. Esta passagem do gás entre os recipientes tende a diminuir a pressão da câmara de entrada de gases, para que isto não ocorra é necessário repor a quantidade de gás que saiu, para que a pressão na câmara de entrada se mantenha constante – condição necessária para a ocorrência da blocagem – como é praticamente impossível determinar *in situ* a quantidade de gás que deve ser injetada para que a pressão se mantenha constante, um dos *flanges* da câmara de entrada é mantida aberta e o fluxo de gás proveniente do cilindro é mantido em uma vazão alta, de modo que o excesso de gás é expulso através desta passagem aberta e a pressão no recipiente de entrada é mantida constante e ao mesmo tempo com uma atmosfera enriquecida com o gás de interesse. A pressão no recipiente de entrada é também monitorada por um manômetro de membrana capacitiva. A figura 18 retrata a posição do *flange* aberta a atmosfera para regulagem da pressão.

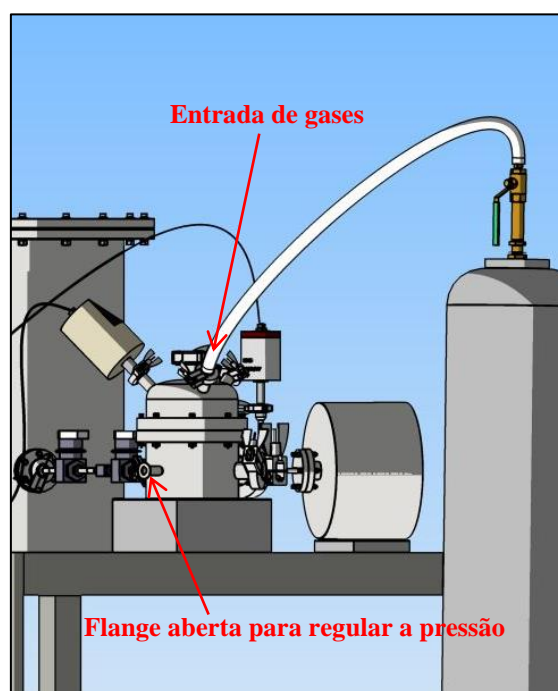


Figure 18: Desenho de conjunto feito no Inventor 2013 retratando um detalhe do arranjo experimental.

Ao término do experimento com o capilar, a válvula que interliga as duas câmaras e a válvula do cilindro de gás são fechadas e a câmara de vácuo volta a ser bombeada até a pressão base, para que o experimento possa ser feito novamente com as mesmas

condições. Quando os dois experimentos com o mesmo capilar forem terminados, o sistema de vácuo é isolado e procede-se o desmonte do engate rápido para a troca do capilar.

### **3.6 Coleta de Dados Computadorizada**

A coleta de dados é feita de maneira automática por um multímetro de bancada que lê o sinal de tensão enviado pelo medidor de membrana capacitiva BARATRON® e envia este valor para o computador que armazena os dados, fornecendo uma tabela que relaciona o valor captado pelo multímetro em função do intervalo de tempo ajustado para a amostragem dos dados - em todos os experimentos este tempo de amostragem foi ajustado em 1 segundo. Apesar de o multímetro de bancada coletar um sinal elétrico, o fabricante deste equipamento fornece um fator de ajuste para transformá-lo em pressão, este fator é igual a cem, ou seja, o valor de um volt indicado pelo multímetro equivale a 100 torr em escala de pressão.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

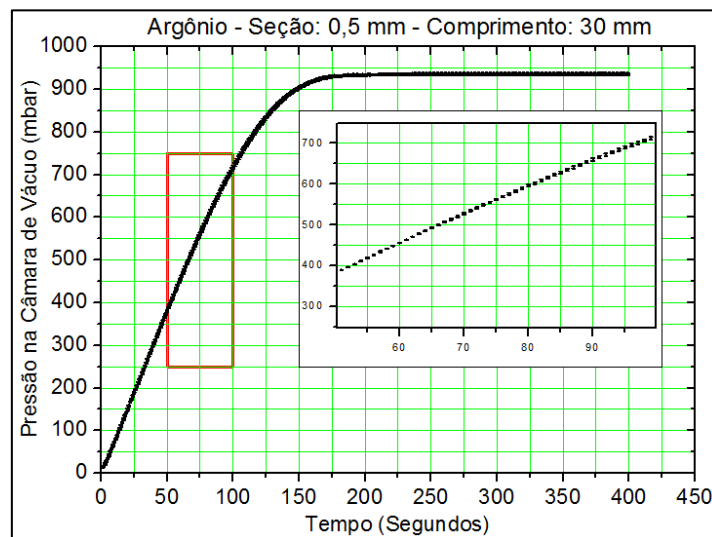


Gráfico 2: Detalhe do gráfico pressão X tempo.

O resultado direto obtido pela execução dos procedimentos dos itens 3.5 e 3.6 deste trabalho, são os gráficos que fornecem a pressão na câmara de vácuo em função do tempo. Apesar das curvas parecerem contínuas, na realidade elas são compostas por pontos discretos próximos uns aos outros, como ilustrado no gráfico 2.

A realização de dois experimentos para cada combinação possibilita a realização do tratamento estatístico dos dados por meio de uma curva média com sua respectiva incerteza, o detalhe que aparece no gráfico 2 mostra parte da curva média obtida para o capilar de 0,5 mm de diâmetro com 30 mm de comprimento utilizando o gás argônio. A barra de incerteza é muito pequena, corroborando as práticas realizadas durante os experimentos. O gráfico 3 retrata os dois experimentos realizados para gerar a curva média do gráfico 2, note que praticamente as duas curvas se sobrepõem.

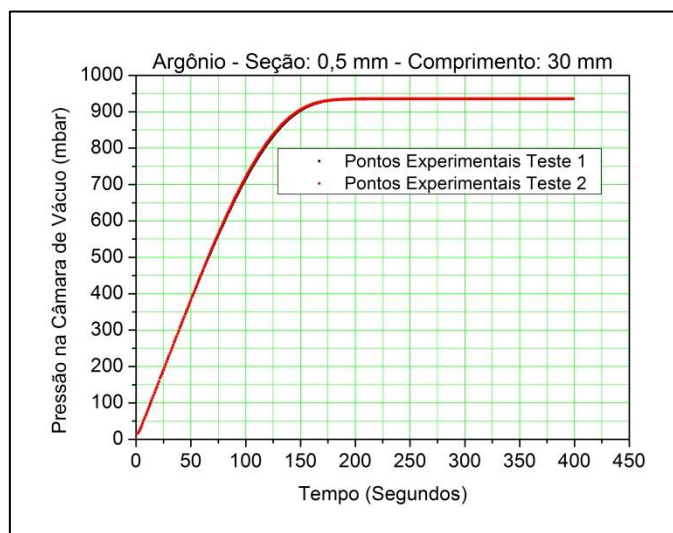


Gráfico 3: Curvas experimentais que geraram o gráfico 2.

Todos os outros experimentos tiveram um comportamento semelhante.

As dimensões dos capilares tem grande influência na passagem do gás entre as câmaras, já que estes são os elementos que mais opõem resistência a esta passagem. Uma maneira de sistematizar o estudo desta influência neste trabalho é fixar dois parâmetros, por exemplo, o tipo de gás e o diâmetro enquanto o comprimento é variado. Os gráficos seguintes retratam esta situação.

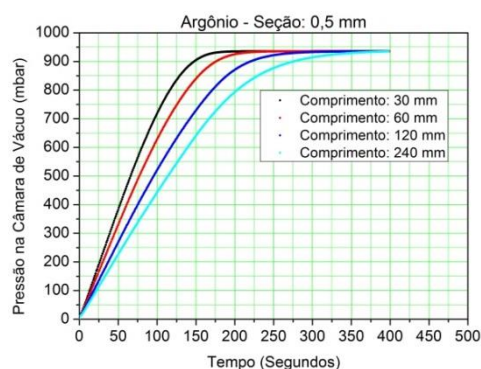


Gráfico 4: Pressão X tempo para o gás Ar, 0,5 mm de  $\phi$ .

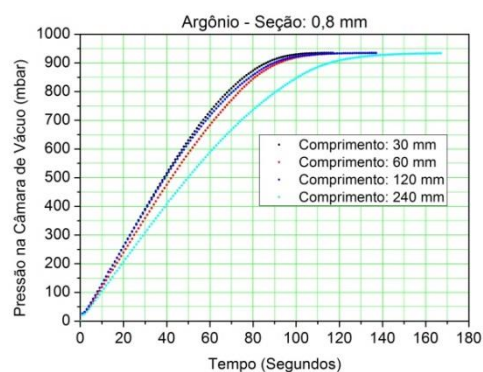


Gráfico 5: Pressão X tempo para o gás Ar, 0,8 mm de  $\phi$ .

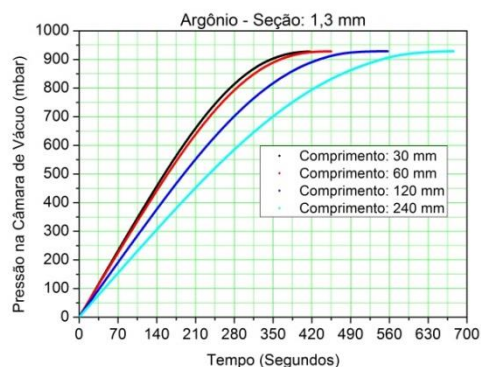


Gráfico 7: Pressão X tempo para o gás Ar, 1,3 mm de  $\phi$ .

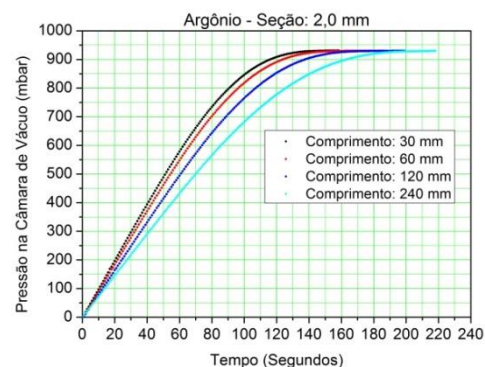


Gráfico 6: Pressão X tempo para o gás Ar, 2,0 mm de  $\phi$ .

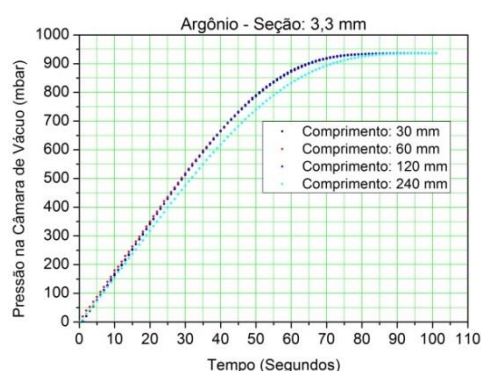


Gráfico 8: Pressão X tempo para o gás Ar, 3,3 mm de  $\phi$ .

À medida que o diâmetro do capilar cresce, as curvas parametrizadas com os comprimentos tendem a aproximar-se, formando um único aglomerado. Nota-se que o volume da câmara de vácuo na saída do capilar também tem influência, pois as curvas no capilar de 0,8 mm de diâmetro se aproximaram formando praticamente um único bloco; enquanto que as curvas do capilar de 1,3 mm de diâmetro voltam a separar-se. Cabe lembrar que os capilares de 0,5 mm e 0,8 mm foram utilizados na câmara de vácuo 2, menor volume, enquanto os outros capilares foram utilizados com câmara de vácuo 1, maior volume. Mas, independentemente do volume das câmaras de vácuo, os gráficos mostram que o diâmetro tem uma influência muito superior ao comprimento do capilar quando se trata da passagem de gás no regime de escoamento viscoso laminar.

Observa-se também que as curvas seguem uma sequência lógica, pois o capilar de comprimento 30 mm tem um maior coeficiente angular na região linear da curva,

indicando deste modo um *throughput* maior, enquanto nas outras curvas este coeficiente tende a diminuir à medida que o comprimento aumenta.

O mesmo comportamento é obtido na utilização do hélio no lugar do argônio, como pode ser visto nos próximos gráficos.

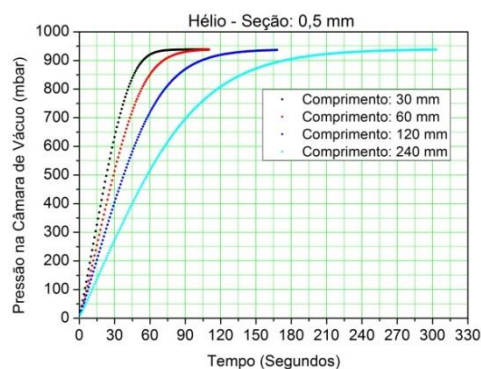


Gráfico 9: Pressão X tempo para o gás He, 0,5 mm de  $\phi$ .

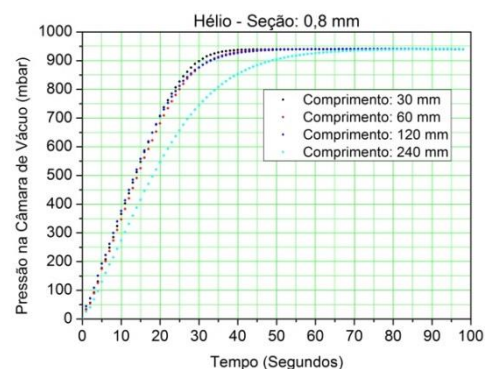


Gráfico 10: Pressão X tempo para o gás He, 0,8 mm de  $\phi$ .

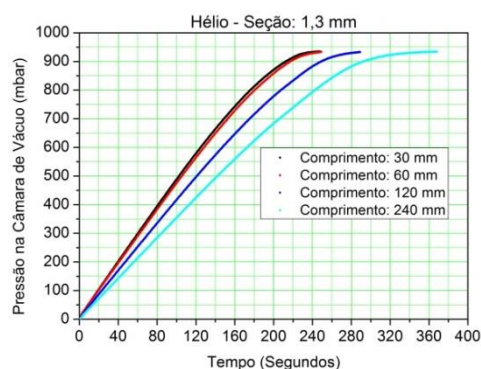


Gráfico 12: Pressão X tempo para o gás He, 1,3 mm de  $\phi$ .

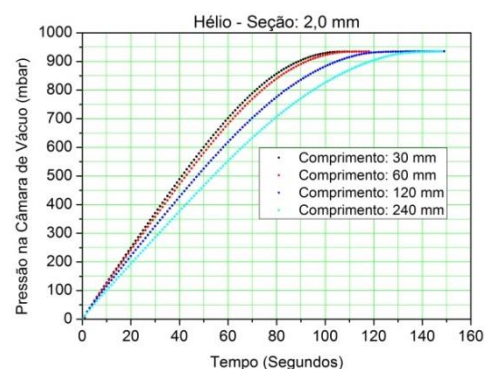


Gráfico 11: Pressão X tempo para o gás He, 2,0 mm de  $\phi$ .



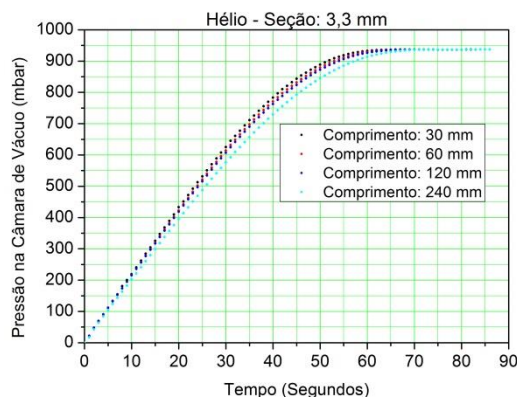


Gráfico 13: Pressão X tempo para o gás He, 3,3 mm de  $\phi$ .

Outro caso de estudo seria a fixação do comprimento e do tipo de gás enquanto o diâmetro do tubo é parametrizado nos gráficos. A desvantagem deste tipo de análise se encontra na diferença entre os volumes das câmaras de vácuo, já que curvas com mais de uma característica de diferença seriam comparadas no mesmo gráfico. Este problema não atrapalhou o caso de estudo anterior, pois os comprimentos não foram utilizados como parâmetro de escolha para a câmara de vácuo, somente o diâmetro. Por isso, neste tópico serão apresentados os gráficos separados também pelo volume da câmara de vácuo.

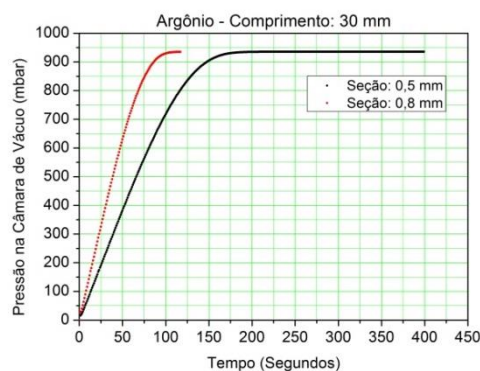


Gráfico 15: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento,  $CV_2$ .

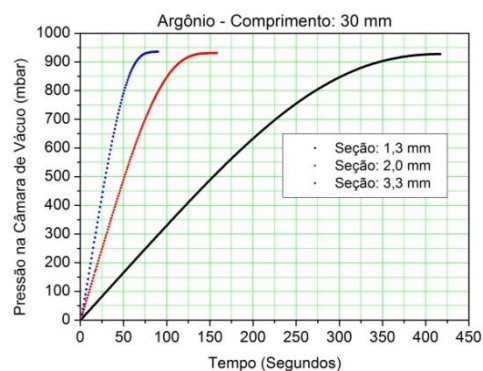


Gráfico 14: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento,  $CV_1$ .

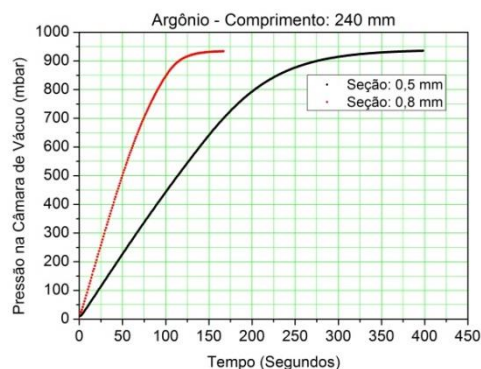


Gráfico 17: Pressão X tempo para o gás Ar, 240 mm de comprimento, CV<sub>2</sub>.

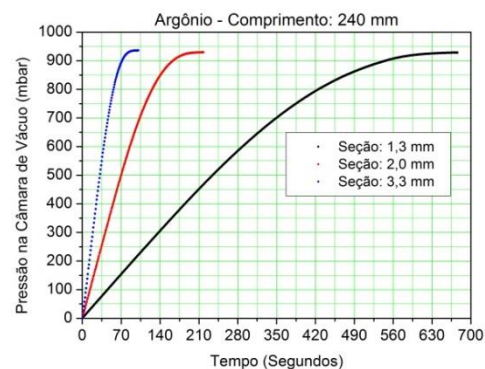


Gráfico 16: Pressão X tempo para o gás Ar, 240 mm de comprimento, CV<sub>1</sub>.

Como visto nos gráficos 14, 15, 16 e 17 alterar o comprimento de 30 mm para 240 mm pouco alterou o formato das curvas. Nestes gráficos a separação se deu pelo volume da câmara de vácuo utilizada; caso as curvas fossem plotadas no mesmo gráfico a sequencia não se seguiria de maneira lógica, como mostrado no gráfico 18.

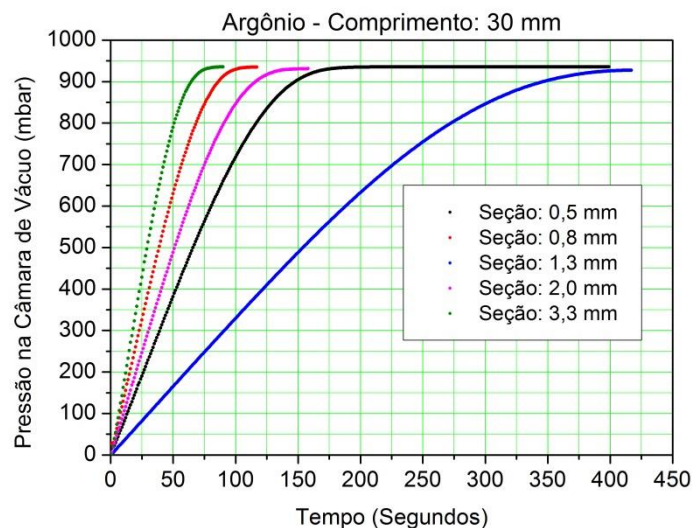


Gráfico 18: Pressão X tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento.

A última possibilidade de combinação dos resultados experimentais é a fixação do capilar enquanto comparamos os dois gases no mesmo gráfico. Os gráficos 19, 20,

21 e 22 mostram esta situação, neste caso escolheu-se o capilar de 1,3 mm de diâmetro, comportamento semelhante repetiu-se em todos os capilares.

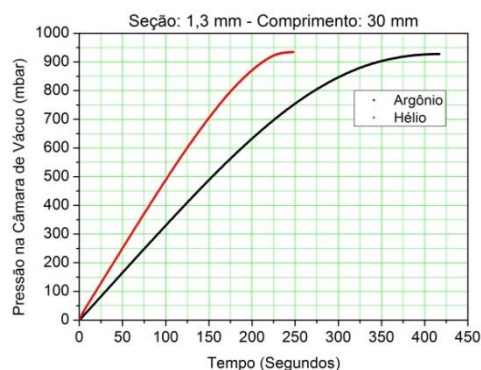


Gráfico 19: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 30 mm de comprimento e 1,3 mm de  $\phi$ .

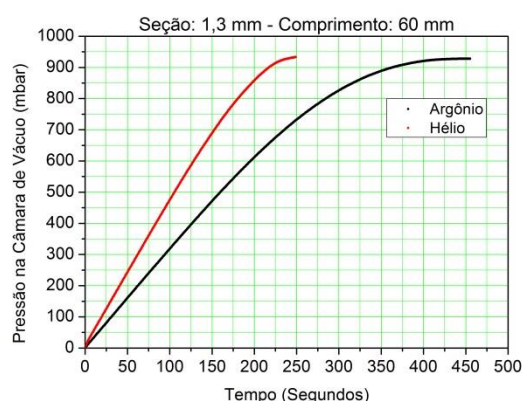


Gráfico 20: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 60 mm de comprimento e 1,3 mm de  $\phi$ .

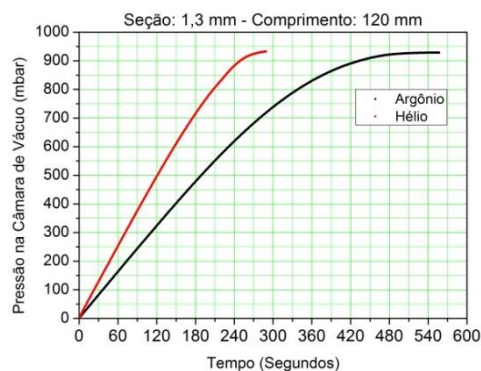


Gráfico 21: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 120 mm de comprimento e 1,3 mm de  $\phi$ .

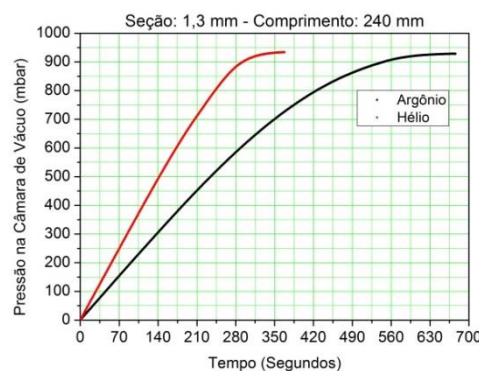


Gráfico 22: Pressão X tempo para os gases Ar e He, 240 mm de comprimento e 1,3 mm de  $\phi$ .

Observando-se estes gráficos vê-se claramente que o hélio tem uma facilidade maior de escoar através dos capilares, pois em todos os casos expostos o hélio atingiu primeiro a pressão atmosférica. Buscando na literatura a viscosidade dinâmica destes dois gases encontraram-se os valores de  $19,6 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}^{-1}$  para o hélio e  $22,11 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}^{-1}$  para o argônio. Estes valores condizem com os resultados obtidos experimentalmente, pois o argônio, por ter maior viscosidade, escoar mais lentamente, enquanto que o hélio que é menos viscoso escoar mais rapidamente.

## 4.1 Tratamento Matemático dos Resultados Experimentais

Após a coleta e análise parcial de todos os gráficos para verificação de alguma anormalidade, procedeu-se a o tratamento matemático dos gráficos obtidos através da experiência. Este tratamento baseia-se na caracterização do parâmetro da razão crítica,  $r_c$ , para os vários capilares e a realização do cálculo do *throughput* experimental nos mesmos, sempre comparando estes valores com a teoria vigente.

### 4.1.1 Razão Crítica

Existem algumas maneiras de se determinar até quando uma curva segue o comportamento linear. Uma delas seria através da 1ª derivada dos dados experimentais, pois a 1ª derivada de uma reta é uma constante, logo, enquanto a primeira derivada for constante a curva original segue o comportamento linear. O gráfico 24 mostra a primeira derivada da pressão em função do tempo.

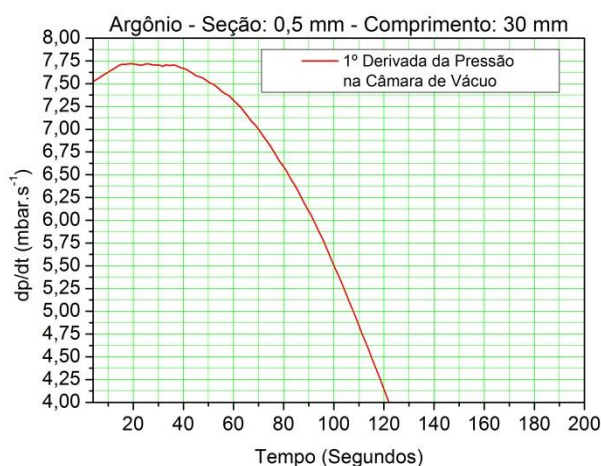


Gráfico 23: Derivada da pressão em função do tempo para o gás Ar, 30 mm de comprimento e 0,5 mm de  $\phi$

Este método é de simples execução, porém, a transição entre a região linear e a não linear não é abrupta, dificultando deste modo a decisão do local onde ocorre a passagem de uma para outra. Isto fica bem claro no gráfico 24, pois mesmo a região inicial não é completamente constante, há sempre uma pequena variação natural proveniente de pequenas variações ocorridas durante o experimento - esta flutuação dificulta a decisão de até onde a curva se mantém constante.

Outro modo de determinar esta transição seria ajustando a equação de uma reta aos pontos experimentais e observando a qualidade do ajuste por meio do coeficiente  $R^2$  que varia entre 0 e 1. O coeficiente  $R^2$  indica em termos percentuais o quanto o modelo ajustado consegue explicar os dados experimentais, quanto mais próximo a 1 melhor é o ajuste obtido. À medida que os pontos experimentais são adicionados à reta observa-se o valor da degradação do  $R^2$  e a partir desta degradação julga-se onde se encontra o último ponto da região linear da curva. A desvantagem neste método está estabelecer um valor aceitável da degradação do  $R^2$ , este valor deve ser coerente para todos os resultados experimentais e ser o mais próximo possível de 1; encontrar este valor seria de difícil execução.

Por fim, outra maneira de analisar o final da região linear das curvas pressão em função do tempo seria traçar uma reta aos pontos experimentais e julgar quando estes pontos começam a se afastar da reta desenhada. Esta técnica é de fácil execução e fornece a obtenção dos resultados de maneira rápida e segura. A desvantagem deste tipo de análise reside no fato de que ela depende muito da acuidade visual do observador e de seu discernimento, provavelmente dois observadores diferentes não teriam a mesma opinião sobre qual é o último ponto que segue a linearidade nestas curvas. Mas, como em todas as medidas físicas, a incerteza do resultado exato se faz presente, quantificar o quão importante é esta incerteza faz parte do processo como um todo e é tão importante quanto quantificar o valor em si. Neste trabalho, a incerteza será quantificada considerando um ponto acima e um ponto abaixo do ponto julgado como certo; esta maneira de fornecer o intervalo de confiança depende muito da densidade de pontos que há na curva, já que em curvas que contem muitos pontos o espaço entre estes será menor.

A figura 19 mostra como foi realizado o julgamento através do traçado de uma reta, o software utilizado para realizar esta tarefa foi o ORIGIN 8.5, que ainda conta

com o recurso de *zoom*, facilitando deste modo a análise. A partir desta imagem é possível observar que o tamanho dos pontos experimentais é o mínimo, evitando maiores erros de julgamento devido às dimensões dos pontos.

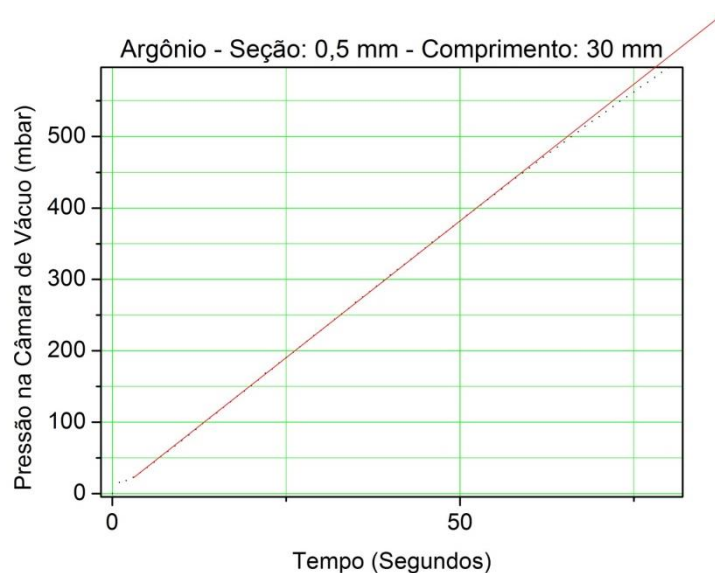


Figura 19: Procedimento para determinação da região linear das curvas pressão X tempo.

Utilizando esta técnica para determinação do último ponto da região linear é possível determinar o valor da razão crítica,  $r_c$ , para todos os capilares utilizados, verificando qual é a influência das dimensões dos capilares e da viscosidade dos gases. Os gráficos abaixo mostram como se comporta a razão crítica em função do comprimento do tubo.



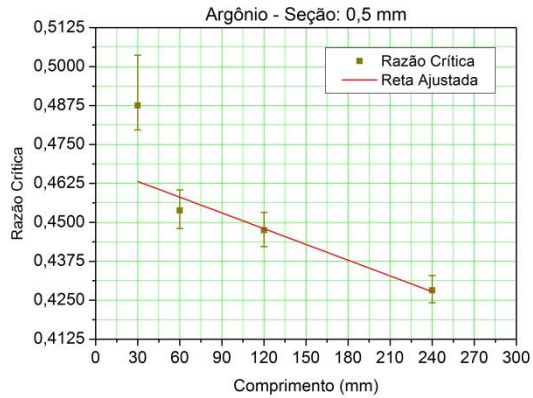


Tabela 9: Parâmetros da reta ajustada.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	2,69855		
4	Pearson's r	-0,93233		
5	Adj. R-Square	0,80385		
6			Value	Standard Error
7	Razão Crítica	Intercept	0,4682	0,00807
8		Slope	-1,68553E-4	4,62282E-5

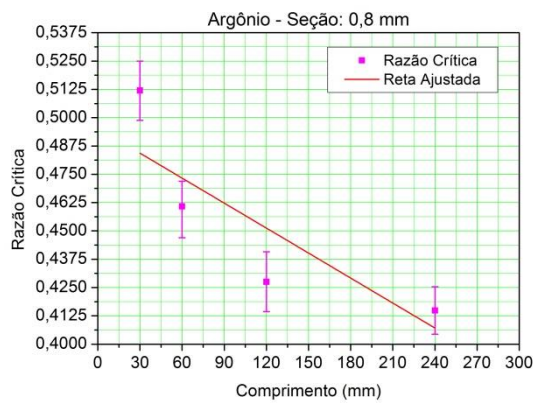
Gráfico 24:  $r_c$  X Comprimento para o gás Ar, 0,5 mm de  $\phi$ .

Tabela 10: Parâmetros da reta ajustada.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	9,54422		
4	Pearson's r	-0,86514		
5	Adj. R-Square	0,6227		
6			Value	Standard Error
7	Razão Crítica	Intercept	0,49537	0,02257
8		Slope	-3,67746E-4	1,50745E-4

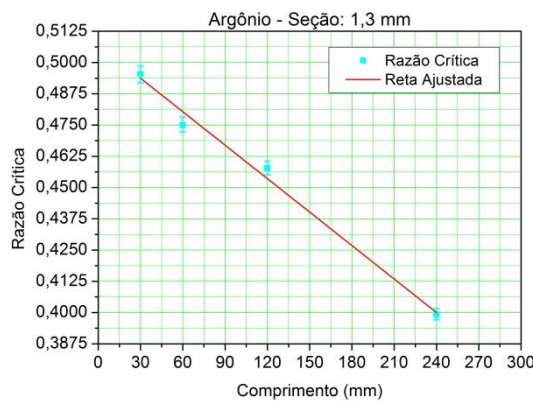
Gráfico 25:  $r_c$  X Comprimento para o gás Ar, 0,8 mm de  $\phi$ .

Tabela 11: Parâmetros da reta ajustada.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	5,41177		
4	Pearson's r	-0,99626		
5	Adj. R-Square	0,98879		
6			Value	Standard Error
7	Razão Crítica	Intercept	0,5071	0,00444
8		Slope	-4,46099E-4	2,73734E-5

Gráfico 26:  $r_c$  X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de  $\phi$ .

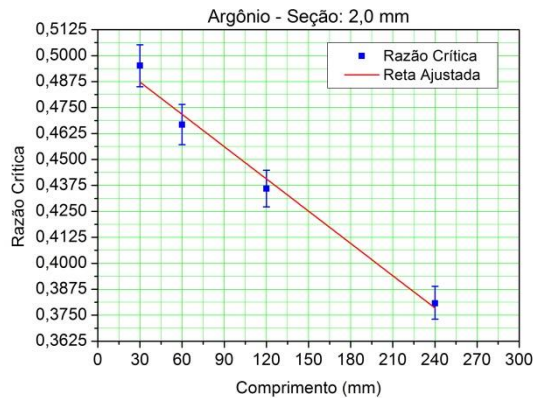


Gráfico 27:  $r_c$  X Comprimento para o gás Ar, 2,0 mm de  $\phi$ .

Tabela 12: Parâmetros da reta ajustada.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	1,23901		
4	Pearson's r	-0,99312		
5	Adj. R-Square	0,97944		
6			Value	Standard Error
7		Intercept	0,50282	0,00648
8	Razão Crítica	Slope	-5,18144E-4	4,31866E-5

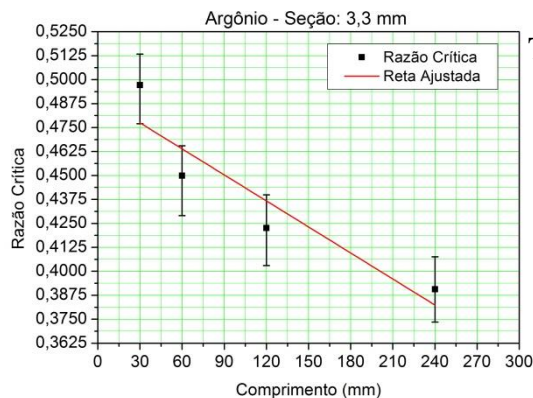


Gráfico 29:  $r_c$  X Comprimento para o gás Ar, 3,3 mm de  $\phi$ .

Tabela 13: Parâmetros da reta ajustada.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	3,2052		
4	Pearson's r	-0,92573		
5	Adj. R-Square	0,78546		
6			Value	Standard Error
7		Intercept	0,49104	0,01754
8	Razão Crítica	Slope	-4,52704E-4	1,30773E-4

Os gráficos da razão crítica em função do comprimento mostram que há certa tendência deste valor cair linearmente com o comprimento do tubo, as tabelas ao lado dos gráficos mostram as informações do ajuste efetuado, nota-se através destes dados que a qualidade do ajuste em alguns casos está bem próxima a 1 comprovando a tendência de queda linear. A função ajustada também fornece uma oportunidade de extrapolar o valor da razão crítica quando o comprimento do tubo tende à zero, aproximando-se de um orifício, este valor é representado nas tabelas pelo *intercept* considerando o valor da incerteza do ajuste, também fornecido nestas tabelas, vê-se que



a razão crítica tende a ser bem próxima ao valor teórico fornecido na tabela 4 (para um gás monoatômico). O comportamento mostrado para o argônio foi idêntico ao obtido para o hélio.

A influência da variação do diâmetro na razão crítica também pode ser estudada, o gráfico 30 mostra este caso, a partir dele nota-se que não há tendência identificável na razão crítica quando se altera a seção transversal do capilar, mostrando que as variações encontradas provem de erros aleatórios na escolha do último ponto da região linear.

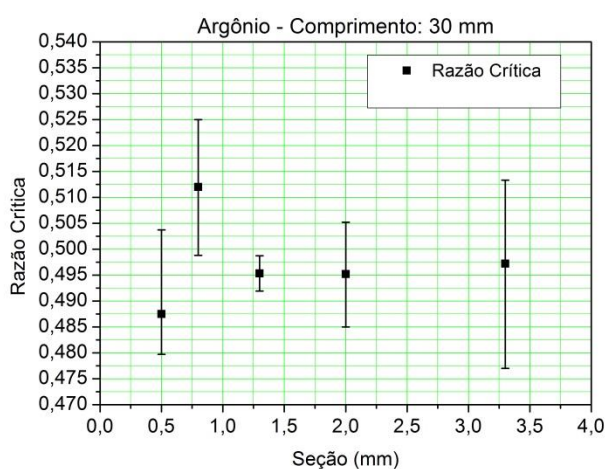


Gráfico 30:  $r_c$  X Diâmetro para o gás Ar, 30 mm de comprimento.

A última possibilidade de estudo para o parâmetro da razão crítica seria qual a influência que a viscosidade do gás exerce sobre a razão crítica; isto pode ser visto nos gráficos 31 e 32. A partir deles, é possível notar que, quando o comprimento do capilar é pequeno, a viscosidade do gás pouco influencia a razão crítica, visto que para ambos os gases a diferença entre os valores está dentro da incerteza. Mas, à medida que o comprimento do tubo aumenta, a viscosidade passa a exercer influência distanciando o comportamento dos dois gases.

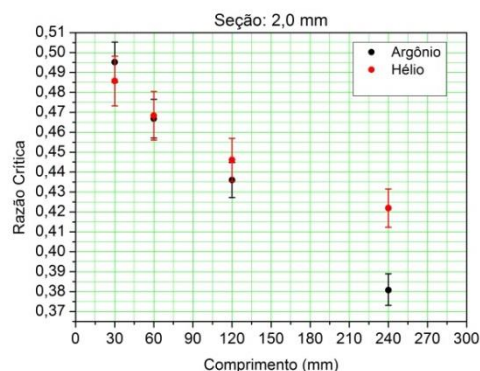


Gráfico 32:  $r_c$  X Comprimento para o gases Ar e He, 2,0 mm de  $\phi$ .

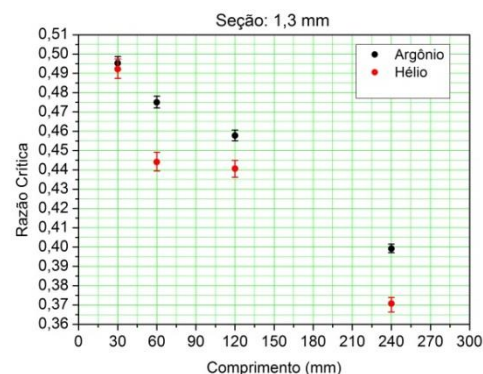


Gráfico 31:  $r_c$  X Comprimento para o gases Ar e He, 1,3 mm de  $\phi$ .

#### 4.1.2 Throughput

Da mesma maneira que o estudo da razão crítica foi estudado no tópico anterior, a análise de como se comporta o *throughput* de gases monoatômicos bloqueados pode ser realizado neste trabalho. Para realizar este estudo, serão utilizados os dados referentes a determinação dos volumes das câmaras de vácuo e da 1ª derivada da reta ajustada a região onde os pontos experimentais seguem uma reta; ao aplicar-se estes valores na equação 11 tem-se o valor do *throughput*.

O primeiro caso de estudo analisado será o de como se comporta o *throughput* quando mantemos o diâmetro do capilar e o tipo de gás fixos, enquanto variou-se o comprimento.

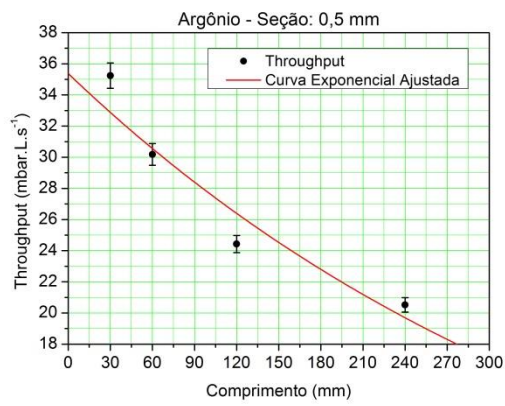


Tabela 14: Parâmetros da exponencial ajustada.

	A1(Y)	A2(Y)	A3(Y)	A4(Y)
1	Model	Exp2PMod1		
2	Equation	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$		
3	Reduced Chi-Sqr	12,3894		
4	Adj. R-Square	0,87997		
5			Value	Standard Error
6	Throughput	a	35,37818	2,52928
7	Throughput	b	-0,00244	5,16927E-4

Gráfico 33: Q X Comprimento para o gás Ar, 0,5 mm de  $\phi$ .

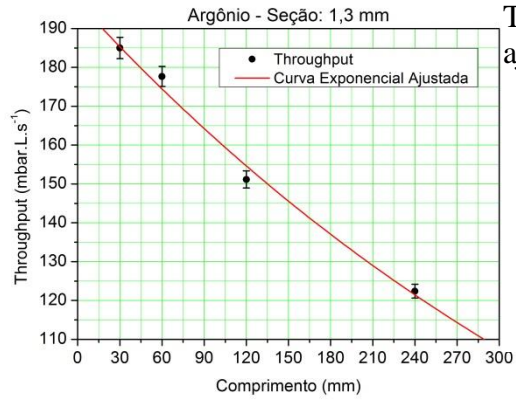


Tabela 15: Parâmetros da exponencial ajustada.

	A	B	C	D
1	Model	Exp2PMod1		
2	Equation	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$		
3	Reduced Chi-Sqr	2,15691		
4	Adj. R-Square	0,98746		
5			Value	Standard Error
6	Throughput	a	196,86543	3,6645
7	Throughput	b	-0,00201	1,34713E-4

Gráfico 34: Q X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de  $\phi$ .

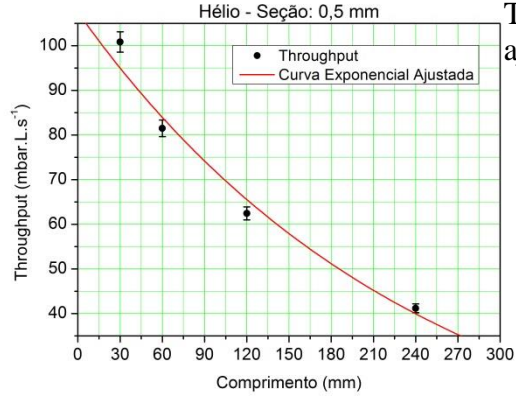


Tabela 16: Parâmetros da exponencial ajustada.

	A	B	C	D
1	Model	Exp2PMod1		
2	Equation	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$		
3	Reduced Chi-Sqr	7,22339		
4	Adj. R-Square	0,97326		
5			Value	Standard Error
6	Throughput	a	107,51058	5,80902
7	Throughput	b	-0,00413	4,05625E-4

Gráfico 35: Q X Comprimento para o gás He, 0,5 mm de  $\phi$ .

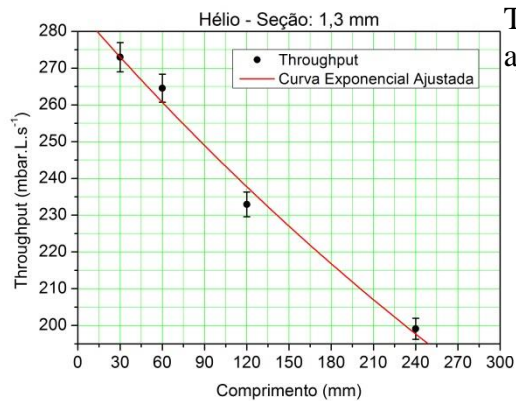


Tabela 17: Parâmetros da exponencial ajustada.

	A	B	C	D
1	Model	Exp2PMod1		
2	Equation	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$		
3	Reduced Chi-Sqr	1,64233		
4	Adj. R-Square	0,98395		
5			Value	Standard Error
6	Throughput	a	285,91242	4,58595
7	Throughput	b	-0,00154	1,16118E-4

Gráfico 36: Q X Comprimento para o gás Ar, 1,3 mm de  $\phi$ .

De acordo com os gráficos do *throughput* em função do comprimento do capilar tem-se uma queda exponencial do *throughput* à medida que o comprimento cresce. Para comprovar este fato ajustou-se uma curva exponencial aos dados experimentais e observou-se o valor de  $R^2$  das tabelas ao lado dos gráficos (adj. R-Square), observa-se que estes valores estão acima de 0,85 indicando deste modo boa qualidade de ajuste. As curvas ajustadas tem o formato,  $a \cdot e^{b \cdot x}$ , onde x é o comprimento do capilar, a e b são constantes, sendo que b é um número negativo, isto significa que à medida que o comprimento do capilar cresce o *throughput* tende a zero. Em contrapartida, extrapolando a curva para um tubo de comprimento zero, um orifício, o valor do *throughput* é igual a constante *a*. A tabela 18 compara o valor do *throughput* calculado através do modelo para orifícios com o valor obtido por extrapolação para todos os diâmetros de capilares.

Tabela 18: Comparação entre o *throughput* teórico e o *throughput* experimental para um orifício.

Diâmetro dos capilares (mm)	<i>Throughput</i> teórico (mbar.L.s <sup>-1</sup> )		<i>Throughput</i> obtido por extrapolação (mbar.L.s <sup>-1</sup> )	
	Argônio	Hélio	Argônio	Hélio
<b>0,5</b>	22,3	70,6	35,4 ± 2,5	107,5 ± 5,8
<b>0,8</b>	57	180,7	64,3 ± 3,6	184,4 ± 10,1
<b>1,3</b>	149,6	476	196,9 ± 3,7	285,9 ± 4,6
<b>2,0</b>	354,4	1125,8	576,9 ± 8,2	706,8 ± 11,3
<b>3,3</b>	971	3070	1024,5 ± 8,8	1212,5 ± 6,6

A partir da tabela 18 vê-se que alguns valores teóricos do *throughput* para orifícios mantem uma aderência muito boa com os valores obtidos por extrapolação, a partir dos resultados das curvas de *throughput* em função do comprimento; em contrapartida, outros resultados não convergiram tão bem. Como o cálculo do *throughput* experimental é feito de maneira muito direta, só depende da derivada temporal da pressão multiplicada pelo volume da câmara de vácuo que é preenchida pelo gás, grandezas estas que são muito bem determinadas, a possibilidade de erros no cálculo são reduzidas, mas mesmo com esta probabilidade pequena revisaram-se todos os resultados e nenhum desvio foi encontrado. Outra possibilidade de erro está no ajuste exponencial feito pelo programa ORIGIN, para verificar esta situação o EXCEL foi utilizado para verificar os resultados fornecidos pelo ORIGIN e não houve diferenças significativas nos resultados de ambos.

Observando as curvas de *throughput* em função do tempo para o capilar de 0,8 mm este apresentou um ponto que se distanciava muito do seguimento normal da curva, como pode se observar no gráfico 37. Procurando mais a fundo qual o motivo desta diferença, descobriu-se que, apesar de os tubos de 0,8 mm terem o mesmo diâmetro externo, a espessura da parede para os tubos de 120 mm e 240 é diferente do restante. Esta distinção não é visível a olho nu, sendo somente identificada com o auxílio de instrumentos ópticos. Esta diferença não foi observada para os outros diâmetros. Devido a este fato suprimiu-se os pontos referentes a estes comprimentos e ajustou-se uma reta

aos pontos que sobraram, os resultados obtidos para estes casos já foram substituídos na tabela 18 e são condizentes com os valores teóricos.

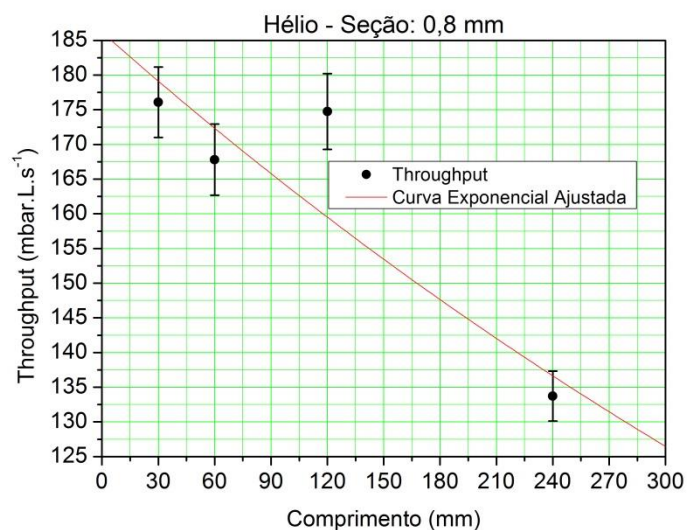


Gráfico 37: Q X Comprimento para o gás He, 0,8 mm de  $\phi$ .

A possibilidade de que o erro esteja no modelo utilizado também não foi descartado, o cálculo do *throughput* teórico é feito a partir da simplificação da expressão 20 para os gases argônio e hélio, isto é possível já que esta equação só relaciona constantes como a pressão à entrada do sistema com a área da seção transversal interna do capilar, que são valores conhecidos. A constante para o cálculo do *throughput* para o argônio é igual a 12,14 e para o hélio é 38,36. Para verificar se estes valores estavam corretos utilizou-se um aplicativo *online* para o cálculo do fluxo de gases rarefeitos monoatômicos em orifícios, este aplicativo foi disponibilizado pelo professor Dr. Felix Sharipov da Universidade Federal do Paraná e fornece o *throughput* a partir de alguns dados fornecidos pelo usuário, a figura 20 mostra este aplicativo. (8)

Os resultados fornecidos por este simulador estão representados na tabela 19.

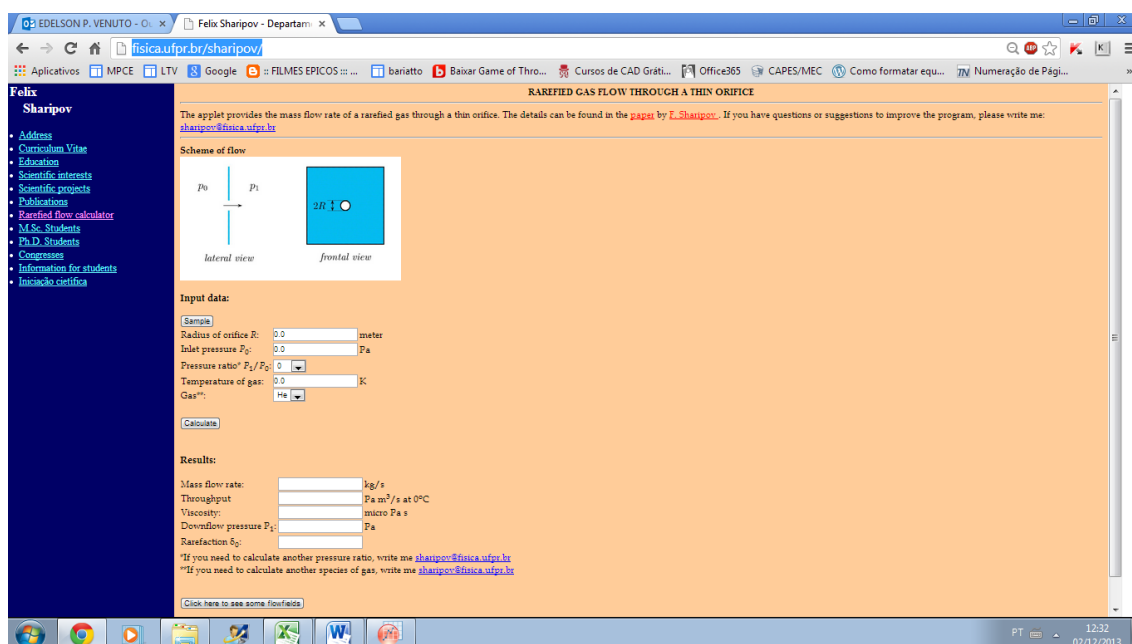


Figure 20: Simulador para cálculo de fluxo de gases rarefeitos (SHARIPOV, F. - Rarefied Gas Flow Through a Thin Orifice)

Tabela 19: Comparação entre o *throughput* simulado e o *throughput* experimental para um orifício.

Diâmetro dos capilares (mm)	<i>Throughput</i> simulador (mbar.L.s <sup>-1</sup> )		<i>Throughput</i> obtido por extrapolação (mbar.L.s <sup>-1</sup> )	
	Argônio	Hélio	Argônio	Hélio
0,5	25,6	81	35,4 ± 2,5	107,5 ± 5,8
0,8	65,6	207,3	64,3 ± 3,6	184,4 ± 10,1
1,3	173,3	547,4	196,9 ± 3,7	285,9 ± 4,6
2,0	410	1295	576,9 ± 8,2	706,8 ± 11,3
3,3	1117	3527	1024,5 ± 8,8	1212,5 ± 6,6

Os resultados obtidos através do simulador mostram certa diferença quando comparado ao valor obtido através de cálculos. Alguns valores representam bem os resultados experimentais, enquanto outras ainda há divergência. Apesar de a extrapolação de alguns dos valores dos resultados experimentais não convergirem para a



teoria estes valores serão considerados, pois cabe lembrar que todo o modelo segue algumas suposições para ser resolvido e é preciso verificar até onde os resultados modelados condizem com as condições experimentais executadas neste trabalho.

O segundo caso de estudo relaciona a variação do *throughput* em função da área da seção transversal interna dos capilares. Estas curvas são mostradas nos gráficos seguintes, comparando o fluxo dos dois gases, devido à diferença do diâmetro interna do capilar de 0,8 mm os pontos referentes a este diâmetro serão omitidos nos gráficos 40 e 41.

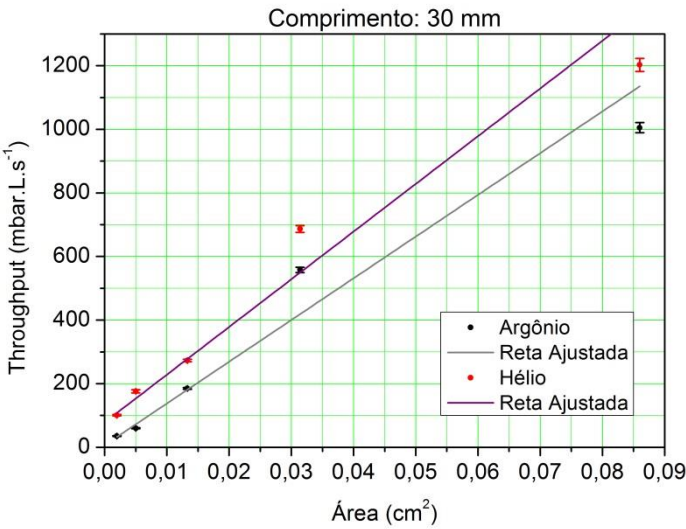


Gráfico 38: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 30 mm.

Tabela 21: Parâmetros da reta ajustada, argônio.

	A	B	C	D
1	Equation	y = a + b*x		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	435,09676		
4	Pearson's r	0,97783		
5	Adj. R-Square	0,94153		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	6,52226	10,12579
8		Slope	13122,54291	1622,58749

Tabela 20: Parâmetros da reta ajustada, hélio.

	A	B	C	D
1	Equation	y = a + b*x		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	255,14786		
4	Pearson's r	--		
5	Adj. R-Square	0,94687		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	78,31925	19,93051
8		Slope	15001,47548	1764,38461



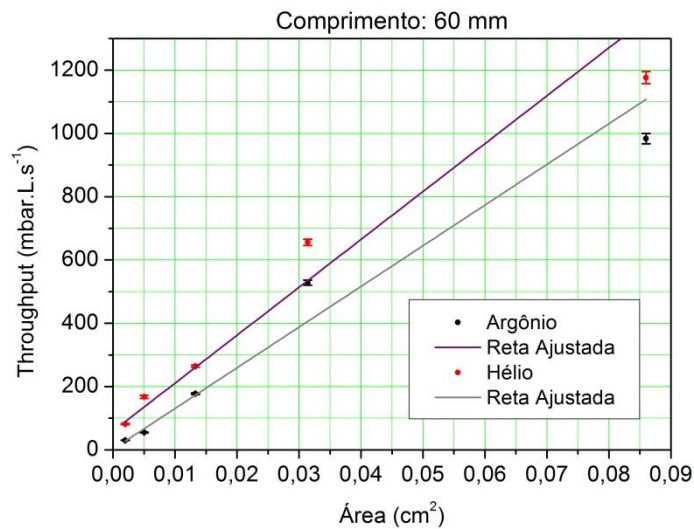


Gráfico 39: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 60 mm.

Tabela 22: Parâmetros da reta ajustada, argônio.

	A	B	C	D
1	Equation	y = a + b*x		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	397,34379		
4	Pearson's r	0,98012		
5	Adj. R-Square	0,9475		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	2,26889	8,62146
8		Slope	12854,09182	1502,45151

Tabela 23: Parâmetros da reta ajustada, hélio.

	A	B	C	D
1	Equation	y = a + b*x		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	303,34734		
4	Pearson's r	--		
5	Adj. R-Square	0,94823		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	59,45917	18,42159
8		Slope	15137,75936	1756,53527

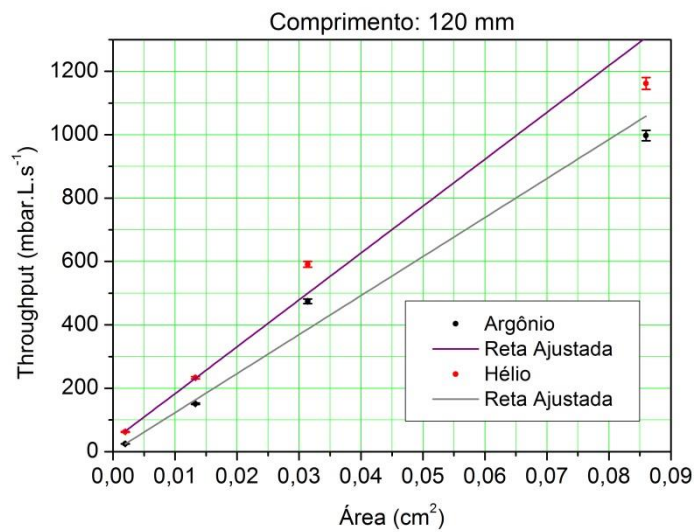


Gráfico 40: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 120 mm.

Tabela 25: Parâmetros da reta ajustada, argônio.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	192,03093		
4	Pearson's r	0,99057		
5	Adj. R-Square	0,97184		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	-0,0543	6,25195
8		Slope	12311,68221	1204,10449

Tabela 24: Parâmetros da reta ajustada, hélio.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	166,13237		
4	Pearson's r	--		
5	Adj. R-Square	0,97048		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	35,16954	13,88015
8		Slope	14788,27843	1481,58572

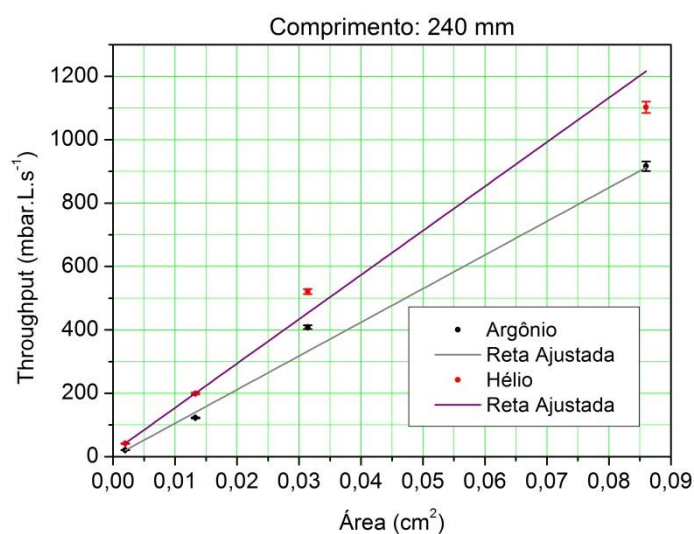


Gráfico 41: Q X Área para os gases Ar e He, comprimento de 240 mm.

Tabela 27: Parâmetros da reta ajustada, argônio.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	260,77189		
4	Pearson's r	0,9874		
5	Adj. R-Square	0,96243		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	-1,02794	6,14927
8		Slope	10620,76078	1203,63656

Tabela 26: Parâmetros da reta ajustada, hélio.

	A	B	C	D
1	Equation	$y = a + b \cdot x$		
2	Weight	Instrumental		
3	Residual Sum of Squares	113,07827		
4	Pearson's r	--		
5	Adj. R-Square	0,98193		
6			Value	Standard Error
7	Throughput	Intercept	14,35041	8,10174
8		Slope	13972,90641	1091,02742

Observando os gráficos apresentados nota-se que as curvas referentes aos gases hélio e argônio praticamente crescem paralelamente à medida que a área interna do capilar aumenta, para verificar esta condição ajustou-se os pontos experimentais a uma reta, obtendo coeficientes  $R^2$  acima de 0,9. Ao dividir os coeficientes angulares das retas

(*slope*) o valor encontrado é semelhante a razão da viscosidade entre os dois gases, mostrando que a equação que relaciona o *throughput* em função da área depende linearmente do coeficiente de viscosidade dos gases.

## 5. CONCLUSÃO

A utilização de tubos capilares como controladores de fluxo mostrou-se possível, pois tais dispositivos funcionam em uma larga faixa com o fluxo de gás bloqueado, ou seja, constante. As aplicações metrológicas também se mostram viáveis devido as grandes faixas que são possíveis de obter-se um fluxo constante, já que isto dependerá das dimensões do capilar, além de ser uma maneira simples, baseada em primeiros princípios e confiável para obter-se um *throughput* constante; podendo ser aplicada em laboratórios de pesquisa e centros industriais para a verificação da uniformidade de seus medidores de fluxo.

No quesito do valor da razão crítica para tubos, de acordo com os dados experimentais obtidos e posterior análise percebe-se certa tendência deste valor cair linearmente à medida que o comprimento da tubulação cresce, e quando se extrapola a reta ajustada para um tubo com comprimento zero (orifício) o valor obtido é semelhante ao fornecido pela literatura. Mas estes resultados não são universais, recomenda-se que tal fato seja comprovado trabalhando com uma quantidade maior de comprimentos para um mesmo diâmetro para verificar se esta tendência é verdadeira, para execução deste trabalho utilizou-se quatro comprimentos distintos para um mesmo diâmetro. O fato de os capilares de 0,8 mm terem diâmetros internos distintos não afeta o valor da razão crítica, pois como visto na comparação deste valor para vários diâmetros o tamanho da seção interna do tubo não influencia a razão crítica de pressão.

Quanto ao *throughput* obtido experimentalmente apesar de alguns valores conseguidos por extrapolação não condizerem com os resultados teóricos, os mesmos devem ser considerados, por se tratarem de um método de medição bastante direto e não terem sido identificadas as falhas para o cálculo destes valores. A variação linear do *throughput* em função da área mostra um importante fato quando a diferença encontrada entre os dois gases é semelhante à razão de viscosidade entre os gases estudados – argônio e hélio – adicionando um grau maior de confiança nos dados obtidos experimentalmente.

O fenômeno de escoamento compressível através de tubos mostrou-se extremamente interessante, visto as grandes aplicações para este fenômeno e o fato de existirem poucos resultados experimentais sobre o assunto. Fica a sugestão para trabalhos futuros a repetição destes experimentos para verificar se há convergência de valores e uma maior integração com os pesquisadores que trabalham com a teoria sobre este tema, para que haja um comprometimento entre ambas as áreas no tocante a verificação dos resultados de ambos.

## 6. REFERÊNCIAS

1. *A Ciência e a Tecnologia do Vácuo Resumo Histórico e Algumas Aplicações*. **Stempniak, Roberto A.** São José dos Campos : Sociedade Brasileira de Vácuo, 2002, p. 14.
2. **Moutinho, Augusto M. C., Silva, Maria Eugénia S. F. e Cunha, C. M. I. Maria Áurea.** *Tecnologia do Vácuo*. 1º. Lisboa : Universidade Nova de Lisboa, 1980. pp. 22-25. Vol. Único.
3. **Halliday, David, Resnick, Robert e Walker, Jearl.** *Fundamentals of Physics*. 9ª. Danvers : John Wiley & Sons, 2011. pp. 507-530. Vol. Único. 978-0-470-46908-8.
4. **Atkins, Peter e Paula, Julio de.** *Physical Chemistry*. 8ª. Oxford : Oxford University Press, 2006. pp. 14-22. Vol. Único. 9780198700722.
5. **Degasperi, Francisco Tadeu.** Modelagem e Análise Detalhadas de Sistemas de Vácuo. *Dissertação de Mestrado*. [Documento]. Campinas : s.n., 2002. pp. 32-33.
6. **Livesey, R. Gordon, et al., et al.** *Foundations of Vacuum Science and Technology*. [ed.] J. M. Lafferty. 2ª. New York : John Wiley & Sons, 2012. pp. 116-121. 0-471-17593-5.
7. **Arakawa, Rodrigo.** *CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO PRIMÁRIO DE VÁCUO PELO MÉTODO DE EXPANSÃO ESTÁTICA*. São Paulo : s.n., 2013. pp. 71-90.
8. **Sharipov, Felix.** Rarefied Gas Flow Through a Thin Orifice. [Online] Universidade Federal do Paraná. [Citado em: 30 de 12 de 2013.] <http://fisica.ufpr.br/sharipov/>.