

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

**JOHNES SOARES SANTOS**

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

**SÃO PAULO**

**2013**

**JOHNES SOARES SANTOS**

**MODELAGEM E MEDIÇÃO DE CONDUTÂNCIAS NO REGIME DE  
ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR COM GASES DIATÔMICOS  
E POLIATÔMICOS 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,  
pelo incentivo e cooperação.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha família, por me encorajar e dar o suporte necessário para alcançar os meus objetivos. A todos os meus amigos, por me fornecerem momentos de alegria e palavras de motivação. Aos integrantes do Laboratório de Tecnologia do Vácuo, que de algum modo colaboraram no desenvolvimento do meu trabalho, especialmente à Alan Ribeiro e Edelson Venuto. Aos meus professores, por terem contribuído em minha jornada acadêmica fornecendo a base da minha formação. A empresa PV Prest Vácuo e ao Laboratório de Integração e Testes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo empréstimo de equipamentos aplicados no desenvolvimento do trabalho. E por fim, agradeço ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, por ter visto em minha pessoa, alguém capaz de confiar o seu trabalho e dedicação, com orientação e apoio.

***“Eu não tenho ídolos. Tenho admiração por trabalho, dedicação e competência.” Ayrton Senna***

## I. RESUMO

O desenvolvimento de tecnologias, independente da sua área de aplicação, tem se mostrado cada vez mais intenso e significativo no que se diz respeito à evolução da sociedade. A tecnologia do vácuo, por sua vez, atendendo tanto o setor industrial quanto o de pesquisas demonstra um constante crescimento no incentivo e no estudo do escoamento de gases e de ambientes com atmosfera controlada. Além disso, tem grande papel no aperfeiçoamento de dispositivos e métodos metrológicos que garantam qualidade e confiança no monitoramento e na medição dentro dos experimentos e processos realizados.

Desse modo, o controle da injeção de gases em câmaras de um sistema e a determinação do fluxo destes utilizando, por exemplo, os conhecidos *mass flow meters* e *mass flow controllers* implicam na dependência de uma constante calibração destes equipamentos para garantir confiabilidade ao sistema em que são aplicados, uma vez que são dependentes de um aparato eletrônico e até da capacidade térmica dos gases (no caso do *mass flow meter*).

Sendo assim, este trabalho visa enriquecer o conhecimento até então existente sobre um fenômeno de escoamento compressível conhecido como escoamento bloqueado (*choked flow*). A importância do estudo deste se dá pelo fato dele garantir a condição de um *throughput* constante a partir de somente parâmetros físicos, implicando diretamente em um sistema natural e passivo. Diante desta situação, se tem o intuito de obter a caracterização de diversos tubos capilares (com diferentes diâmetros e comprimentos) que permitam naturalmente (sem a adição do embargo de um sistema eletrônico), realizar a calibração dos dispositivos mencionados acima, além de demonstrar o fenômeno a partir de dados experimentais, enriquecendo a sua teoria. Considerando a realização do estudo para um gás diatômico (nitrogênio) e um gás poliatômico (dióxido de carbono).

Com os dados obtidos, observa-se que variando os parâmetros de comprimento e diâmetro dos capilares, à medida que são diminuídos, os pontos encontrados graficamente, conhecidos como razão de pressão crítica, característicos por limitar a região de escoamento bloqueado, aproximam-se cada vez mais do modelo teórico utilizado e proposto para o fluxo através de um orifício.

## II. ABSTRACT

The development of technologies, regardless of the application area, has become ever more intense and meaningful as it relates to the evolution of society. The vacuum technology, in turn, having both the industry and the research area demonstrates a steady growth in the study at gases flow and controlled atmospheres. Moreover, it has great role in improving metrological devices and methods to ensure quality and reliability in the monitoring and measurement within the experiments and processes conducted .

Thus , control of the gas injection in chambers of a system and the determination of the flux using, for example, the known mass flow meters and mass flow controlers means in dependence on a constant calibration to ensure reliability of such equipment in the system that are applied since they are dependent to an electronic apparatus and the thermal gas capacity (in the case of mass flow meter).

Thus, this work aims to enhance the knowledge hitherto existing over a compressible flow phenomenon known as choked flow. The importance of this study is partly because it guarantee the condition of a constant throughput from only physical parameters, resulting directly in a natural and passive system. In this situation, it is intended to obtain the characterization of many capillary tubes (with different diameters and lengths) allowing naturally (without the addition of an electronic system), make the calibration of the devices mentioned above, in addition to demonstrating the phenomenon from experimental data, enriching his theory. Whereas the study with a diatomic gas (nitrogen) and a polyatomic gas (carbon dioxide).

With the data obtained, it is observed that varying the parameters of length and diameter of the capillaries, as are diminished, the points found graphically known as critical pressure ratio, characteristic for limiting the region of choked flow, are close to the theoretical model used and proposed for flow through an orifice.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ISOTERMAS PARA UM GÁS REAL E PARA UM GÁS DE VAN DER WAALS [9].....	20
FIGURA 2: ESQUEMA REPRESENTATIVO DO REGIME DE ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR [6]. .....	21
FIGURA 3: FONTES DOS PROCESSOS DE DESGASEIFICAÇÃO [6]. .....	26
FIGURA 4: ASSOCIAÇÃO DE CONDUTÂNCIAS EM SÉRIE[2]. .....	27
FIGURA 5: ASSOCIAÇÃO DE CONDUTÂNCIAS EM PARALELO[2]. .....	28
FIGURA 6: SISTEMA ONDE O FLUXO ESCOA DE UMA TUBULAÇÃO COM DIÂMETRO MAIOR PARA UMA TUBULAÇÃO COM DIÂMETRO MENOR PASSANDO POR UM ORIFÍCIO [2]. .....	30
FIGURA 7: 3 GRAUS DE LIBERDADE PARA UM GÁS MONOATÔMICO – ARGÔNIO[11]. .....	31
FIGURA 8: MOVIMENTOS: TRANSLACIONAL (A), ROTACIONAL (B) E OSCILATÓRIO (C), PARA UM GÁS DIATÔMICO – NITROGÊNIO [11]. .....	31
FIGURA 9: CURVA DE $C_v/R$ EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA UM GÁS DIATÔMICO – $H_2$ [7]. .....	32
FIGURA 10: VAZÃO MÁSSICA EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE PRESSÃO [10]. .....	34
FIGURA 11: DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.....	38
FIGURA 12: FOTO DO ARRANJO EXPERIMENTAL UTILIZADO. ....	39
FIGURA 13: LIMPEZA DE TUBOS DE CONDUTÂNCIAS A SEREM ESTUDADAS. ....	40
FIGURA 14: DISPOSITIVO PORTA CAPILARES, À ESQUERDA DESMONTADO REVELANDO A ESTRUTURA INTERNA DE VEDAÇÃO COM O'RINGS E À DIREITA ILUSTRANDO O CONJUNTO MONTADO PARA INSTALAÇÃO.....	41
FIGURA 15: À ESQUERDA OS TUBOS DE PVC ONDE SÃO ARMAZENADOS OS CAPILARES E À DIREITA OS PRÓPRIOS TUBOS ORGANIZADOS SEGUNDO OS DIÂMETROS INTERNOS. ....	41
FIGURA 16: À ESQUERDA A CABEÇA SENSORA DO MANÔMETRO E À DIREITA O MULTÍMETRO. ....	43
FIGURA 17: CÂMARA DE VOLUME PADRÃO ( $V_I$ ). .....	89
FIGURA 18: CÂMARA DE VOLUME MENOR ( $V_{CV1}$ ). .....	89
FIGURA 19: CÂMARA DE VOLUME MAIOR ( $V_{CV2}$ ). .....	90
FIGURA 20: SISTEMA COMPLETO ( $V_I+V_{CV1}+V_{CV2}$ ). .....	90
FIGURA 21: DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.....	91

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 VALORES DAS CONSTANTES 'A' E 'B' DE UM GÁS DE VAN DER WAALS PARA OS GASES HE, AR, N <sub>2</sub> E CO <sub>2</sub> [1].	19
TABELA 2 RELAÇÃO DO NÚMERO DE KNUDSEN COM OS REGIMES DE ESCOAMENTO [2].	22
TABELA 3: RELAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS COM OS REGIMES DE ESCOAMENTO [2].	23
TABELA 4: COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DE ALGUNS GASES [1].	29
TABELA 5: CALORES ESPECÍFICOS MOLARES A VOLUME E PRESSÃO CONSTANTE E COEFICIENTE K [8].	35
TABELA 6: RELAÇÕES CRÍTICAS DE PRESSÃO, DE MASSA ESPECÍFICA, E DE TEMPERATURA PARA ESCOAMENTOS ISENTRÓPICOS DE GASES IDEAIS [10].	36
TABELA 7: DIMENSÕES DOS CAPILARES UTILIZADOS.	44
TABELA 8: RAZÕES DE PRESSÃO CRÍTICAS DETERMINADAS.	65
TABELA 9: <i>THROUGHPUTS</i> DETERMINADOS.	83
TABELA 10: DADOS EXPERIMENTAIS.	92
TABELA 11: VOLUMES DETERMINADOS.	92

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: CURVAS EXPERIMENTAIS DOS TESTES 1 E 2 PARA A VARIAÇÃO DE PRESSÃO NO TEMPO UTILIZANDO UM CAPILAR DE $D = 0,5$ MM E $L = 30$ MM PARA O ESCOAMENTO COM GÁS NITROGÊNIO.....	45
GRÁFICO 2: CURVA MÉDIA ENTRE OS TESTES 1 E 2 PARA A VARIAÇÃO DE PRESSÃO NO TEMPO UTILIZANDO UM CAPILAR DE $D = 0,5$ MM E $L = 30$ MM PARA O ESCOAMENTO COM GÁS NITROGÊNIO E DETALHE DE ZOOM PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS EXPERIMENTAIS. ....	46
GRÁFICO 3: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $\phi = 0,5$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	47
GRÁFICO 4: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $\phi = 0,8$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	47
GRÁFICO 5: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 1,3$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	48
GRÁFICO 6: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 2,0$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	48
GRÁFICO 7: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 3,3$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	49
GRÁFICO 8: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $\phi = 0,5$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	49
GRÁFICO 9: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $\phi = 0,8$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	50
GRÁFICO 10: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 1,3$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	50
GRÁFICO 11: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 2,0$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	51
GRÁFICO 12: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $\phi = 3,3$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	51
GRÁFICO 13: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 30$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	53
GRÁFICO 14: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 30$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	53
GRÁFICO 15: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 60$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	54
GRÁFICO 16: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 60$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	54
GRÁFICO 17: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 120$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	55
GRÁFICO 18: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 120$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	55
GRÁFICO 19: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 240$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	56
GRÁFICO 20: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 240$ MM; GÁS = $N_2$ . ....	56
GRÁFICO 21: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 30$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	57
GRÁFICO 22: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 30$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	57
GRÁFICO 23: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 60$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	58
GRÁFICO 24: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 60$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	58
GRÁFICO 25: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 120$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	59
GRÁFICO 26: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 120$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	59
GRÁFICO 27: CURVAS $P_{CV1}$ (TEMPO); $L = 240$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	60
GRÁFICO 28: CURVAS $P_{CV2}$ (TEMPO); $L = 240$ MM; GÁS = $CO_2$ . ....	60

GRÁFICO 29: CURVAS $P_{CV}(\text{TEMPO})$ ; $L = 240 \text{ MM}$ ; GÁS = $\text{CO}_2$ .....	61
GRÁFICO 30: CURVAS $P_{CV1}(\text{TEMPO})$ ; $L = 30 \text{ MM}$ ; $D = 0,5 \text{ MM}$ ; GASES = $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	62
GRÁFICO 31: CURVAS $P_{CV2}(\text{TEMPO})$ ; $L = 30 \text{ MM}$ ; $D = 3,3 \text{ MM}$ ; GASES = $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	63
GRÁFICO 32: REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE RAZÃO DE PRESSÃO CRÍTICA. ....	64
GRÁFICO 33: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,5 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	66
GRÁFICO 34: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,8 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	66
GRÁFICO 35: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 1,3 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	67
GRÁFICO 36: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 2,0 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	67
GRÁFICO 37: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 3,3 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	67
GRÁFICO 38: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,5 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	68
GRÁFICO 39: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,8 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	68
GRÁFICO 40: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 1,3 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	68
GRÁFICO 41: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 2,0 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	69
GRÁFICO 42: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 3,3 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	69
GRÁFICO 43: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,5 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	70
GRÁFICO 44: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 0,8 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	71
GRÁFICO 45: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 1,3 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	71
GRÁFICO 46: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 2,0 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	71
GRÁFICO 47: RC EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO – $D = 3,3 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ E $\text{N}_2$ .....	72
GRÁFICO 48: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 30 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	73
GRÁFICO 49: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 60 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	73
GRÁFICO 50: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 120 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	74
GRÁFICO 51: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 240 \text{ MM}$ – $\text{N}_2$ .....	74
GRÁFICO 52: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 30 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	75
GRÁFICO 53: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 60 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	75
GRÁFICO 54: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 120 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	76
GRÁFICO 55: RC EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO – $L = 240 \text{ MM}$ – $\text{CO}_2$ .....	76
GRÁFICO 56: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS $\text{N}_2$ $D = 0,5 \text{ MM}$ . .....	77
GRÁFICO 57: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS $\text{N}_2$ $D = 0,8 \text{ MM}$ . .....	78
GRÁFICO 58: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS $\text{N}_2$ $D = 1,3 \text{ MM}$ . .....	78

GRÁFICO 59: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS N <sub>2</sub> D = 2,0 MM. .....	79
GRÁFICO 60: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS N <sub>2</sub> D = 3,3 MM. .....	79
GRÁFICO 61: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS CO <sub>2</sub> D = 0,5 MM. ....	80
GRÁFICO 62: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS CO <sub>2</sub> D = 0,8 MM. ....	80
GRÁFICO 63: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS CO <sub>2</sub> D = 1,3 MM. ....	81
GRÁFICO 64: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS CO <sub>2</sub> D = 2,0 MM. ....	81
GRÁFICO 65: THROUGHPUT EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO PARA O GÁS CO <sub>2</sub> D = 3,3 MM. ....	82

## Sumário

1. Introdução.....	14
1.1. Objetivos.....	14
1.2. Contextualização da tecnologia do vácuo .....	14
2. <i>Bases teóricas</i> .....	17
2.1. Noções do estado gasoso da matéria .....	17
2.2. Regime de escoamento viscoso laminar .....	20
2.3. Livre caminho médio e número de Knudsen .....	21
2.4. Número de Reynolds .....	22
2.5. <i>Throughput</i> .....	23
2.6. Velocidade de bombeamento .....	23
2.7. Desgaseificação .....	25
2.8. Condutância .....	26
2.8.1. Condutância em um tubo de seção circular.....	28
2.8.2. Condutância em um orifício de seção circular .....	29
2.9. Moléculas diatômicas e poliatômicas.....	30
2.10. Escoamento bloqueado .....	32
3. <i>Procedimentos experimentais e análise de dados</i> .....	37
3.1. Arranjo experimental .....	37
3.2. Condicionamento e limpeza do sistema .....	39
3.3. Determinação de parâmetros fundamentais de ajuste .....	41
3.4. Processo de medição e colhimento dos dados .....	42
3.5. Análise dos dados.....	44
4. <i>Conclusões e perspectivas futuras</i> .....	85
5. <i>Referências bibliográficas</i> .....	87
6. <i>Apêndices</i> .....	88
APÊNDICE A: Determinação dos volumes das câmaras de vácuo utilizadas no trabalho por meio do método experimental de expansão estática de Boyle-Mariotte .....	88

# 1. Introdução

## 1.1. *Objetivos*

Este trabalho objetiva estudar o fenômeno de escoamento bloqueado para o fluxo gasoso em tubulações capilares com diferentes comprimentos e diâmetros internos, considerando como gases do sistema o nitrogênio e o dióxido de carbono a fim de estabelecer uma análise comparativa com o modelo teórico vigente que aborda o escoamento em orifícios para gases ideais, ou seja, não considera o efeito da viscosidade do gás que é bastante pronunciado à medida que se aumenta o comprimento do capilar.

Ainda, visa aprimorar o método de colhimento dos dados a partir de uma plataforma eletrônica de obtenção e transferência automática dos dados implementada no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV) recentemente, a fim de aumentar a confiabilidade atrelada aos dados, eliminando erros de medição do usuário.

Também, busca-se parametrizar os capilares analisados, no intuito de estabelecer um meio simples, rápido e barato de se realizar a calibração de medidores de fluxo, tanto no ambiente industrial quanto laboratorial.

## 1.2. *Contextualização da tecnologia do vácuo*

A palavra vácuo é comumente utilizada no cotidiano para fazer referência ao vazio. Em uma corrida de fórmula 1 por exemplo, os competidores “aproveitam-se do vácuo” gerado pelos corredores a sua frente para realizar ultrapassagens. Se pararmos para pensar, esse assunto se torna uma problemática. Como imaginar e compreender um espaço sem matéria?

Essa questão desde a Antiguidade já era muito discutida e motivo de discórdia. Para o ser humano, acostumado com um dia a dia de objetos palpáveis e macroscópicos, a compreensão de algo invisível é muito complexa. Basta tomar como exemplo o entendimento de eletricidade, para muitos ela existe, pois permite que equipamentos exerçam uma funcionalidade, mas de fato

o que realmente a eletricidade é, acaba sendo um mistério. Com o vácuo não é muito diferente.

Diversas teorias foram elaboradas e derrubadas na tentativa de definir o vácuo como um espaço onde não existe absolutamente nenhuma partícula, ou seja, não há matéria. No entanto, essa ideia de “vácuo perfeito” como qualquer outra idealização é complexa de se obter na prática. Então, com o decorrer dos estudos, o vácuo passou a ter uma abordagem mais palpável ao entendimento do ser humano: a partir de um conceito físico, o vácuo seria definido como uma pressão qualquer abaixo da pressão atmosférica no nível do mar (760 Torr ou 1 atm ou ainda  $10^3$  mbar).

A partir dessa determinação o entendimento de vácuo foi facilitado, mas quantas unidades de pressão abaixo da atmosférica são necessárias para se considerar ambiente de vácuo? Apenas uma mínima variação já seria o suficiente? Para resolver esse questionamento o padronizado foi estabelecer classificação dos níveis de vácuo de acordo com faixas de pressão. Desse modo, considera-se o primeiro nível de vácuo a faixa para pressões desde a atmosférica (760 Torr) até a pressão de 1 Torr como sendo a faixa da pressão atmosférica. Abaixo dessa faixa, variando de 1 Torr a  $10^{-12}$  Torr os níveis de pré-vácuo, alto-vácuo, ultra-alto vácuo e extremo-alto vácuo é que são estipulados.

Historicamente a aplicação do vácuo já foi observada no século III (a.C.) em Alexandria, onde realizavam um processo semelhante a metodologia de embalagem de produtos alimentícios em recipientes de vidro na atualidade. Na época, aqueciam água em um recipiente e na sequência rapidamente o vedavam, de forma a produzir pressões menores do que a atmosférica em seu interior devido à posterior diminuição da temperatura.

Outro exemplo histórico se dá as produções de Torricelli, o famoso aluno de Galileu que seguiu com os estudos de seu mentor sobre pressão. Torricelli estudou a capacidade de a pressão atmosférica variar e equilibrar uma coluna de água, sendo que depois observou a mesma proporção de variação com a substituição da água pelo mercúrio. Ainda, de acordo com a mesma variação da altura a qual o líquido era equilibrado determinada por Torricelli, Pascal verificou que a pressão variava de acordo com a altitude, realizando suas observações em uma medição no pico e outra no cume de uma montanha. Esse experimento

determinou um método de medição muito utilizado até hoje: a medição de pressão com colunas de mercúrio.

Atualmente a aplicação da tecnologia do vácuo se dá em vários segmentos da indústria, em trabalhos de pesquisa e laboratórios. Apesar de não se produzir um vácuo ideal o vácuo até então feito é suficientemente capaz de suprir diversas necessidades. Para se ter uma noção da empregabilidade do vácuo, cerca de 70% de suas aplicações ocorrem na faixa conhecida como pré-vácuo, o mais simples de se conseguir em termos de bombeamento. Os outros 30% são distribuídos nas faixas de alto-vácuo, ultra-alto vácuo e extremo-alto vácuo. Algumas das aplicações atuais são: embalagem de produtos alimentícios, liofilização de alimentos e vacinas, metalização de componentes automotivos, metalização de vidros, processos nas indústrias eletrônica, farmacêutica e alimentícia, filtração, secagem, fabricação de lâmpadas, garrafas térmicas, lasers e células solares, desodorização de materiais, entre outros.

Basicamente um sistema de vácuo, industrial ou de pesquisa, é estabelecido por uma câmara de vácuo, uma linha de bombeamento, uma bomba de vácuo e componentes auxiliares (como manômetros, válvulas, filtros, foles metálicos...). Idealmente seria conveniente que a bomba de vácuo fosse acoplada diretamente na câmara de vácuo, a fim de se obter o melhor bombeamento possível, visto que as maiores perdas se dão na linha de bombeamento. Sendo assim, o estudo da condutância se torna tão importante para o processo de melhoria e desenvolvimento dos sistemas de vácuo, já que na maioria das vezes a bomba não pode ser acoplada junto à câmara.

## **2. Bases teóricas**

Para se compreender um sistema de vácuo é de fundamental importância conhecer as leis físicas que regem o comportamento de um gás, já que este é a matéria do volume e será bombeado a fim de se diminuir a pressão no interior do sistema. Além disso, a pressão influencia diretamente no tipo de escoamento do gás, de modo que para o estudo de qualquer situação as variáveis envolvidas em um processo de bombeamento acabam sendo o ponto de partida e, portanto serão discutidas na sequência.

De um modo geral, os parâmetros que definem o estudo de um sistema de vácuo correspondem aos fundamentos que regem o comportamento da matéria do sistema com a sua estrutura. Desse modo, as grandezas que estipulam o estado de um gás, a forma de seu movimento e a interação entre as partículas (sejam entre moléculas do próprio gás ou entre as moléculas do gás e as moléculas da estrutura das peças) serão os pontos de apoio para justificar os estudos abordados.

### **2.1. Noções do estado gasoso da matéria**

O estado gasoso da matéria é definido pelas características de possuir volume e forma do recipiente que ocupa e ser compressível. Tratando-se das partículas caracteriza-se por ter forças intermoleculares fracas que permitem grande distanciamento entre elas. Do ponto de vista do movimento do gás é definido por uma trajetória aleatória e caótica dos átomos ou das moléculas. No entanto, para melhor caracterizá-lo é necessário aprofundar um pouco os conhecimentos sobre teoria cinética dos gases para entender a influência de algumas variáveis em seu comportamento.

Basicamente, para a maioria das situações envolvidas em vácuo é interessante conhecer duas equações matemáticas de estado. A primeira delas, que atende a maioria dos processos, dita o comportamento ideal dos gases (gases perfeitos), é uma síntese das leis de Gay-Lussac, de Avogadro, de Charles e de Boyle-Mariotte, conhecida como a equação de Clapeyron-Mendeleev [7], mostrada na equação 1:

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

Na equação acima  $p$  é a pressão em Torr,  $V$  é o volume do gás em litros,  $n$  é a massa do gás em moles,  $R$  é a constante universal dos gases com valor de  $8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$  e  $T$  é a temperatura absoluta em Kelvin. Vale observar que em sistemáticas de vácuo é muito comum encontrar variáveis não padronizadas nas unidades do Sistema Internacional (SI) como a pressão e o volume descritos acima. A equação dos gases perfeitos é suficientemente empregável nas situações de sistemas de vácuo onde se tem uma pressão baixa e uma temperatura alta para garantir esse comportamento (maioria dos casos). Ainda, vale ressaltar que os dois membros da equação ( $pV$  e  $nRT$ ) são diretamente proporcionais.

Também é válido acrescentar que essa equação pode ser escrita com uma variação, na forma expressa na equação 2:

$$pV = NkT \quad (2)$$

As variáveis que foram alteradas são o número de moléculas  $N$  e a constante de Boltzmann  $k$  com o valor de  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  (em vácuo utilizada como  $k = 1,03 \cdot 10^{-12} \text{ mbar}\cdot\text{lir}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Isso é possível devido a relação expressa na equação 3 entre as constantes  $R$  e  $k$ :

$$R = kN_A \quad (3)$$

Onde  $N_A$  é o número de Avogadro equivalente a  $6,02 \cdot 10^{23}$  moléculas/mol e equivale a razão entre  $N$  e  $n$ .

Já a segunda situação acontece quando há a presença de vapores no sistema. Isso ocorre para o comportamento de um gás dito real. É observado quando a temperatura é suficientemente baixa e a pressão suficientemente alta para levar o gás a um ponto crítico (em uma temperatura, volume e pressão críticas, características de cada gás) onde se encontra a possibilidade de transformação do gás para os estados sólido e líquido da matéria. Esse ponto é analisado em uma curva de comportamento pressão x volume a qual se

distância do padrão de curva de um gás real. Matematicamente, a descrição dessa situação é feita pela equação 4 de van der Waals [2]:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (4)$$

Na equação acima os parâmetros  $p$ ,  $n$ ,  $V$ ,  $R$  e  $T$  são os mesmos utilizados para a equação dos gases ideais. Já os parâmetros  $a$  e  $b$  são exclusivos de cada gás. Essa equação é válida quando  $n$  é maior do que 1 mol. Ainda, vale lembrar que levando o gás a condições extremas que tendam a sair do estado de vapor os termos  $\frac{n^2 a}{V^2}$  (termo corretivo da pressão que considera as forças de atração para a situação) e  $nb$  (termo corretivo do volume que considera significativo o volume das moléculas) tendem a zero, de modo a retornar a equação dos gases ideais e reafirmar sua validade a partir da coerência matemática.

Tabela 1 valores das constantes 'a' e 'b' de um gás de van der Waals para os gases He, Ar, N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> [1].

<b>Gás</b>	<b>a (Jm<sup>3</sup>/mol<sup>2</sup>)</b>	<b>b (10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/mol)</b>
He	0,0035	2,37
Ar	0,1358	3,22
N <sub>2</sub>	0,1409	3,91
CO <sub>2</sub>	0,3640	4,27

Comparando as curvas de um gás ideal com as curvas de um gás real, para condições em que estão bem definidas, ou seja, distantes do limiar de transição, percebe-se que estas possuem formatos distintos como representado na figura 1. Já ao analisar a curva onde se percebe a transição de um comportamento para o outro, é possível observar um ponto de tangência que é utilizado para a determinação dos parâmetros críticos de temperatura, volume e pressão ( $T_c$ ,  $V_c$  e  $p_c$ ) mencionados anteriormente, e calcular as variáveis  $a$  e  $b$  presentes na equação de van der Waals representadas respectivamente nas equações 5 e 6:

$$a = 3p_c (V_c/n)^2 \quad (5)$$

$$b = 3 V_c/n \quad (6)$$

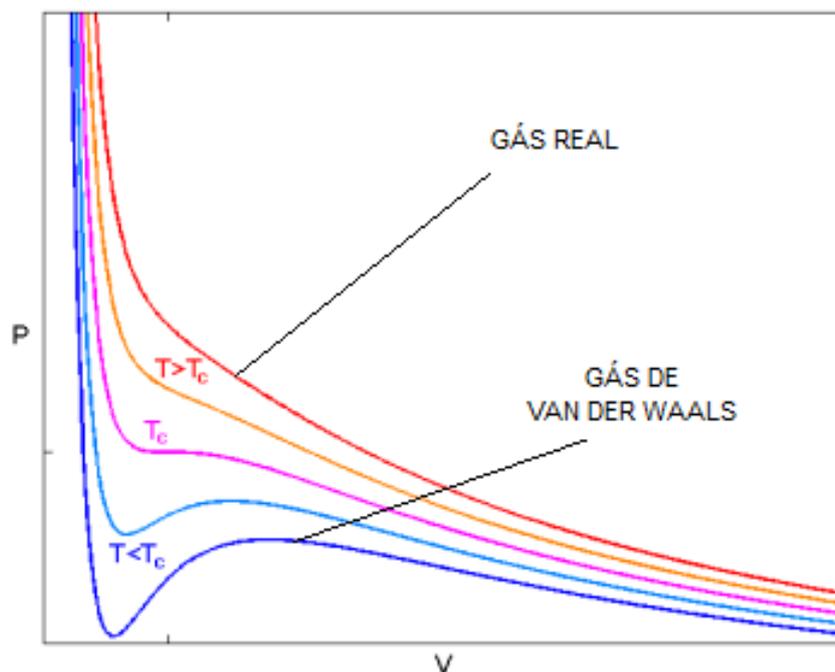


Figura 1: Isotermas para um gás real e para um gás de van der Waals [9].

## 2.2. Regime de escoamento viscoso laminar

O regime de escoamento viscoso laminar diferentemente dos outros regimes de escoamento sempre está presente nos processos de bombeamento e obtenção de vácuo. Isso ocorre, pois ele é observado justamente nas faixas de vácuo grosseiro e de início do pré-vácuo, de maneira que todo e qualquer tipo de obtenção de vácuo necessita passar por essas faixas e conseqüentemente pelo escoamento viscoso laminar.

As características desse regime do ponto de vista físico são estipuladas pelo movimento do fluido no interior do sistema. Considerando o movimento individual das partículas ainda observa-se um sistema caótico de trajetórias aleatórias, onde a interação das partículas além de ocorrer entre elas próprias ocorre também com as paredes da tubulação. No entanto, ao analisar o movimento como um todo, nota-se que o transporte dos gases e vapores é em conjunto e caracteriza o comportamento de um meio contínuo.

Esse processo de deslocamento contínuo é realizado por camadas, as quais se movimentam sobrepostas como se fossem lâminas de gás. Outra

característica importantíssima desse fenômeno é o fato de que o livre caminho médio das moléculas é muito pequeno quando comparado com a dimensão do diâmetro da tubulação de escoamento. Ainda, tratando do deslocamento das lâminas percebe-se que na região central a velocidade do fluxo é maior do que na região adjacente as paredes do tubo onde ela é quase nula [5].

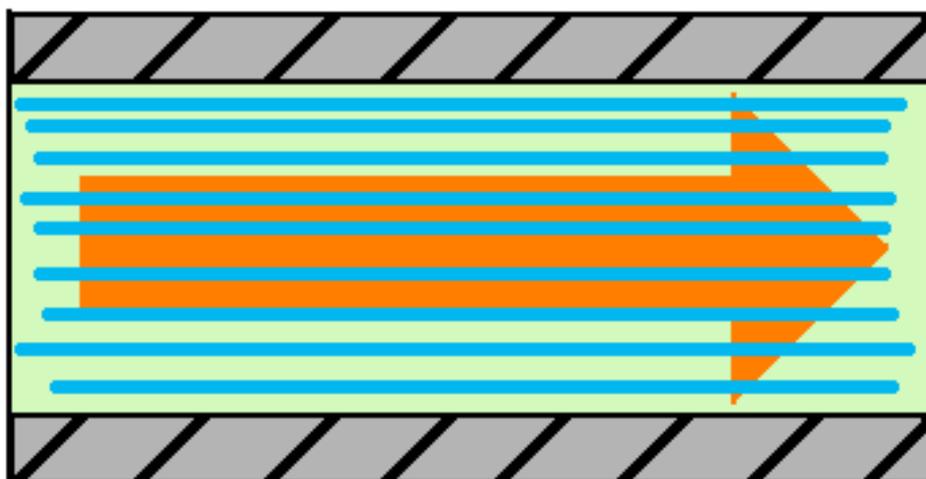


Figura 2: Esquema representativo do regime de escoamento viscoso laminar [6].

### 2.3. Livre caminho médio e número de Knudsen

O livre caminho médio é um parâmetro muito utilizado em cálculos de projetos de sistemas de vácuo uma vez que define o regime de escoamento do fluido. Sabemos que uma partícula percorre uma trajetória aleatória e caótica em seu movimento, onde interage com outras partículas. Considerando os choques (interações) apenas entre partículas, desprezando a interação com as paredes do sistema, podemos definir o livre caminho médio como sendo a distância média percorrida pelas moléculas entre dois choques sucessivos.

Matematicamente o livre caminho médio é representado pela letra grega lâmbida ( $\lambda$ ) e é obtido pela equação 7 [1]:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \Pi d^2 \frac{N}{V}} \quad (7)$$

Onde  $\lambda$  é o livre caminho médio em cm geralmente,  $d$  é o diâmetro da molécula,  $N/V$  é a densidade de moléculas em um recipiente e ainda  $\Pi d^2$  representa a seção transversal de choque.

Como dito anteriormente o livre caminho médio é um parâmetro muito utilizado em projetos de sistemas de vácuo, pois permite estipular o regime de escoamento do sistema. Esse cálculo é feito pela obtenção de outro parâmetro conhecido como número de Knudsen,  $Kn$  (Knudsen number) e é dado pela equação 8 [1]:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (8)$$

Onde  $L$  é uma distância característica do sistema de vácuo, como por exemplo, o diâmetro da tubulação que liga a câmara de vácuo à bomba de vácuo.

Tabela 2 Relação do número de Knudsen com os regimes de escoamento [2].

<b>Regime</b>	<b>Valor</b>
Molecular	$Kn > 1,0$
Intermediário	$0,01 < Kn < 1,0$
Viscoso Laminar	$Kn < 0,01$
Turbulento	$Kn < 0,01$

## **2.4. Número de Reynolds**

Assim como o número de Knudsen, o número de Reynolds,  $Rn$  (Reynolds number) é um número adimensional, calculado para definir e distinguir os regimes de escoamento viscoso laminar e turbulento não identificados até então pelo  $Kn$ . Sendo assim, o número de Reynolds complementa a identificação desses regimes. Pode ser obtido a partir da equação 9 [1]:

$$Rn = \frac{v\rho d}{\eta} \quad (9)$$

Onde  $v$  é a velocidade de escoamento do gás,  $\rho$  é a densidade do gás,  $d$  é o diâmetro do tubo e  $\eta$  é o coeficiente de viscosidade do gás. Uma possível classificação do  $Rn$  é a seguinte:

Tabela 3: Relação do número de Reynolds com os regimes de escoamento [2].

<b>Regime</b>	<b>Valor</b>
Molecular	Não se aplica
Intermediário	Não se aplica
Viscoso Laminar	$Rn < 1000$
Viscoso Laminar ou Turbulento	$1000 < Rn < 2000$
Turbulento	$Rn > 2000$

## 2.5. *Throughput*

O *throughput* é mais um dos parâmetros muito utilizados nas sistemáticas de vácuo e é diretamente aplicado no cálculo das velocidades de bombeamento explicadas no decorrer do trabalho. O *throughput* é a taxa do fluxo de massa gasosa que passa por um plano, definido como um corte de seção transversal, no tempo. Ainda, pode ser caracterizado pela somatória de todas as fontes de gás em um sistema.

É definido então pela equação 10 [5]:

$$Q = d \frac{(pV)}{dt} \rightarrow Q = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} \quad (10)$$

Onde,  $p$  é a pressão,  $V$  é o volume e  $t$  é o tempo. No Sistema Internacional, a unidade para a medida do *throughput* é *pascal m<sup>3</sup>/s* (ou ainda J/s ou W), no entanto, como mencionando anteriormente, na tecnologia do vácuo ocorrem algumas convenções, e nesse caso a unidade adotada passa a ser mbar L / s.

## 2.6. *Velocidade de bombeamento*

A velocidade de bombeamento representa para os sistemas de vácuo a quantidade de massa gasosa que é retirada por unidade de tempo de uma

câmara de vácuo e de tubulações. É padronizada a representação por  $S_b$ , e matematicamente é dada pela equação 11 [5]:

$$S_b = \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

Onde  $V$  é o volume bombeado em litros e  $t$  é o tempo em segundos.

A velocidade de bombeamento é muito utilizada junto da quantidade de gás do sistema, *throughput*, o qual é proporcional a pressão na câmara de vácuo, como pode-se ver na equação 12 [2]:

$$Q = S_b \times p \quad (12)$$

Onde  $Q$  é o *throughput* e  $p$  é a pressão.

A velocidade de bombeamento é um parâmetro geralmente catalogado pela empresa que fabricou a bomba de vácuo utilizada e corresponde a capacidade da bomba de realizar o bombeamento do sistema. No entanto, existem outros parâmetros que interferem e limitam essa capacidade diminuindo a velocidade de bombeamento.

Sendo assim, estipula-se um novo parâmetro conhecido como velocidade efetiva de bombeamento para determinar exatamente qual é a quantidade de gás que atravessa a sessão transversal da entrada da bomba de vácuo. Vale ressaltar que essa nova variável é totalmente dependente da condutância do sistema e é dada pela equação 13 [4]:

$$S_{ef} = \frac{S_b \cdot C_T}{S_b + C_T} \quad (13)$$

Onde,  $S_{ef}$  é a velocidade efetiva de bombeamento em litros por segundo,  $S_b$  é a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo em litros por segundo também e  $C_T$  é a condutância total do sistema com a mesma unidade das variáveis anteriores.

## 2.7. Desgaseificação

A desgaseificação (degassing) é um processo intrínseco a natureza dos materiais e presente nos sistemas de vácuo. Trata-se de uma fonte de gás e vapores, obtida a partir de moléculas até então ligadas aos materiais presentes no interior do sistema.

Uma das principais fontes que compõem o *throughput*, em termos de quantidade de partículas, é estudada a fim de ser eliminada para não mascarar os processos analisados. Todo material submetido a uma pressão como a atmosférica inevitavelmente interage com as partículas gasosas as quais está exposto gerando ligações.

Essas ligações, em geral são consideradas fracas já que são superficiais e conhecidas como ligações de van der Waals (interação física intermolecular). Justamente por serem ligações superficiais essas moléculas não são absorvidas pelo material em sua maioria, são apenas adsorvidas.

Desse modo, quando o sistema é submetido ao ambiente de vácuo, a diferença de pressão implica na dessorção dessas moléculas, principalmente das paredes dos componentes do sistema, tornando-as uma fonte de gás indesejável. Essa fonte de gás não só mascara os processos estudados como se torna um empecilho limitante para alcançar os níveis de alto vácuo, ultra-alto vácuo e extremo-alto vácuo e aumenta o tempo de bombeamento do sistema para se alcançar a pressão final.

Sendo assim, um modo de tentar diminuir a ocorrência desse fenômeno se dá no processo de condicionamento e limpeza do sistema. A escolha dos materiais utilizados para as estruturas deve ser bem estudada a fim de se evitar materiais porosos e com altas pressões de vapor. Ainda, a limpeza desses materiais é fundamental para retirar partículas contaminantes da superfície como poeira e gordura.

Vale ressaltar que as partículas componentes da desgaseificação não são provindas somente do processo de dessorção. Em menor quantidade as moléculas difundidas, vaporizadas e permeadas por um material também compõem essa fonte de gás. Ainda, existem processos que aceleram a taxa de desgaseificação do sistema para eliminá-la, sendo um dos principais e mais

simples métodos o aquecimento do sistema e a consequente transferência de energia para as moléculas [1].

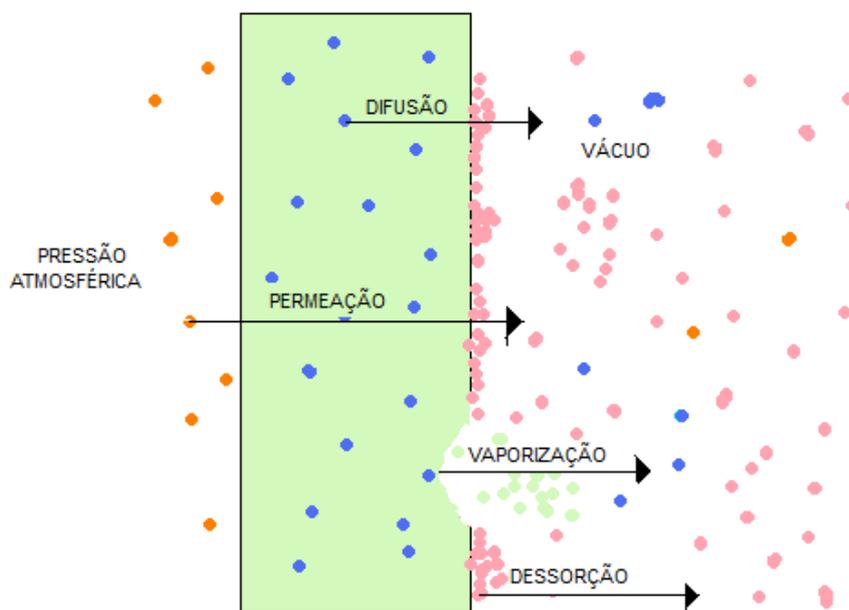


Figura 3: Fontes dos processos de desgaseificação [6].

## 2.8. Condutância

A condutância é mais um parâmetro de sistemas de vácuo utilizado para projetos como dito anteriormente. A partir de sua determinação é possível calcular a velocidade de bombeamento, assim como o tempo necessário para se bombear o gás do sistema até alcançar a pressão final desejada.

No sistema de vácuo ela é influenciada pelas dimensões de tubulações e orifícios da linha de bombeamento, de válvulas e qualquer outro componente presente. Em termos práticos, a condutância define a facilidade com que o gás terá de fluir no sistema seja durante o bombeamento ou em um simples movimento difusional, desse modo pode ser entendida como o inverso da resistência ao fluxo oferecida pelo circuito.

Matematicamente, a condutância é equacionada de modo semelhante à segunda lei de Ohm da eletricidade. Analogamente, entendendo a pressão ( $p$ ) do sistema como a tensão de um circuito elétrico, o *throughput* ( $Q$ ) como a corrente elétrica e a condutância ( $C$ ) como o inverso da resistência elétrica obtemos na equação 14 [5]:

$$p = \frac{Q}{C} \rightarrow C = \frac{Q}{p} \quad (14)$$

Onde,  $p$  está em mbar,  $Q$  em mbar L/s e  $C$  em L/s. Vale ressaltar que apesar do comportamento do sistema se assemelhar ao de um circuito elétrico, não existe um dispositivo instrumental que determine a condutância de um sistema como um ohmímetro que mede a resistência elétrica diretamente. Esse fato torna importantíssimo o estudo de condutância, pois a partir de sua determinação se obtém domínio sobre uma grandeza fundamental em qualquer projeto de tecnologia do vácuo.

Ainda, em um circuito de vácuo as condutâncias podem ser associadas de duas formas: em série e em paralelo. Semelhante à eletricidade, existe uma condutância equivalente calculada para essas duas situações. No caso da associação de condutâncias em série ( $C_{série}$ ) temos o resultado na equação 15 [2]:

$$\frac{1}{C_{série}} = \sum \frac{1}{C_i} \quad (15)$$

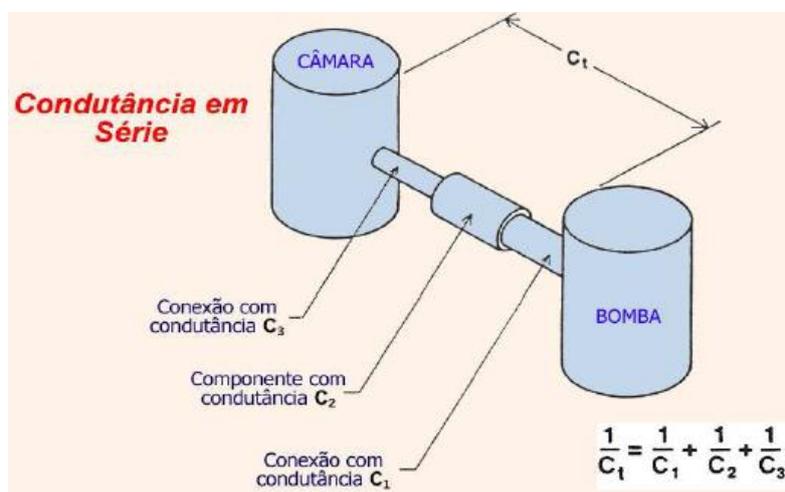


Figura 4: Associação de condutâncias em série[2].

Já para o cálculo da associação de condutâncias em paralelo ( $C_{paral}$ ) temos o resultado na equação 16 [2]:

$$C_{paral} = \sum C_i \quad (16)$$

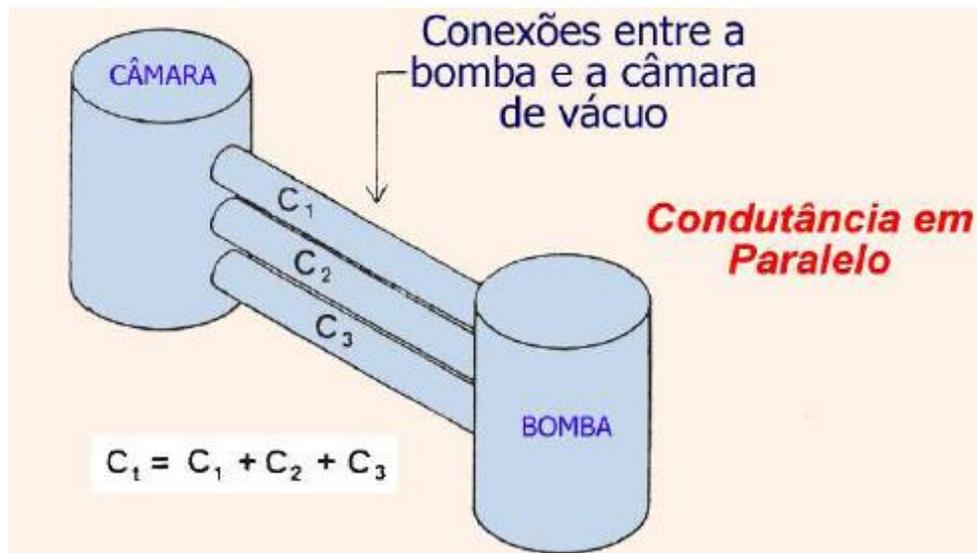


Figura 5: Associação de condutâncias em paralelo[2].

Nas figuras acima  $C_T$  corresponde à condutância total, ou equivalente, um termo adotado genericamente para representar as associações.

### 2.8.1. Condutância em um tubo de seção circular

O comportamento da condutância abordado nesse tópico é descrito para um fluxo em regime laminar. A condutância em um tubo de seção circular matematicamente é definida pela equação de Poiseuille para um fluido incompressível que atenda a seguinte condição [5]:

$$Q < \frac{10^{-3} D^2 p v_s \Pi}{12} \text{ ou ainda } \frac{Q}{D} > 244$$

Onde,  $v_s$  é a velocidade do som em cm/s,  $D$  é o diâmetro em cm e  $p$  é a pressão em Torr. Satisfeitas tais condições a condutância para um tubo de seção circular é calculada por meio da equação 17[5]:

$$C = \frac{\Pi D^4 p_m}{128 \eta L} \quad (17)$$

Onde,  $D$  é o diâmetro,  $p_m$  é a pressão média do gás no tubo,  $\eta$  é o coeficiente de viscosidade do gás e  $L$  é o comprimento do tubo.

Tabela 4: Coeficiente de viscosidade de alguns gases a temperatura de 0°C e pressão de 1 Torr [13].

<b>Gás</b>	<b>Coeficiente de viscosidade <math>\eta</math> (<math>\mu</math> poise)</b>
He	186,9
Ar	208,8
N <sub>2</sub>	166,6
CO <sub>2</sub>	137,6

### 2.8.2. Condutância em um orifício de seção circular

Assim como no tópico anterior os cálculos aqui detalhados correspondem ao comportamento da condutância de um orifício de seção circular para um fluxo em regime viscoso laminar. De um modo geral, a equação que determina essa condutância é descrita a partir da equação do fluxo de massa de Lewin, lembrando que o livre caminho médio é muito menor do que as dimensões das tubulações e que o fluxo de massa pode ser tratado como contínuo. Considerando algumas substituições equivalentes de variáveis na equação de Lewin, generaliza-se na equação 18 a expressão da condutância para o orifício [5]:

$$C = \frac{9,31r^{\frac{1}{\gamma}}}{1-r} \sqrt{\frac{2\gamma T(1-r)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{M(\gamma-1)}} A \quad (18)$$

Onde  $r$  é a razão entre as pressões  $p_2$  e  $p_1$  depois e antes do orifício,  $\gamma$  é a razão entre os calores específicos molares do gás a pressão e a volume constante ( $C_p/C_v$ ),  $T$  é a temperatura,  $M$  é a massa molecular do gás e  $A$  é a área do orifício.

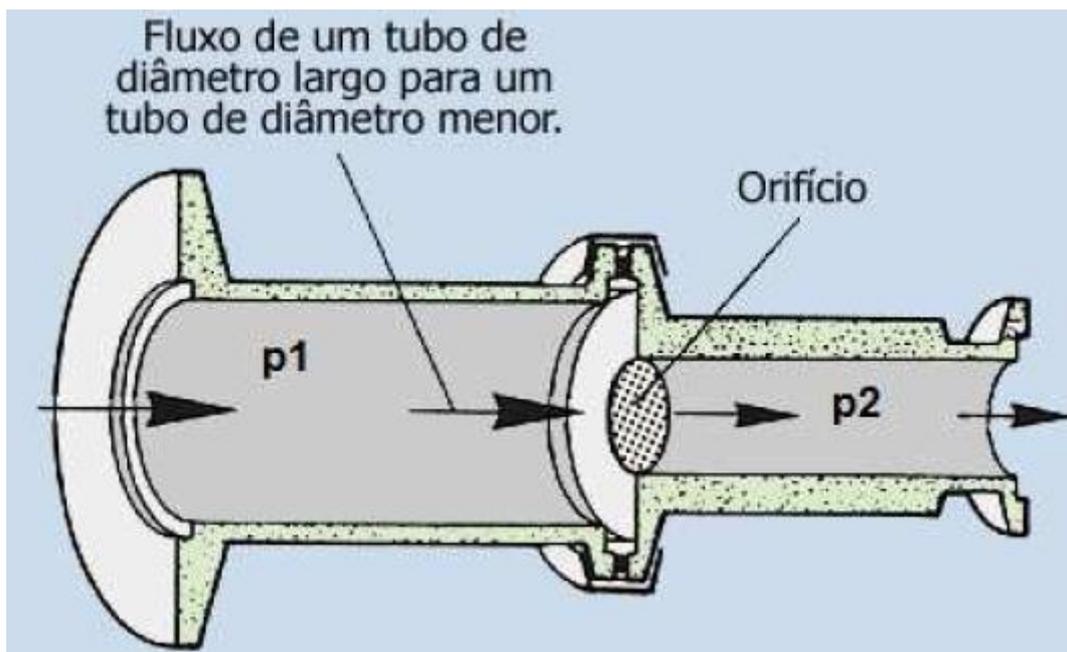


Figura 6: Sistema onde o fluxo escoava de uma tubulação com diâmetro maior para uma tubulação com diâmetro menor passando por um orifício [2].

## 2.9. Moléculas diatômicas e poliatômicas

Como mencionado anteriormente, os estudos de condutância e de escoamento bloqueado propostos neste trabalho são diretamente influenciados pelo tipo de gás que escoava pelo sistema. No caso, como os gases utilizados possuem 2 e 3 átomos na molécula, é necessário discutir o comportamento individual destas que assumem 5 e 6 graus de liberdade respectivamente, e diferentemente de gases monoatômicos, podem apresentar movimento translacional, rotacional e oscilatório.

A movimentação das moléculas está diretamente conectada a quantidade de energia fornecida a elas, de maneira que a variação de temperatura permite a elas realizar os diferentes movimentos mencionados acima.

Estes modos de movimento são associados a possíveis graus de liberdade que definem maneiras independentes de uma molécula armazenar energia cinética. Segundo o teorema de equipartição da energia de James C. Maxwell cada grau de liberdade tem a ele associado, na média, uma energia de  $\frac{1}{2} kT$  por molécula ou  $\frac{1}{2} RT$  por mol, onde  $T$  é a temperatura,  $k$  é a constante de Boltzmann e  $R$  é a constante universal dos gases reais [7].

Para gases monoatômicos observa-se apenas 3 graus de liberdade para movimentos translacionais. Não há movimentos rotacionais, pois segundo a teoria quântica um átomo não possui momento de inércia suficiente para girar em torno do seu próprio eixo e não há movimentos oscilatórios, pois este é caracterizado apenas em uma ligação química.

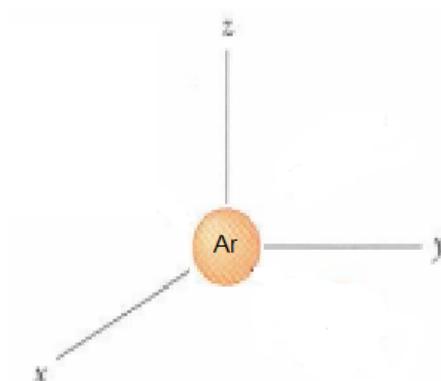


Figura 7: 3 graus de liberdade para um gás monoatômico – Argônio[11].

Para gases diatômicos além de apresentar os 3 graus de liberdade vistos para os monoatômicos (figura 8 - (a)), possuem mais 2 graus de liberdade para movimentos rotacionais em torno de eixos ortogonais ao centro de conexão entre os 2 átomos (figura 8 - (b)). A teoria quântica propõe que um terceiro grau de liberdade (com eixo no centro de conexão) não é considerado a temperatura ambiente (figura 8 - (b), eixo y), pois não há energia suficiente para ocorrer, assim como o movimento oscilatório (figura 8 - (c)).

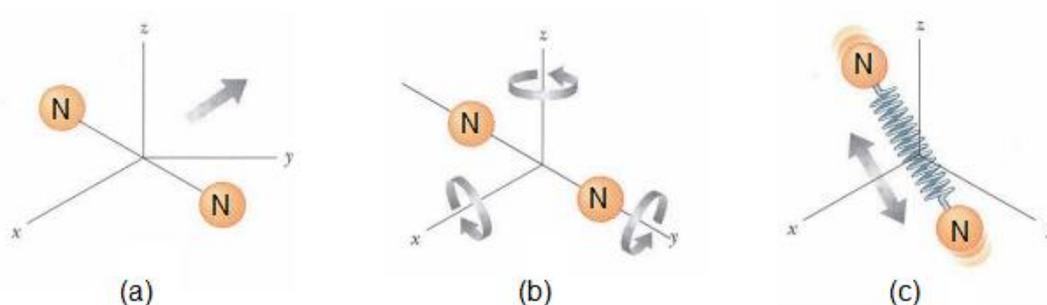


Figura 8: Movimentos: translacional (a), rotacional (b) e oscilatório (c), para um gás diatômico – Nitrogênio [11].

Para os gases poliatômicos à temperatura ambiente já são previstos 6 graus de liberdade (3 translacionais e 3 rotacionais) e com o aumento de temperatura é possível exibir o grau de liberdade oscilatório, já ilustrados na figura 8.

O conhecimento das possíveis energias armazenadas pelas moléculas é importante para determinar os parâmetros de calor específico molar a pressão e a volume constante ( $C_p$  e  $C_v$ ), mencionados no tópico 2.3. escoamento bloqueado.

A influência da temperatura nos possíveis movimentos das moléculas e na obtenção dos graus de liberdade é exemplificada no gráfico da figura 9 para a molécula de hidrogênio.

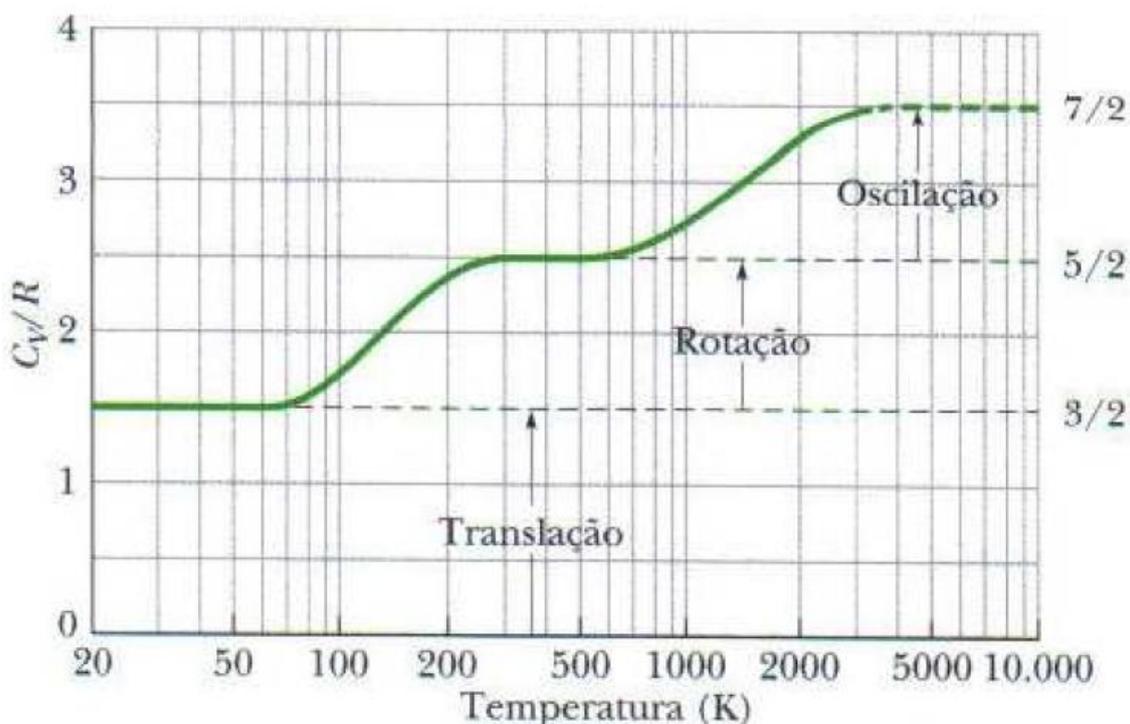


Figura 9: Curva de  $C_v/R$  em função da temperatura para um gás diatômico –  $H_2$  [7].

## 2.10. Escoamento bloqueado

O fenômeno aqui referido como escoamento bloqueado, também descrito na literatura como *choked flow*, trata de uma condição específica para o

escoamento isentrópico (não há a variação de entropia) compressível de um gás ideal, considerando expansão adiabática.

Esta condição específica é observada para o momento em que a velocidade de um fluido em escoamento atinge a velocidade sônica. Ela representa o intermédio entre um estado de escoamento subsônico (número de Mach  $< 1$ ) e um estado de escoamento supersônico (número de Mach  $> 1$ ), justamente no ponto conhecido como ponto de estagnação onde o número de Mach vale 1. Visto que o número de Mach é obtido pela equação 19, facilmente percebe-se que ao  $V$  atingir o valor de  $C$ ,  $M$  é igual a 1 [10].

$$M = \frac{V}{C} \quad (19)$$

Onde  $M$  é o número de Mach,  $V$  é a velocidade do fluido e  $C$  é a velocidade do som. Vale ressaltar ainda que enquanto o fluido acelera, partindo do estado subsônico, gera uma queda de pressão e temperatura que se acentua conforme a aceleração aumenta.

O escoamento bloqueado é um fenômeno de interesse, pois justamente a partir do ponto de estagnação é possível atingir a descarga máxima do escoamento (vazão mássica máxima), de maneira que mesmo diminuindo a pressão de descarga a vazão mássica do escoamento permanece constante ao invés de aumentar. Observa-se tal ocorrência a partir do ponto 'c' do gráfico da figura 10. Este gráfico representa a situação de escoamento bloqueado que é obtido somente em uma garganta ou em uma seção de área mínima (pequeno orifício). O ponto 'a' representa o momento em que não há escoamento enquanto o ponto 'b' representa o escoamento a partir da diminuição de  $P_b$  e o ponto d representa a região onde o fluxo de gás é constante.

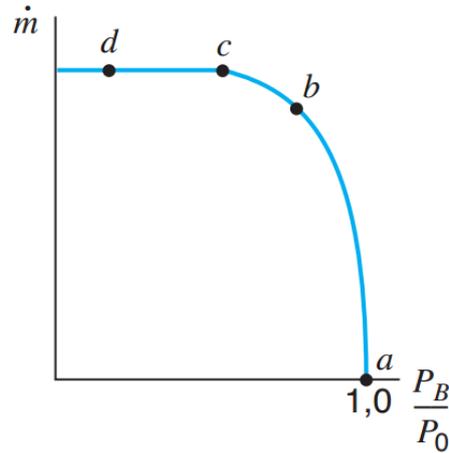


Figura 10: Vazão mássica em função da razão de pressão [10].

O gráfico da figura 10 é modelado teoricamente separando o escoamento em 2 setores: primeiramente onde o fluxo é constante dado pela equação 20 e depois onde o fluxo diminui dado pela equação 21, de maneira que o ponto c representa a transição entre eles.

$$\text{Para: } 0 \leq \frac{P_B}{P_0} \leq \frac{P_*}{P_0} \rightarrow$$

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

$$\text{Para: } \frac{P_B}{P_0} \geq \frac{P_*}{P_0} \rightarrow$$

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

Para o ponto de estagnação onde ocorre o escoamento bloqueado são especificadas 3 relações conhecidas como parâmetros críticos, essenciais na especificação deste fenômeno. Os parâmetros referidos estão definidos nas equações 22 (razão de pressão crítica), 23 (razão de temperatura crítica) e 24 (razão de massa específica crítica) [10].

$$\frac{p_o}{p^*} = \left[ \frac{k+1}{2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (22)$$

$$\frac{T_o}{T^*} = \frac{k+1}{2} \quad (23)$$

$$\frac{m_o}{m^*} = \left[ \frac{k+1}{2} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (24)$$

Observando as três equações acima é possível notar que elas são totalmente dependentes de um único parâmetro  $k$  dado pela equação 25. Esse parâmetro representa a razão entre os coeficientes de calor específico molar a pressão constante ( $C_p$ ) e calor específico molar a volume constante ( $C_v$ ), característicos para cada tipo de gás [10].

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (25)$$

A partir da determinação dos parâmetros mencionados acima na caracterização de capilares é possível estabelecer um padrão de dimensões destas tubulações que garantam um *throughput* constante independente de outros parâmetros a não ser a razão de pressão crítica, de modo a viabilizar a construção de controladores de fluxo e medidores de vazão passivos. Nas tabelas a seguir estão exemplificados alguns dos parâmetros determinados e encontrados na literatura.

Tabela 5: Calores específicos molares a volume e pressão constante e coeficiente  $k$  [8].

<b>Gás</b>	<b><math>C_v</math> [J/(mol K)]</b>	<b><math>C_p</math> [J/(mol K)]</b>	<b><math>k = C_p / C_v</math></b>
<b>Hélio</b>	12,5	20,8	1,66
<b>Argônio</b>	12,5	20,8	1,66
<b>Nitrogênio</b>	20,7	29,1	1,41
<b>Dióxido de Carbono</b>	28,2	36,6	1,29

Tabela 6: Relações críticas de pressão, de massa específica, e de temperatura para escoamentos isentrópicos de gases ideais [10].

<b>Parâmetro</b>	<b>k = 1,3</b>	<b>k = 1,4</b>	<b>k = 1,67</b>
<b>p*/p<sub>0</sub></b>	0,5457	0,5283	0,4867
<b>m*/m<sub>0</sub></b>	0,6276	0,6340	0,6497
<b>t*/t<sub>0</sub></b>	0,8696	0,8333	0,7491

### **3. Procedimentos experimentais e análise de dados**

A análise de dados assim como o estudo prévio de situações em sistemas de vácuo, como dito anteriormente, é de suma importância para garantir, ou minimamente, maximizar a eficácia da implantação de um sistema na indústria ou em um laboratório de pesquisa, visto que o custo para este, em geral, é dispendioso. Desse modo, ter conhecimento de um estudo já realizado e bem sucedido, além de um projeto calculado somente, torna uma sistemática mais confiável.

#### **3.1. Arranjo experimental**

O arranjo experimental utilizado para os testes, ilustrado abaixo na figura 11, é baseado em um sistema de pré-vácuo onde uma bomba mecânica de palhetas de duplo estágio (Edwards 2m<sup>3</sup>) é conectada a linha de bombeamento, a qual é composta pela tubulação a ser estudada (capilares) e por componentes auxiliares (válvulas, fole metálico, filtros e manômetros), sendo que esta linha une a bomba às câmaras de vácuo. São utilizados dois manômetros de membrana capacitiva, sendo um medidor de pressão do tipo Baratron - MKS (*range* = 10<sup>-2</sup> – 1000 Torr; resolução de 0,001 % F.S.; precisão de 0,25 % da leitura) e um CERAVAC – Leybold (*range* = 10<sup>-2</sup> – 1000 Torr; resolução de 0,003 % F.S.; precisão de 0,15 % da leitura), os quais são conectados às câmaras de vácuo CV<sub>1</sub> e CV<sub>2</sub> e a câmara de pressão de entrada, para medir a variação de pressão no tempo e monitorar a pressão atmosférica, para posterior análise matemática.

Ainda, há alguns detalhes importantes de serem destacados. No sistema, a câmara de pressão de entrada anexada possui a finalidade de manter a pressão neste ponto do arranjo constante, além de servir para injeção de gás de purga (gás de limpeza do sistema ou gás para equilibrar a pressão interna com a pressão atmosférica após o término dos experimentos).

Também foi utilizado um fole metálico na sequência da bomba de vácuo para absorver as vibrações geradas pela bomba mecânica e não permitir a transferência de esforço mecânico aos componentes do sistema,

principalmente às regiões de conexões, garantindo a minimização de vazamentos reais no circuito, assim como se procurou manter o sistema sempre alinhado ao máximo para evitar grandes esforços entre as ligações de flanges e tubos criando pontos de tensionamento.

Por fim, como foi utilizada uma bomba mecânica, junto a ela instala-se um filtro (ALCATEL ST25S) para reter e evitar que algumas partículas de vapor de óleo lubrificante da bomba sejam injetadas no sistema e passem a ser uma fonte de gás indesejada que mascare os resultados obtidos.

Vale mencionar que as estruturas utilizadas são fabricadas em aço inoxidável 304 com polimento mecânico para o caso das câmaras de vácuo e 304L eletro polido para as tubulações, conexões e válvulas (no caso swageloks).

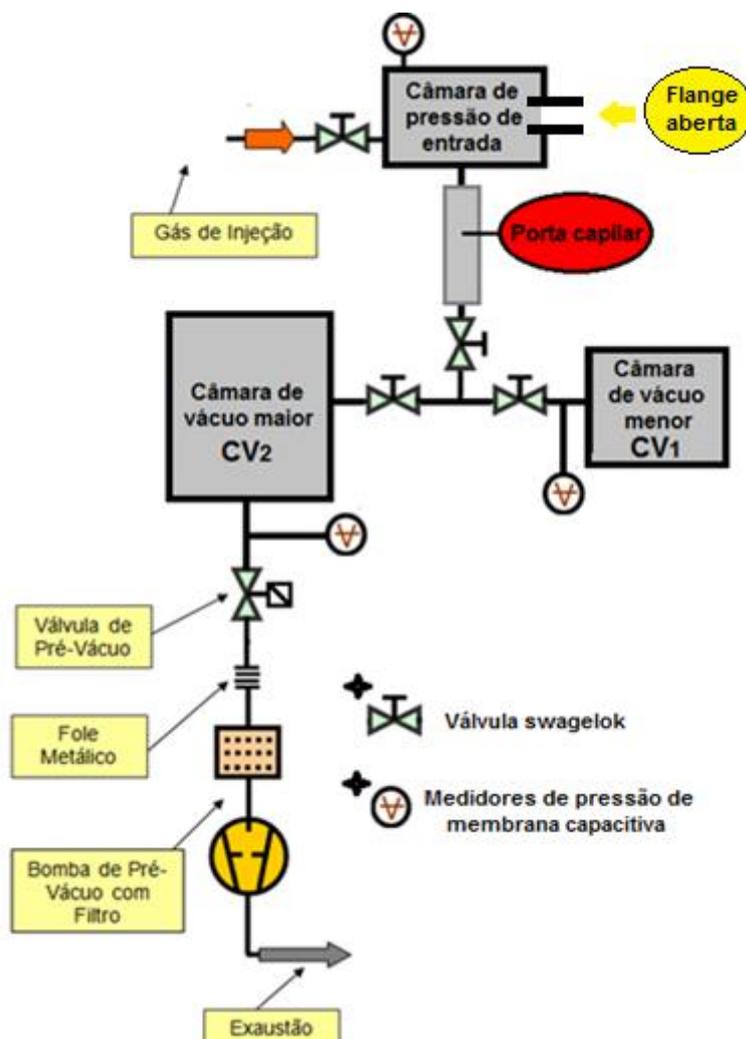


Figura 11: Desenho esquemático do arranjo experimental.



Figura 12: Foto do arranjo experimental utilizado.

### **3.2. Condicionamento e limpeza do sistema**

Para garantir que não existam sujeiras (fontes de vapor indesejadas no sistema, no caso de gordura), a sistemática de condicionamento e limpeza é uma etapa fundamental no desenvolvimento da experiência. As medidas adotadas consistem em limpar as peças que compõem o circuito do seguinte modo: para as válvulas e conexões com flange, cuidadosamente é passado um tecido, que não libera fiapos, umedecido com álcool P.A. nas faces de conexão das flanges e aberturas de o-rings. Lembrando que foi tomado o cuidado de apoiar as peças em superfícies macias e deformáveis afim de não criar

arranhões nas flanges, evitando a formação de canais condutores de gás externo (fontes de vazamento real).

Para a limpeza das câmaras de vácuo utilizadas, que já haviam passado por tratamento e estavam em ambiente de vácuo, o procedimento adotado foi injetar gás nitrogênio e estabelecer o bombeamento de vácuo por cerca de 15 minutos, sendo que esse processo foi repetido 3 vezes.

Já a limpeza dos tubos capilares é feita da seguinte maneira: as tubulações são colocadas em um recipiente de vidro com água aquecida, onde se adiciona detergente alcalino e deixa-se de molho. Na sequência, com uma seringa hipodérmica a solução de água e detergente alcalino é captada e injetada no interior do tubo de forma a atravessá-lo. Depois é feita a injeção de um fluxo somente com água. Ainda, utiliza-se de um fluxo de gás nitrogênio para eliminar qualquer partícula de poeira no interior da tubulação. Por fim, aplica-se álcool isopropílico para a secagem das tubulações já que este possui uma alta pressão de vapor e evapora com facilidade, carregando certo particulado.



Figura 13: Limpeza de tubos de condutâncias a serem estudadas.

Vale ressaltar que os capilares limpos são devidamente condicionados na instalação no sistema para a análise, por meio de dispositivos mecânicos desenvolvidos no próprio LTV (denominados porta capilares), que além de agilizarem o processo de troca e instalação dos tubos, garantem a sua proteção contra choques mecânicos e possíveis tensões, como é visto na figura 14. Além disso, são armazenados e separados por diâmetros e colocados dentro de tubos de pvc vedados para não ficarem expostos a poeira e sujeitos a deformações plásticas em caso de queda, exemplificado na figura 15.

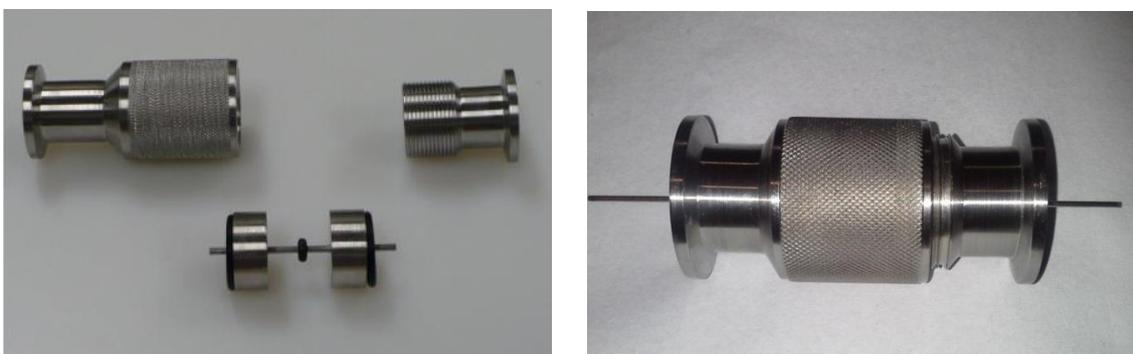


Figura 14: Dispositivo porta capilares, à esquerda desmontado revelando a estrutura interna de vedação com o-rings e à direita ilustrando o conjunto montado para instalação.

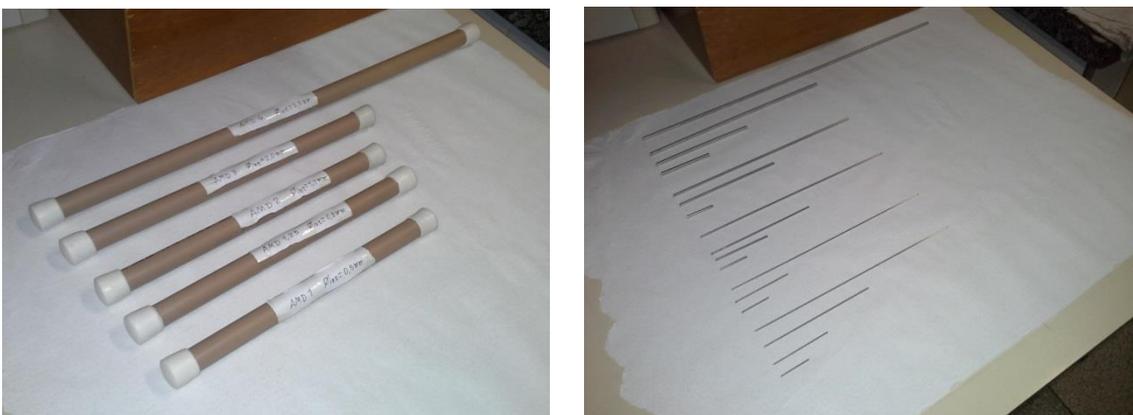


Figura 15: À esquerda os tubos de pvc onde são armazenados os capilares e à direita os próprios tubos organizados segundo os diâmetros internos.

### **3.3. Determinação de parâmetros fundamentais de ajuste**

Segundo explicado nos tópicos de bases teóricas, o estudo de condutâncias está diretamente interligado ao comportamento dos gases.

Assim, condições externas como pressão e temperatura ambiente de trabalho são fatores preponderantes e diretamente influenciáveis no desenvolvimento da experiência. Desse modo, devem ser cuidadosamente verificados e considerados nas análises feitas.

No caso do experimento, basicamente foram 2 fatores considerados e verificados. Primeiramente a temperatura foi controlada de forma que a sala de realização das medidas teve seu acesso reduzido, sendo que no momento da execução do experimento foram tomadas as medidas de temperatura de dois termômetros distribuídos pela sala, uma analógico e um digital.

O segundo parâmetro considerado foi a pressão local de trabalho, já que a cidade de São Paulo não está localizada a nível do mar, há uma conseqüente alteração do valor de 1 atm da pressão na atmosfera. A verificação da pressão atmosférica local foi feita utilizando um manômetro de membrana capacitiva CERAVAC com sua respectiva unidade controladora, posicionado na câmara de pressão de entrada exposta a pressão atmosférica.

### **3.4. Processo de medição e colhimento dos dados**

O procedimento experimental consiste em manter a câmara de pressão de entrada equilibrada à pressão atmosférica e fluxo contínuo do gás de processo. Essas condições são obtidas a partir da injeção do fluxo de gás, utilizando-se uma válvula agulha, de maneira que o gás introduzido seja suficiente para não deixar ar atmosférico entrar na câmara, considerando que há uma flange aberta, como visto na figura 11, e ao mesmo tempo a pressão nesta região seja constante (com a menor variação possível) já que o equilíbrio desta se dá de modo natural por movimento difusional do gás. No caso, foram utilizados os gases nitrogênio (diatômico) e dióxido de carbono (poliatômico).

Para cada tubo capilar analisado realizou-se 2 medições, para verificar a coerência de cada experimento e evitar qualquer erro embutido de difícil identificação com apenas um, sendo que para fins de análise matemática torna-se possível utilizar-se de uma média e tratamento estatístico. O processo de análise se dá pelo monitoramento da pressão na câmara de vácuo após o capilar ( $CV_1$  ou  $CV_2$ ) no escoamento da câmara de entrada para  $CV_1$  (ou  $CV_2$ ).

Lembrando que  $CV_1$  e  $CV_2$  são mantidas em ambiente de vácuo no início do processo (aproximadamente 1 Torr) para criar uma diferença de pressão.

Após isolar o sistema de bombeamento das câmaras de vácuo por meio de uma eletroválvula de pré-vacuo, a válvula que isola a câmara de pressão de entrada para a câmara de expansão  $CV_1$  (ou  $CV_2$ ) é aberta, permitindo a difusão do gás. Desse modo, monitora-se a variação de pressão no tempo até as pressões entre as 2 câmaras equilibrarem-se.

O colhimento dos dados foi realizado a partir de um sistema analógico digital automático. Optou-se por essa sistemática devido a grande quantidade de experimentos realizados e a conseqüente quantidade de pontos experimentais aferidos para serem tratados.

O sistema em questão consiste na medição de tensão (realizada por um multímetro de bancada) diretamente na cabeça sensora do manômetro BARATRON 626-MKS e transferência dos dados em tempo real via comunicação USB diretamente para uma planilha Excel, visto que o software de comunicação computador-multímetro foi devidamente instalado.

Para a obtenção dos dados em termos de pressão basta multiplicar os valores aferidos por 100, segundo instruções do fabricante.

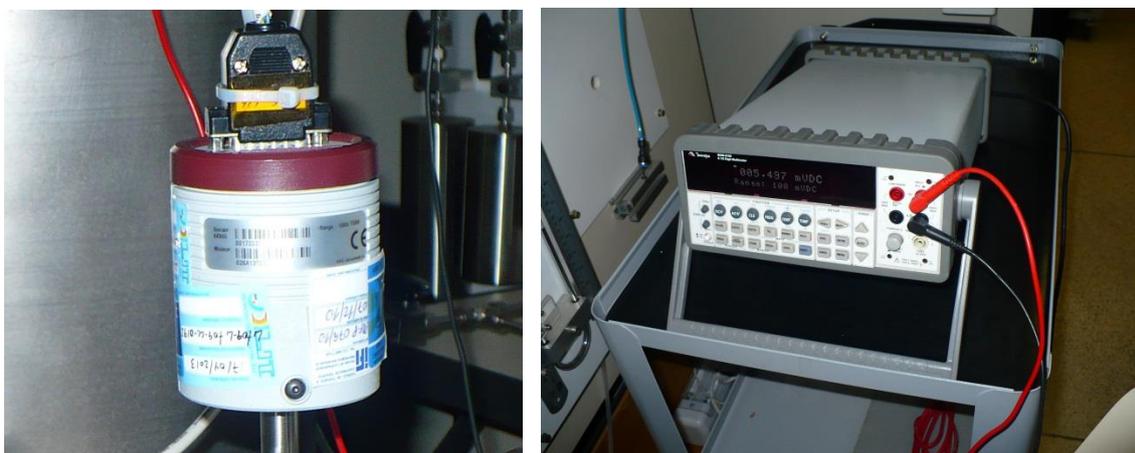


Figura 16: À esquerda a cabeça sensora do manômetro e à direita o multímetro.

É importante esclarecer que a utilização de duas câmaras de vácuo para a expansão dos gases e medições foi uma decisão tomada no intuito de se obter um melhor aproveitamento dos recursos envolvidos quanto à economia dos gases injetados e a realização dos experimentos em um tempo relativamente curto para não prejudicar a visualização do fenômeno estudado.

Visto que os capilares utilizados possuem diferentes dimensões, para os de diâmetro interno de 0,5 mm e 0,8 mm optou-se pela expansão para a câmara de menor volume ( $V_{CV1} = 4,6 \pm 0,1$  L) já que a variação de pressão no tempo era mais lenta, portanto um volume menor a se preencher diminuiria o tempo final da medição. Em contrapartida, para os capilares com diâmetros internos de 1,3 mm, 2,0 mm e 3,3 mm optou-se pela câmara de vácuo com maior volume ( $V_{CV2} = 56,4 \pm 0,8$  L) já que estes permitem um fluxo de gás maior, a fim de se evitar a variação brusca de pressão no tempo.

### 3.5. Análise dos dados

As dimensões dos capilares utilizados no estudo estão relacionadas a seguir:

Tabela 7: Dimensões dos capilares utilizados.

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

A partir dos dados aferidos obteve-se gráficos da variação de pressão em função do tempo para cada um dos capilares da tabela 7, como dito anteriormente, 2 conjuntos de dados respectivos a cada uma das 2 medições realizadas. No gráfico 1 é possível observar as curvas respectivas a esses pontos. Como há um interesse maior em comparar o comportamento do escoamento para os diversos capilares, não serão plotados neste trabalho todos os gráficos individuais de cada experimento. No gráfico 2 já é possível ver a curva média utilizada em alguns tratamentos seguintes, o qual possui uma incerteza muito pequena (da ordem do tamanho dos pontos plotados), devido a precisão dos manômetros utilizados, atrelando veracidade ao procedimento adotado. Vale ressaltar que as curvas aqui mostradas não se

tratam de polinômios ajustados ou curva teóricas (traçados contínuos), mas de muitos pontos experimentais (pontos discretizados) aferidos devido a utilização de um sistema automático e eletrônico de extração dos valores de pressão citado anteriormente, como se pode ver pelo zoom aplicado também ao gráfico 2. É importante esclarecer, que há confiança dos valores de pressão obtidos nos manômetros de membrana capacitiva, não se dá somente pela sua reputação no mercado, como também a uma comparação com um medidor do tipo vacustat, realizada em outro trabalho no próprio Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP. Além disso, todos os gráficos aqui apresentados a partir de dados experimentais foram obtidos a partir de tratamento no software OriginPro8.5.

Gráfico 1: Curvas experimentais dos testes 1 e 2 para a variação de pressão no tempo utilizando um capilar de  $D = 0,5 \text{ mm}$  e  $L = 30 \text{ mm}$  para o escoamento com gás nitrogênio.

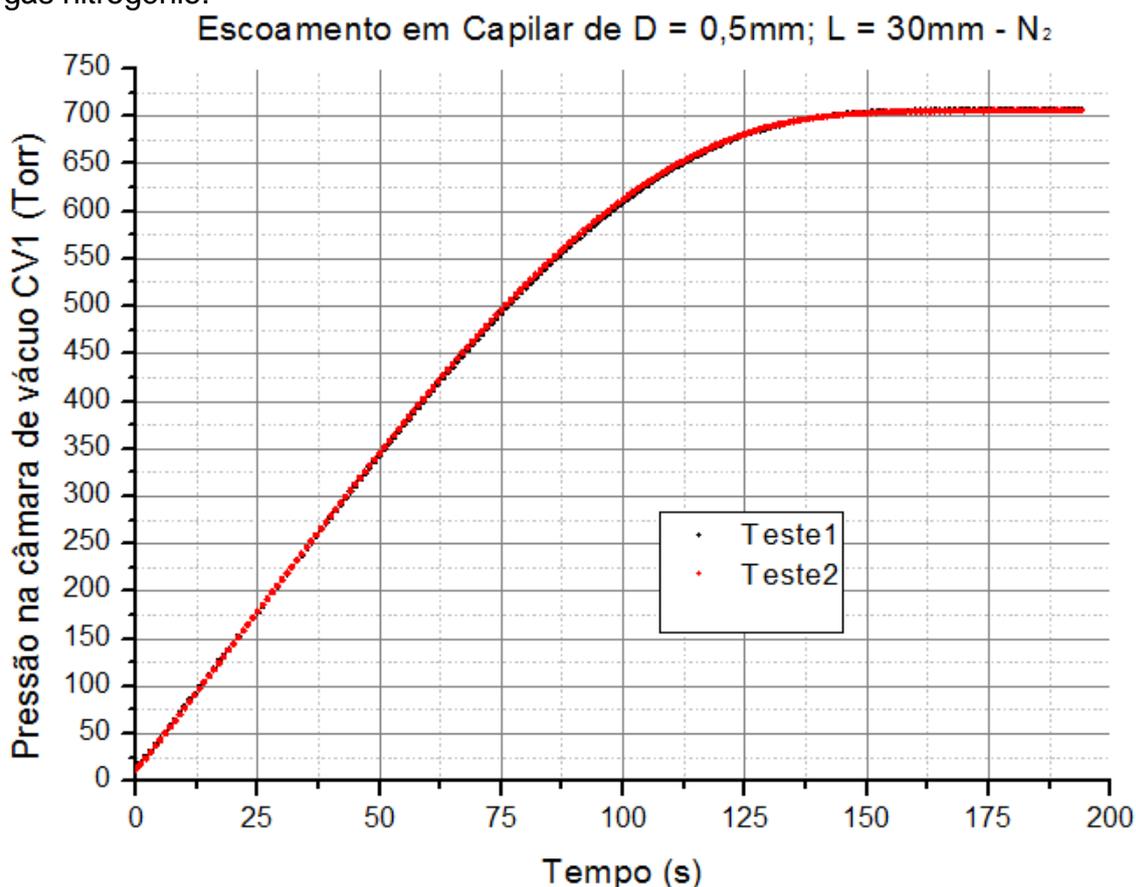
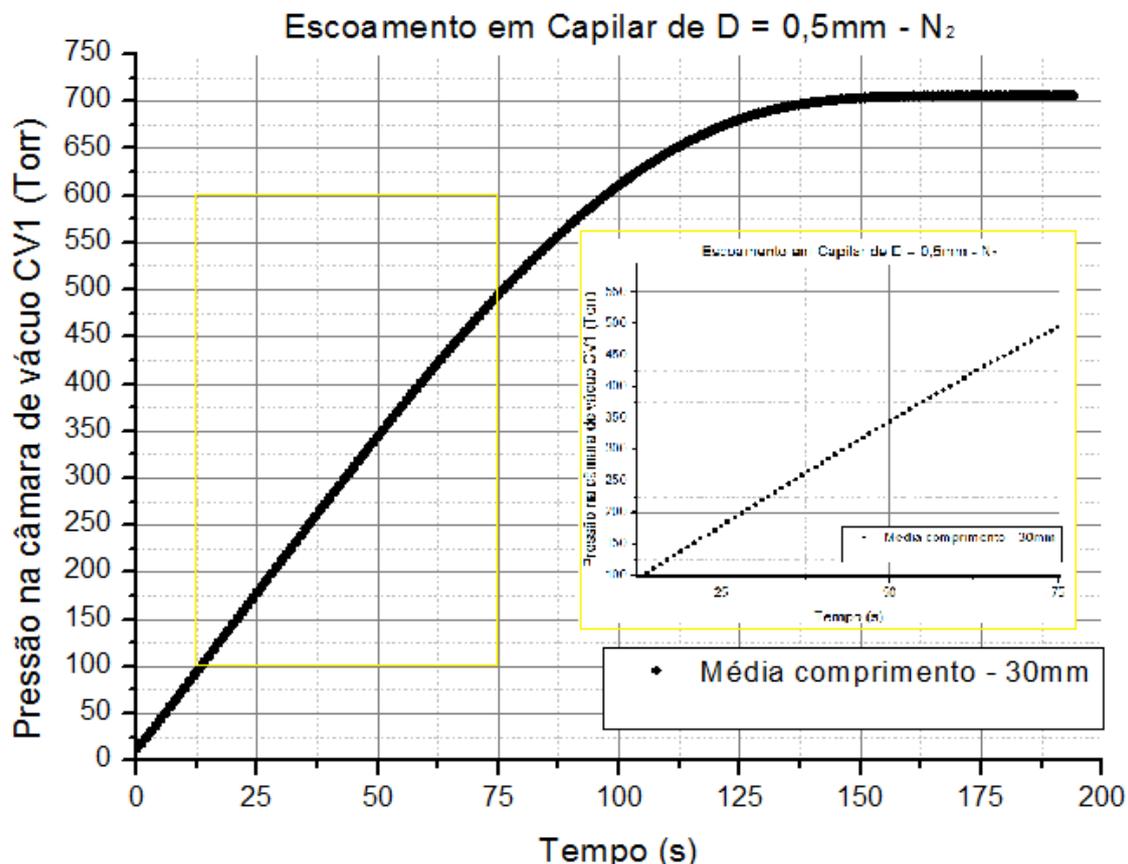


Gráfico 2: Curva média entre os testes 1 e 2 para a variação de pressão no tempo utilizando um capilar de  $D = 0,5 \text{ mm}$  e  $L = 30 \text{ mm}$  para o escoamento com gás nitrogênio e detalhe de zoom para a identificação de pontos experimentais.



Visto que para todos os testes realizados o comportamento apresentado é similar ao apresentado acima, onde as duas curvas experimentais se sobrepõem, optou-se primeiramente por verificar a influência do comprimento dos capilares diante o escoamento.

Para isso, os gráficos analisados em função do tempo foram parametrizados variando-se o comprimento e mantendo-se fixo tanto o diâmetro interno do capilar quanto o gás expandido. Ainda, como se utilizou 2 câmaras de vácuo de volumes distintos para as expansões, este poderia parecer mais um parâmetro variado, no entanto, para o estudo em questão isso não é um fator pronunciado pois para todos os comprimentos sempre é utilizada a mesma câmara de vácuo na expansão para um determinado diâmetro interno (relembrando que para os capilares de  $\phi = 0,5 \text{ mm}$  e  $0,8 \text{ mm}$  utiliza-se a câmara de vácuo de menor volume –  $CV_1$  – enquanto para os capilares de  $\phi = 1,3 \text{ mm}$ ,  $2,0 \text{ mm}$  e  $3,3 \text{ mm}$  utiliza-se a câmara de vácuo de maior volume –  $CV_2$ ).

Os gráficos de número 3 a 12, a seguir são referentes às expansões utilizando os gases nitrogênio e dióxido de carbono.

Gráfico 3: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 0,5 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .

Escoamento em Capilar de  $D = 0,5 \text{ mm}$  -  $N_2$

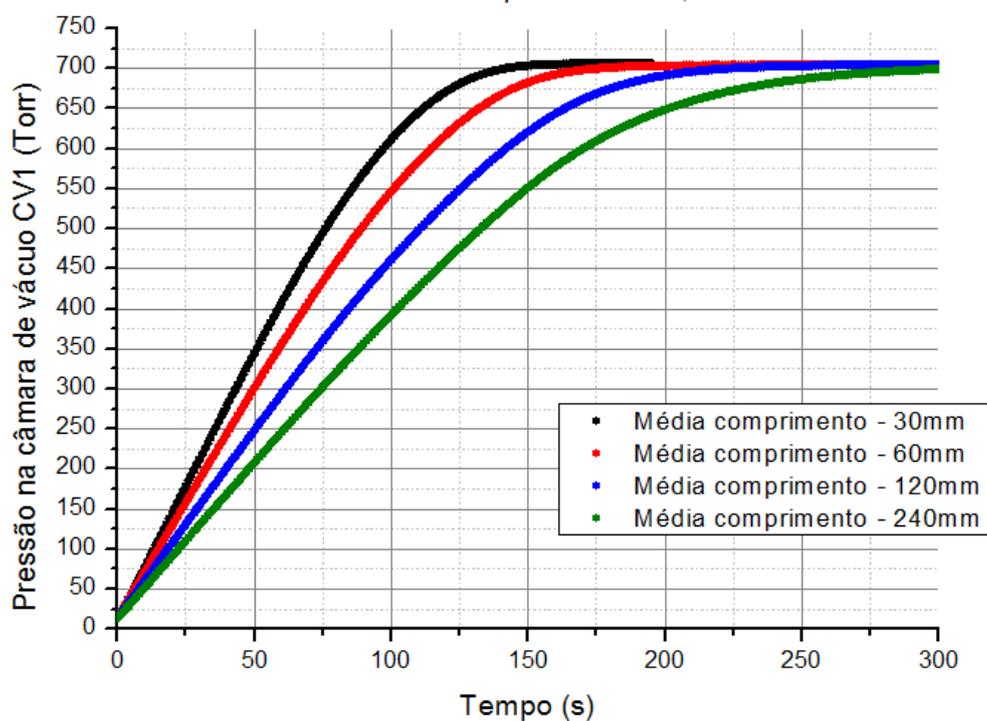


Gráfico 4: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 0,8 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .

Escoamento em Capilar de  $D = 0,8 \text{ mm}$  -  $N_2$

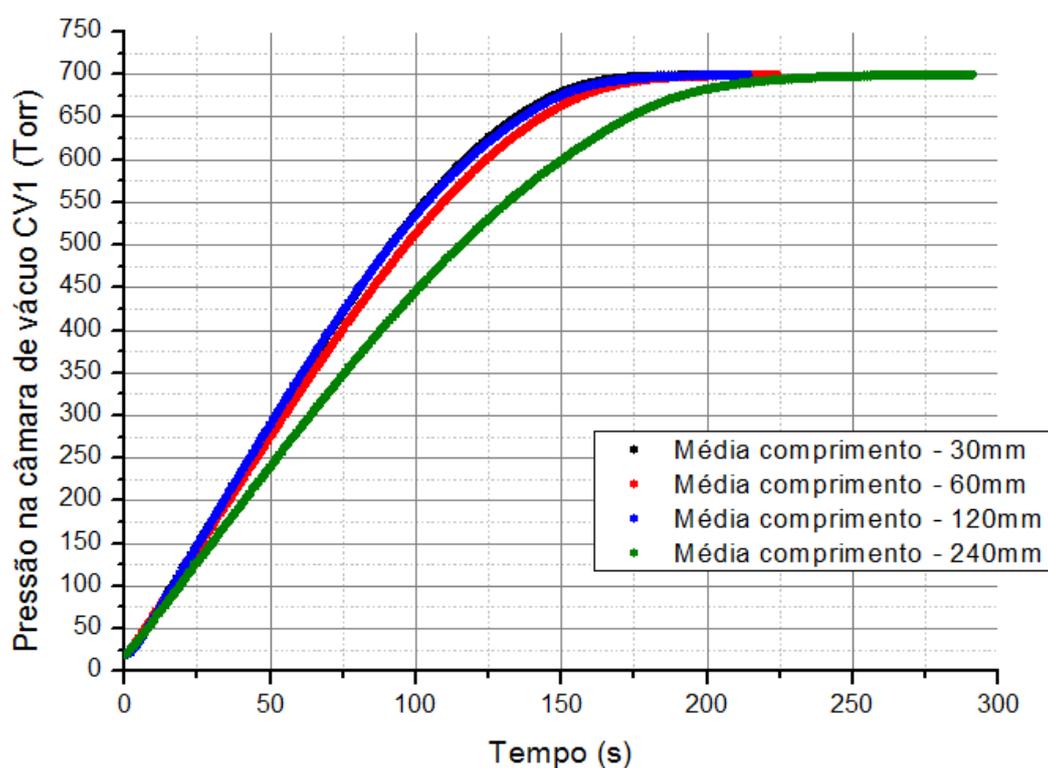


Gráfico 5: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 1,3 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 1,3\text{mm}$  -  $N_2$

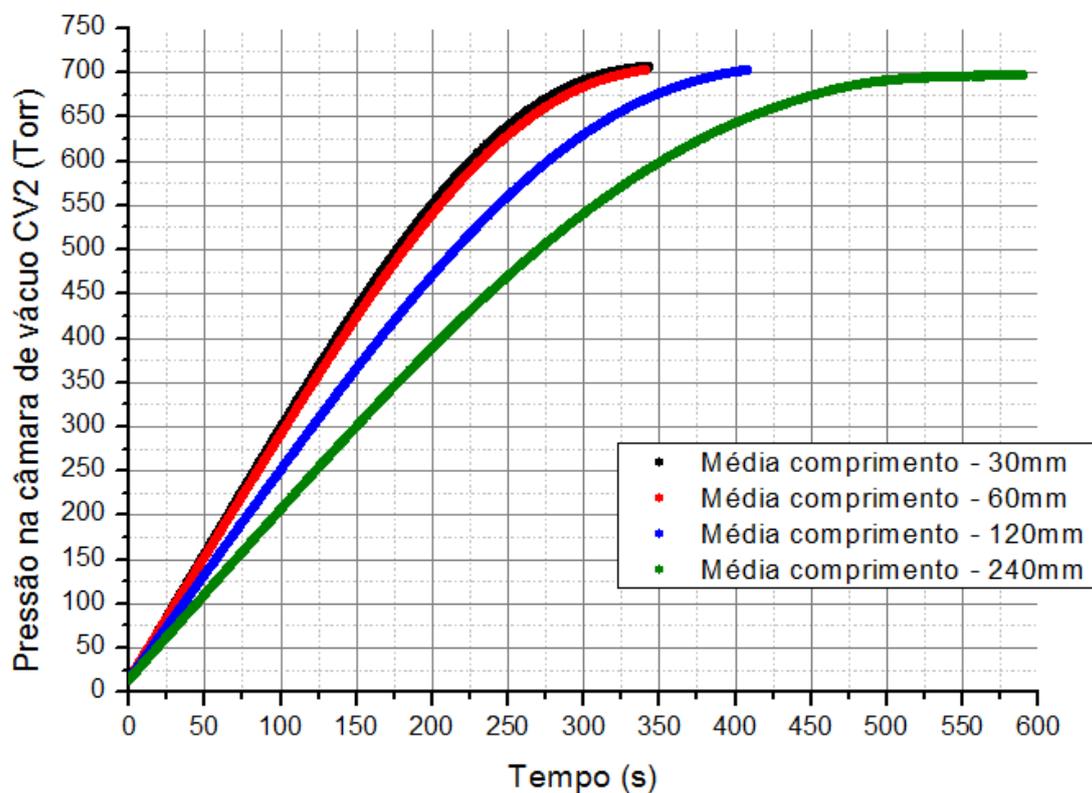


Gráfico 6: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 2,0 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 2,0\text{mm}$  -  $N_2$

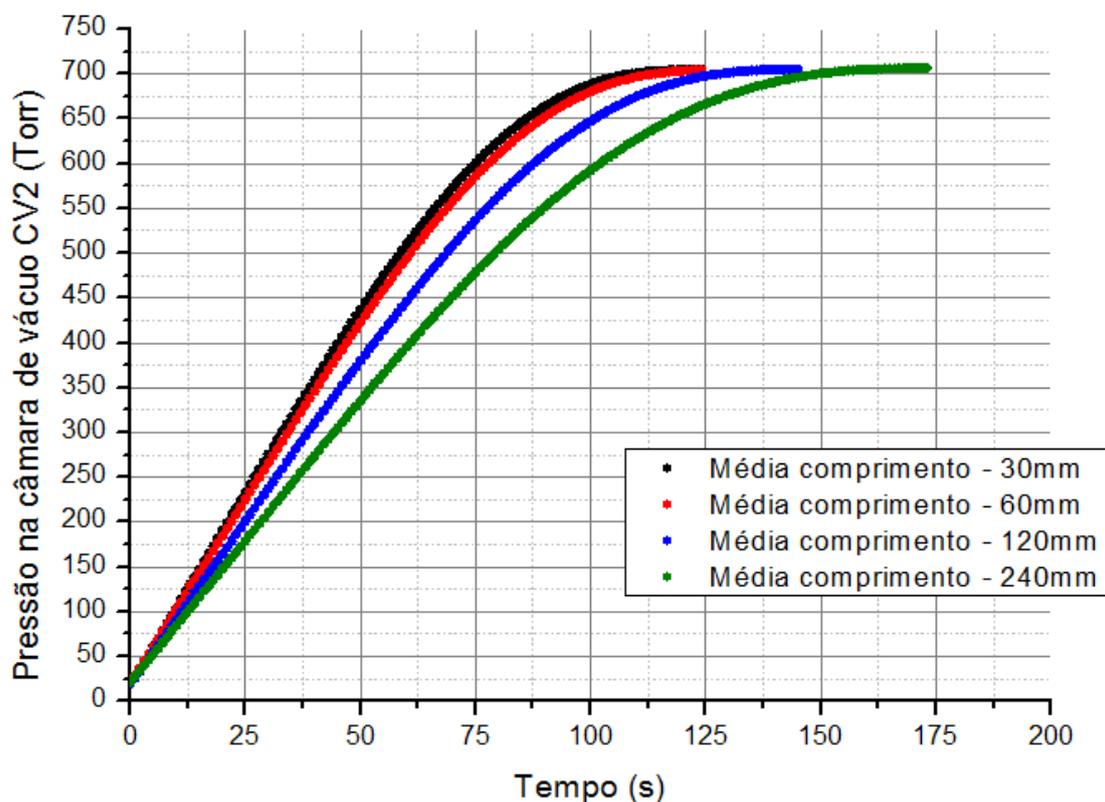


Gráfico 7: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 3,3 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 3,3\text{mm} - N_2$

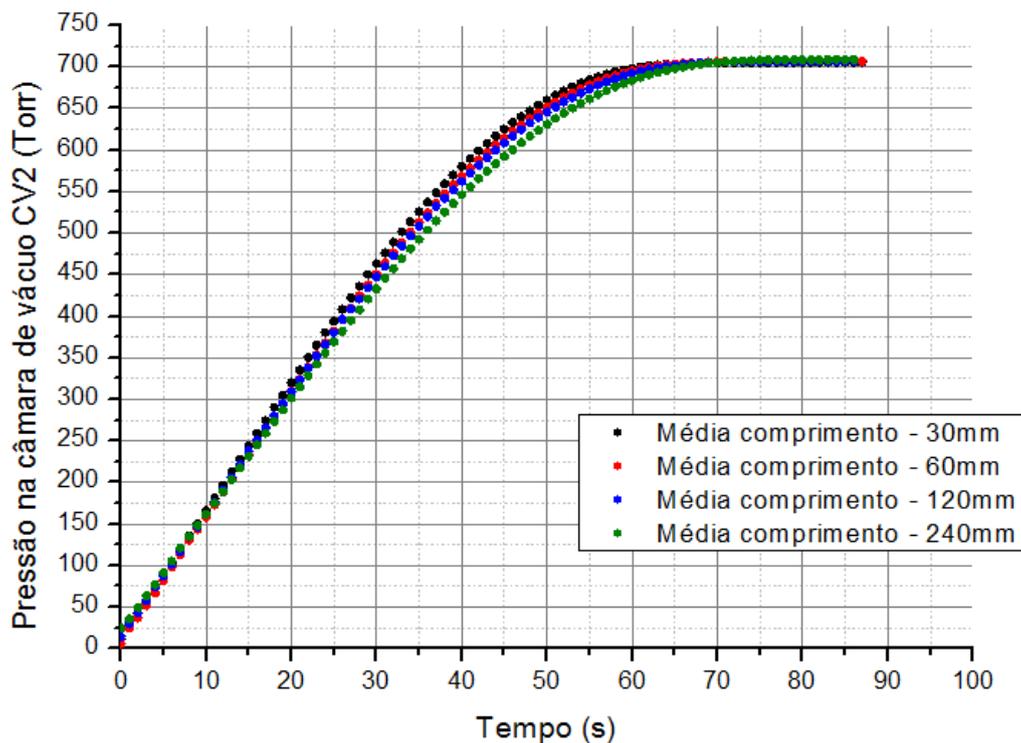


Gráfico 8: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 0,5 \text{ mm}$ ; Gás =  $CO_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 0,5\text{mm} - CO_2$

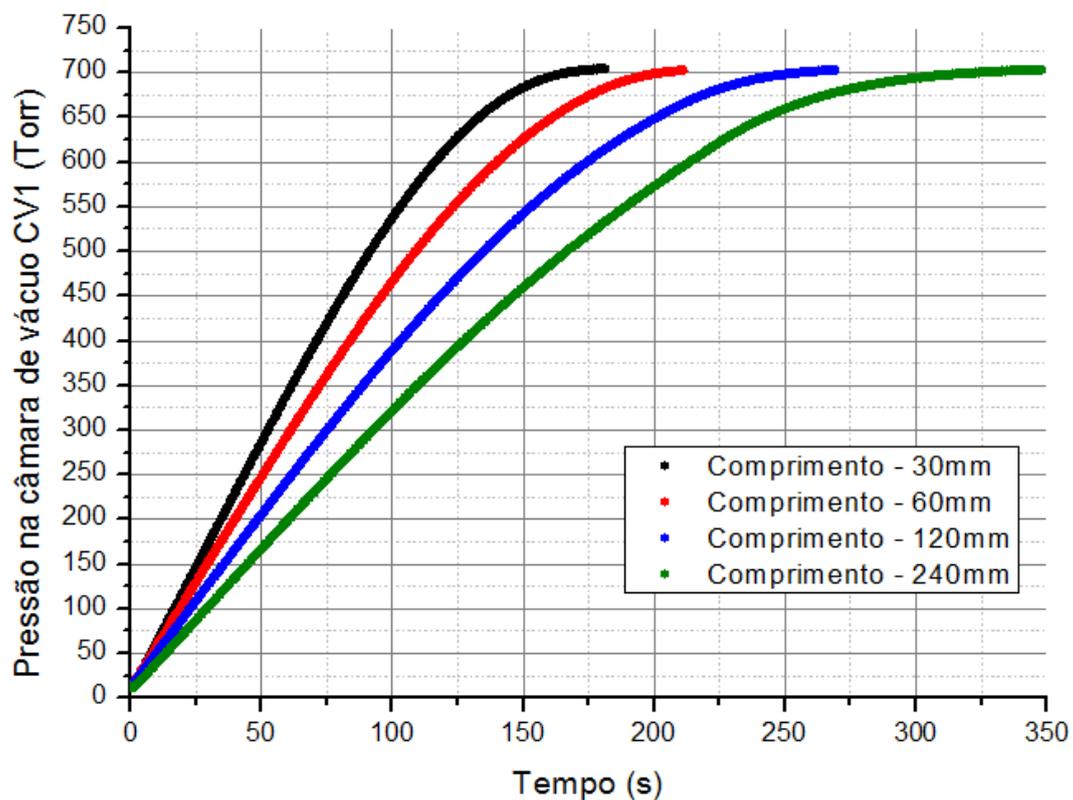


Gráfico 9: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 0,8 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 0,8\text{mm}$  -  $\text{CO}_2$

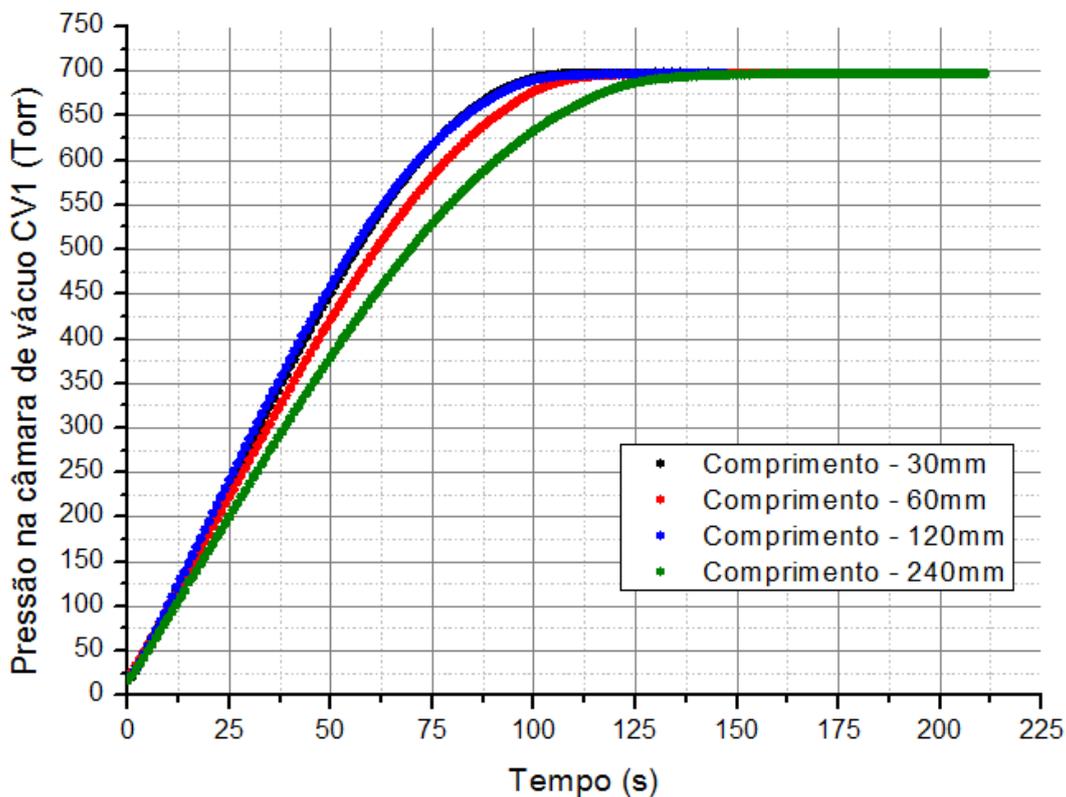


Gráfico 10: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 1,3 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 1,3\text{mm}$  -  $\text{CO}_2$

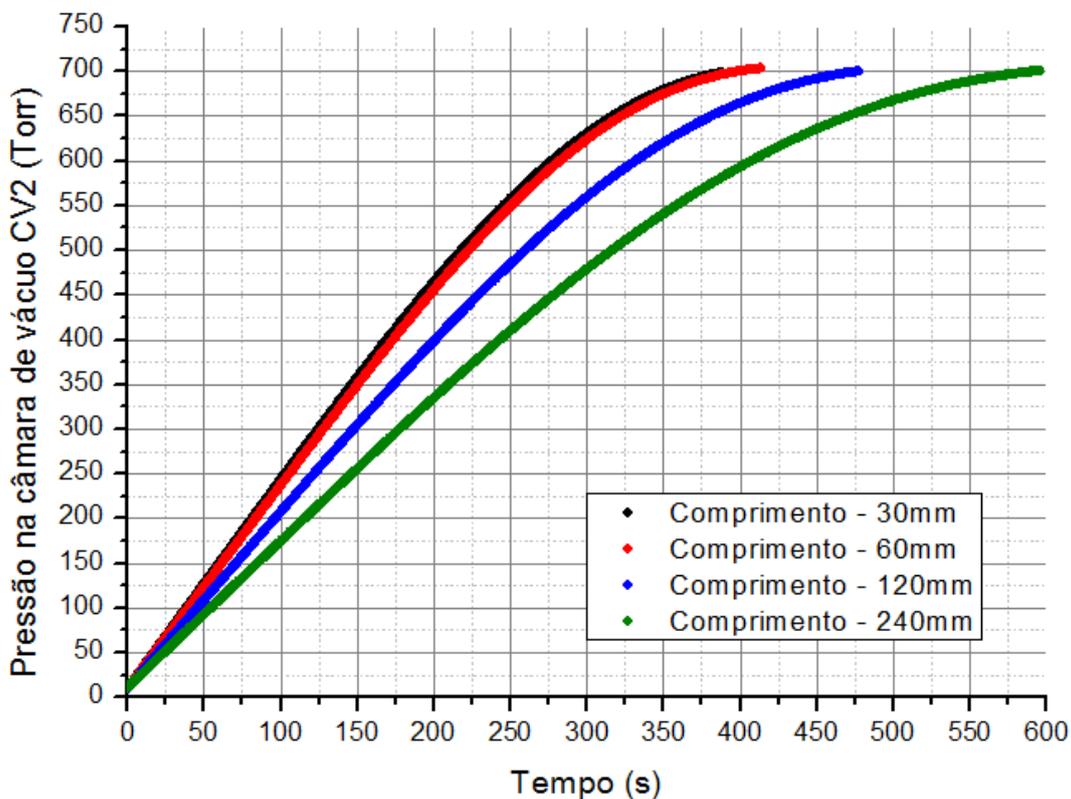
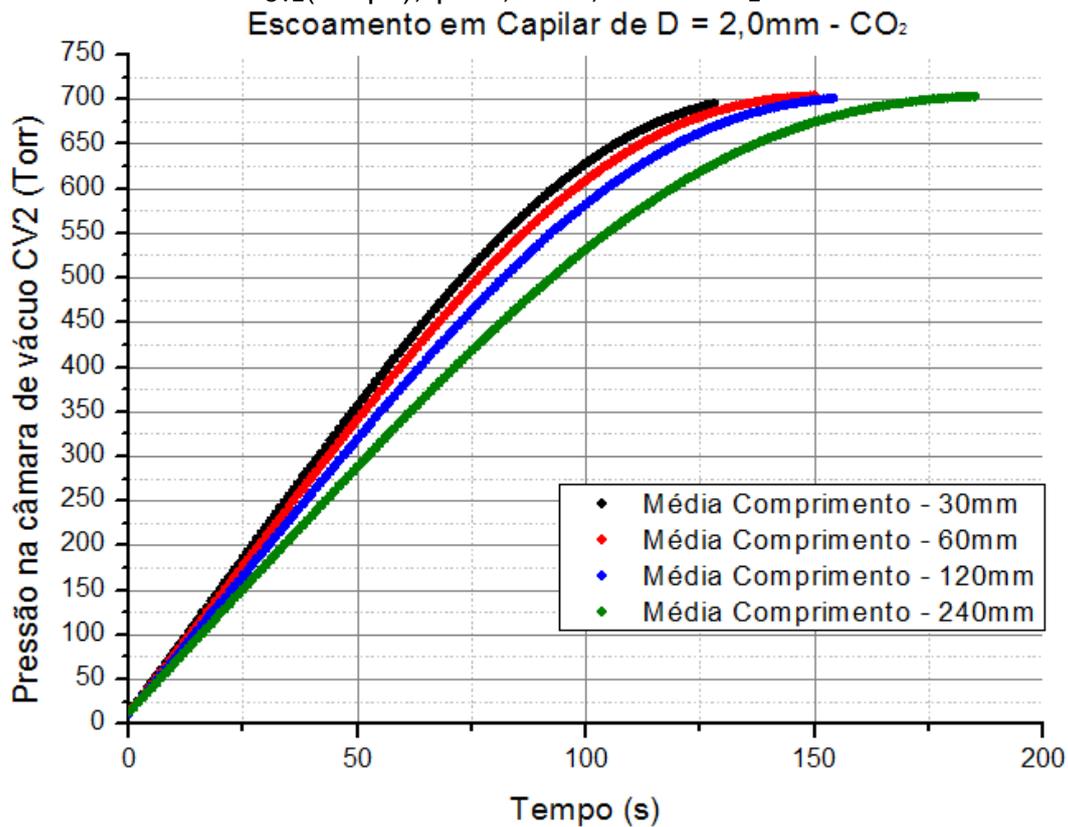
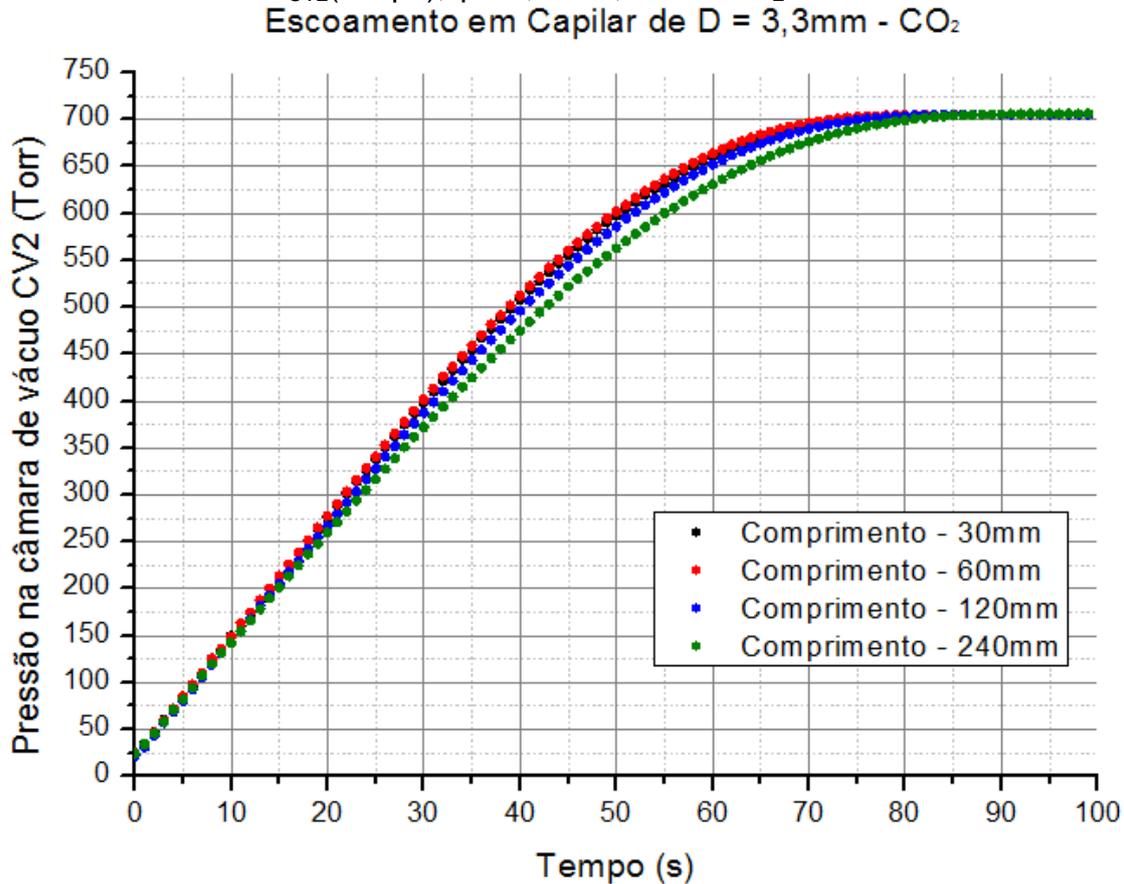


Gráfico 11: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 2,0 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .Gráfico 12: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $\phi = 3,3 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .

A partir da análise dos gráficos acima, percebe-se que, considerando um mesmo diâmetro interno, ao variar os comprimentos, os comportamentos das curvas são muito semelhantes para os dois gases. Além disso, ao observar o comportamento da variação de pressão no tempo para um diâmetro fixado, alterando-se o comprimento, nota-se que para todos os diâmetros adotados exceto o de 0,8 mm (com comprimento de 120 mm), a influência do comprimento do tubo ocorre como o esperado, de maneira que o de 30 mm permite um escoamento em menor tempo (até equilibrar as pressões de entrada e da câmara de vácuo) e à medida que é aumentado, o tempo para equilíbrio das pressões também aumenta. Ainda, nota-se que quanto menor é o diâmetro interno, mais significativo diante o comprimento ele é de modo que para os de 0,5 mm, as curvas apresentaram-se mais espaçadas e conforme se aumentava o diâmetro esse espaçamento diminuía até gerar um aglomerado (sobreposição) de curvas no caso do de 3,3 mm.

Entende-se que para capilares de menor comprimento a condutância é maior do que para os de maior comprimento, uma vez que o coeficiente angular associado à região linear destas curvas diminui a medida que se aumenta o comprimento.

Por fim, nota-se que há um menor espaçamento entre as curvas para o capilar de  $\phi = 0,8$  mm quando comparado ao das curvas de  $\phi = 1,3$  mm. Isso é devido provavelmente a influência do volume das câmaras para as quais se faz as expansões, sendo que estes 2 capilares são os de transição entre os 2 volumes, além disso, nota-se para o capilar de  $\phi = 0,8$  mm que as curvas não seguem o padrão de deslocamento apresentados para os outros capilares diante a variação do comprimento.

Em um segundo momento, optou-se por verificar a influência do diâmetro para um mesmo comprimento do capilar. No entanto, diferentemente do estudo acima, não é possível comparar todos os valores caracterizados simultaneamente, pois para os de 0,5 mm e 0,8 mm a expansão foi realizada para  $CV_1$  enquanto para os de 1,3 mm, 2,0 mm e 3,3 mm foi realizada para  $CV_2$  o que traria mais uma variável influenciando o escoamento. Desse modo, além de plotar os gráficos em função do diâmetro variado, separou-se de acordo com a câmara de vácuo utilizada para a expansão, como é encontrado nos gráficos 13 a 28 abaixo.

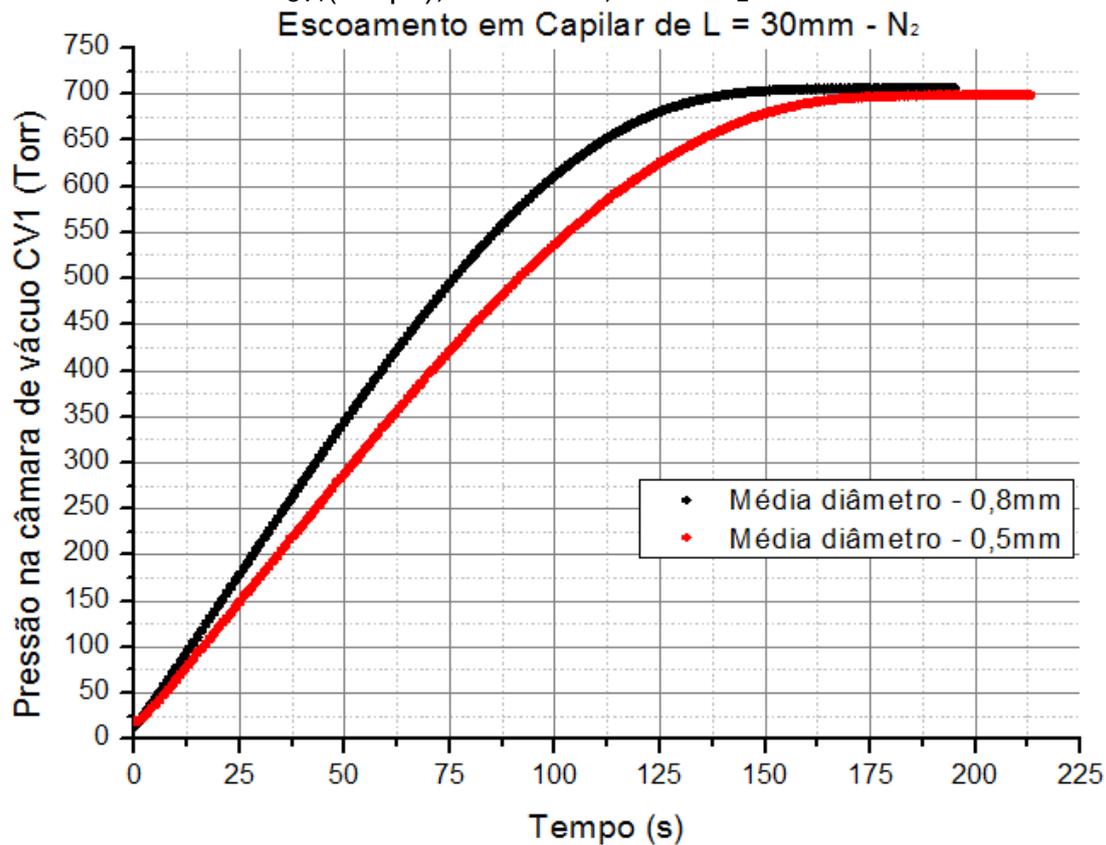
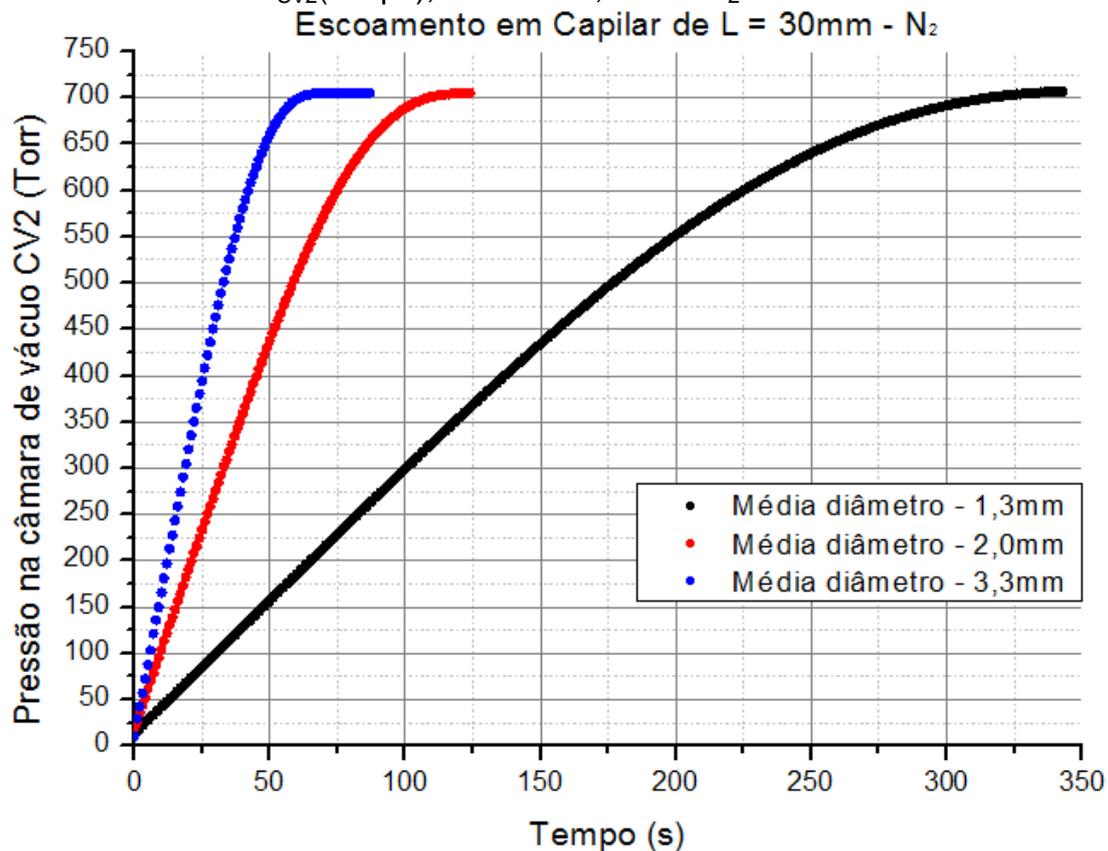
Gráfico 13: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Gráfico 14: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .

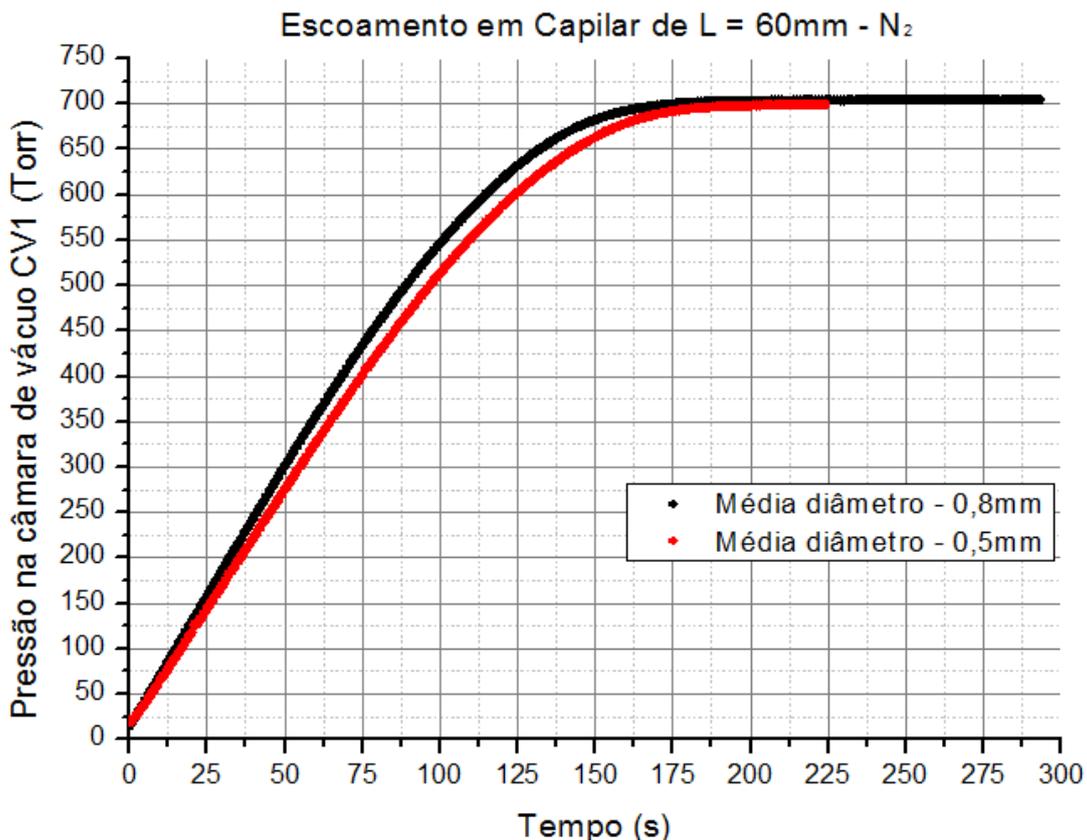
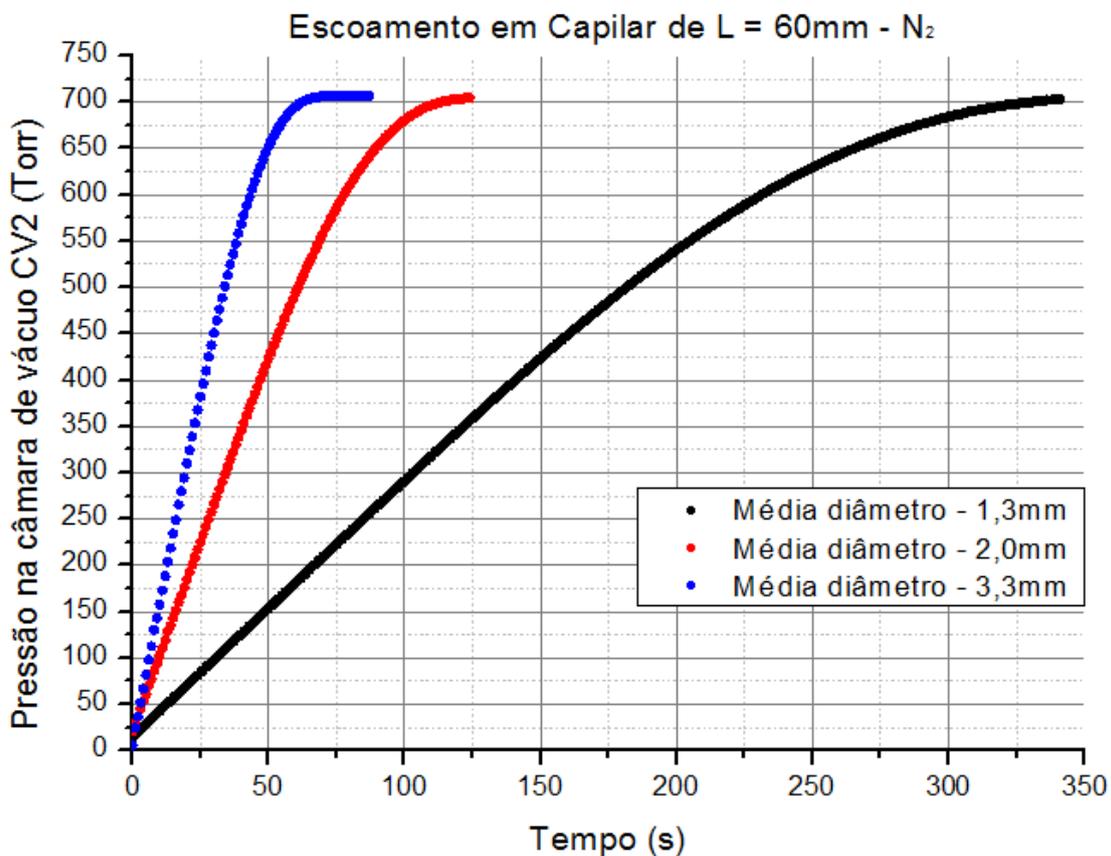
Gráfico 15: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 60 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Gráfico 16: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 60 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .

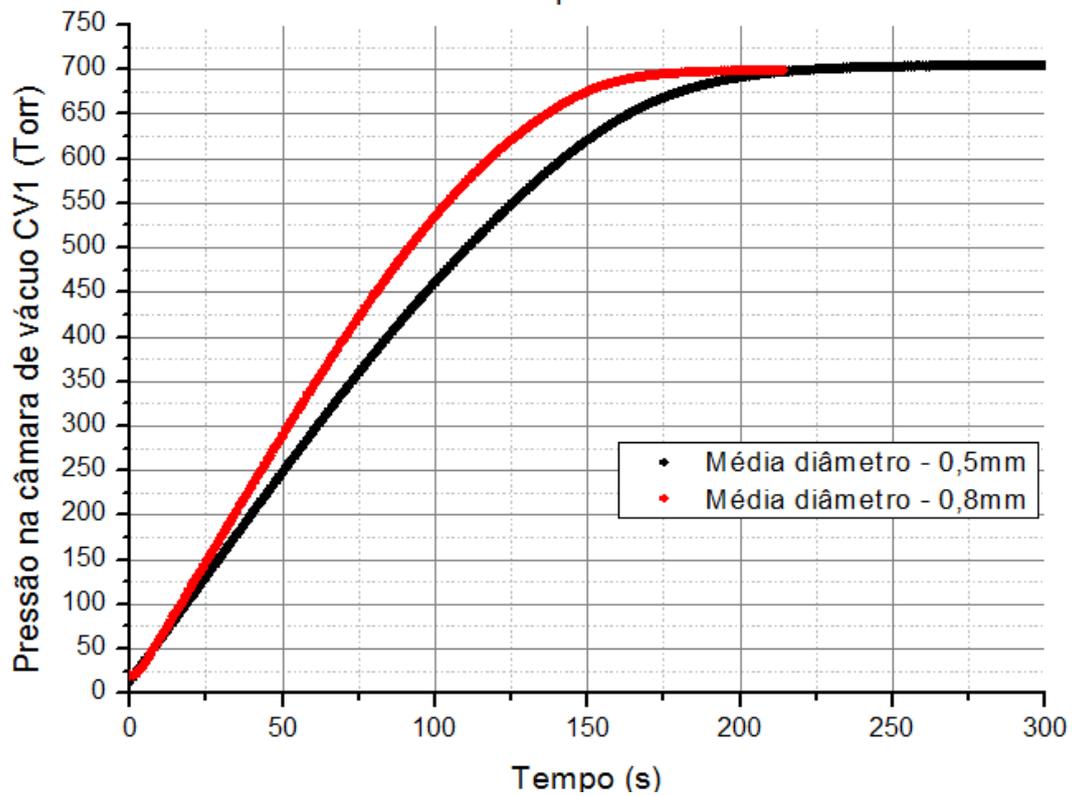
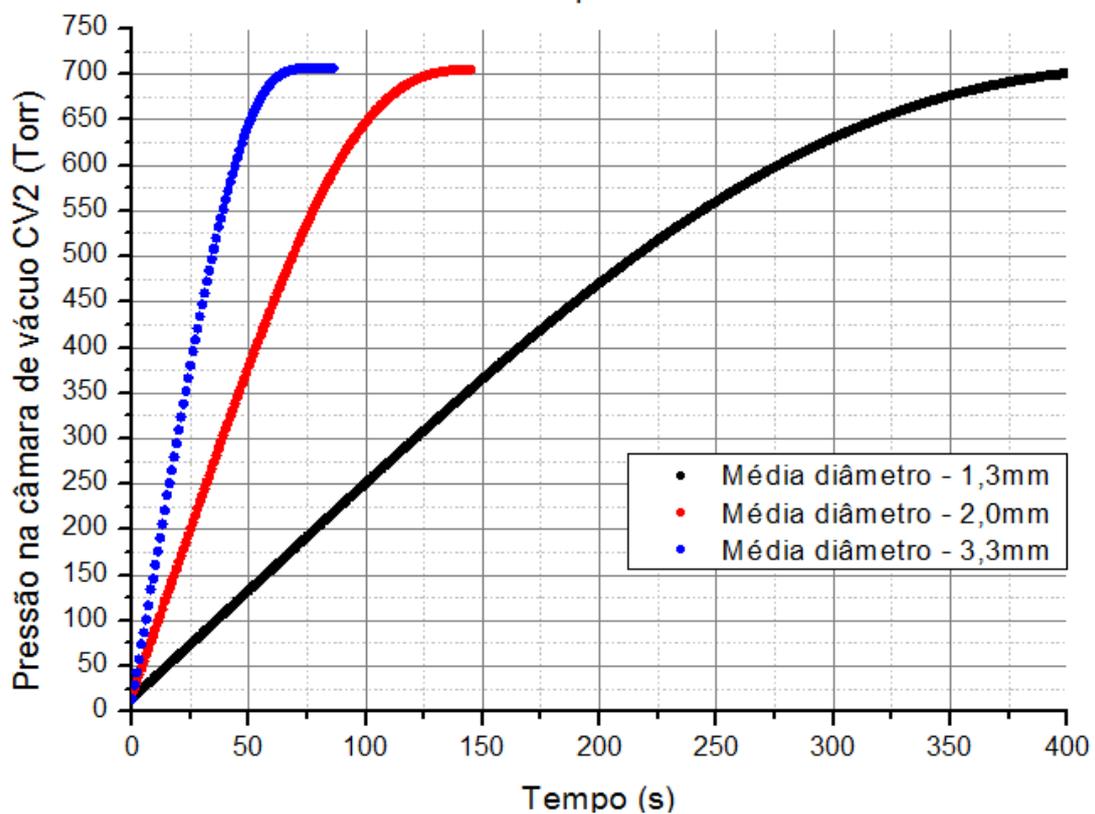
Gráfico 17: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 120 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Escoamento em Capilar de  $L = 120\text{mm} - N_2$ Gráfico 18: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 120 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Escoamento em Capilar de  $L = 120\text{mm} - N_2$ 

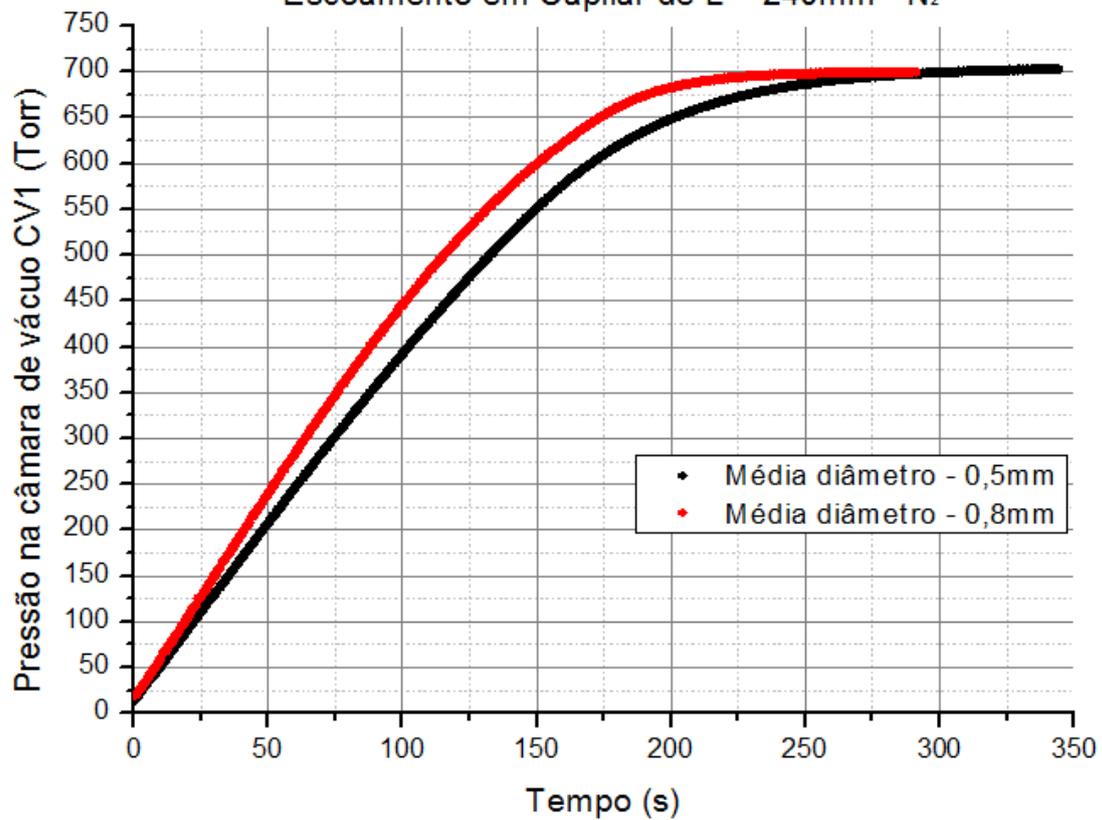
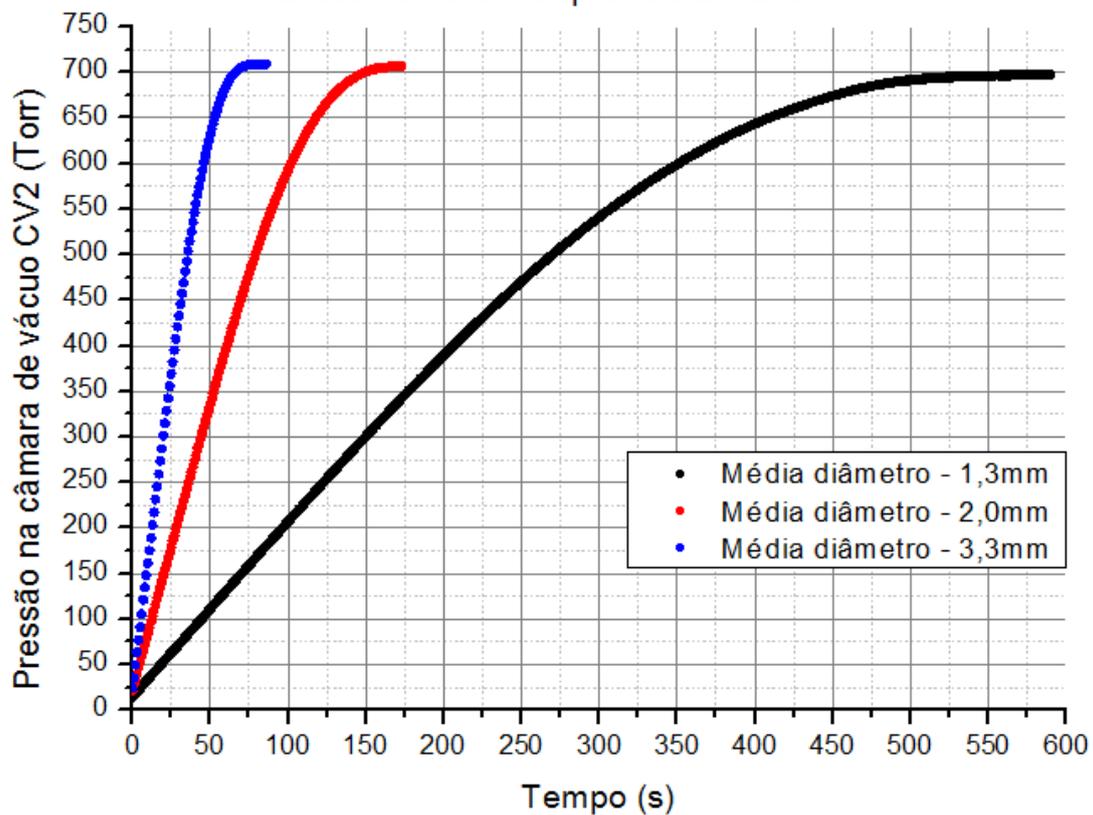
Gráfico 19: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 240 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Escoamento em Capilar de  $L = 240\text{mm} - N_2$ Gráfico 20: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 240 \text{ mm}$ ; Gás =  $N_2$ .Escoamento em Capilar de  $L = 240\text{mm} - N_2$ 

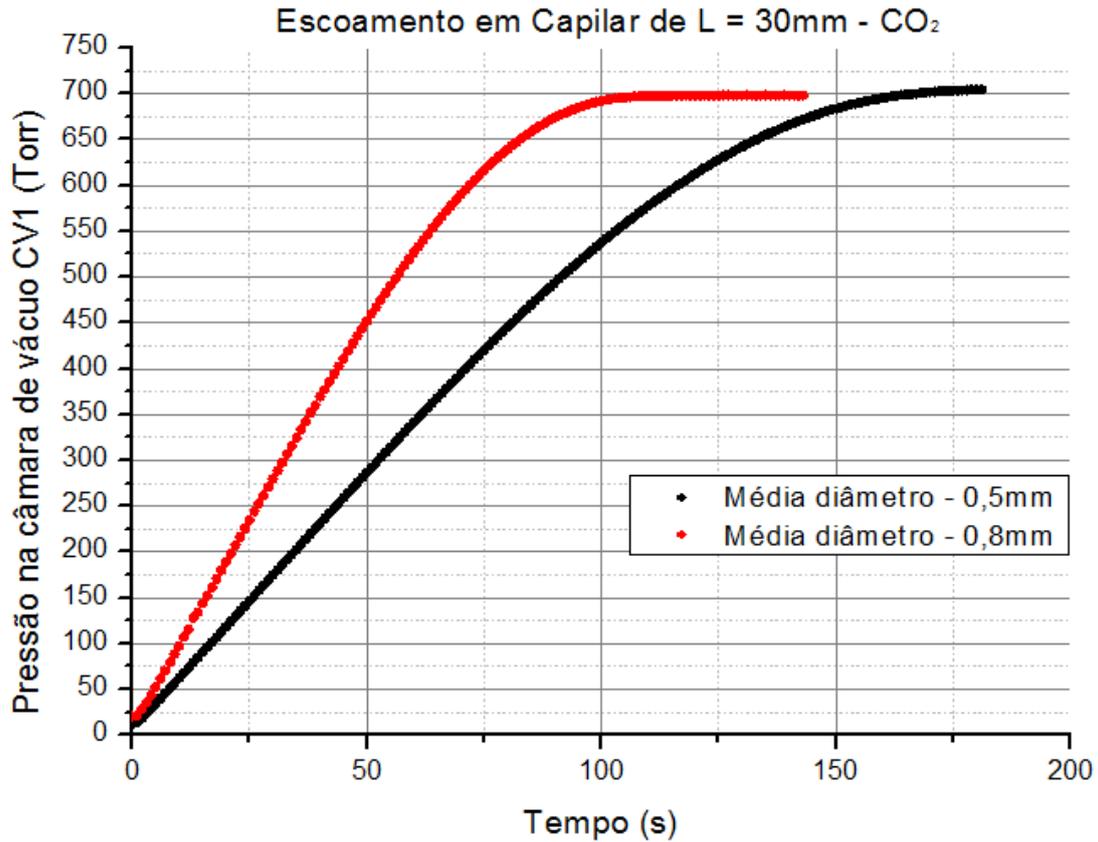
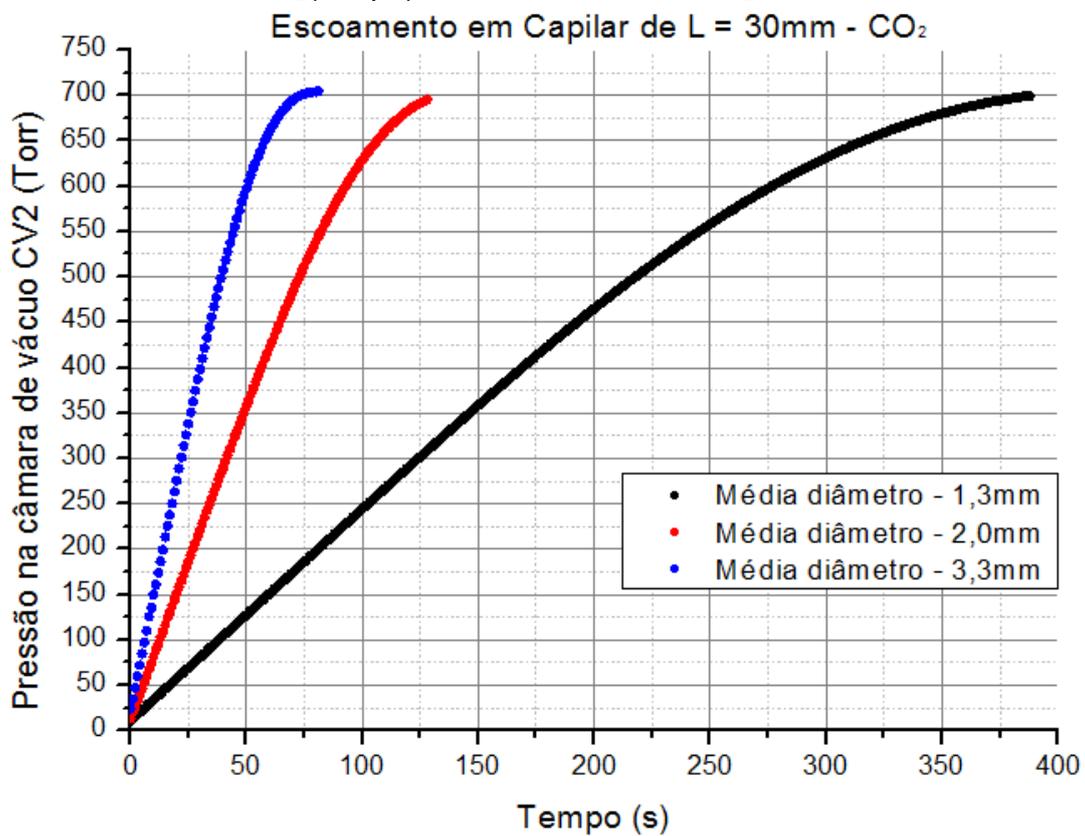
Gráfico 21: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .Gráfico 22: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .

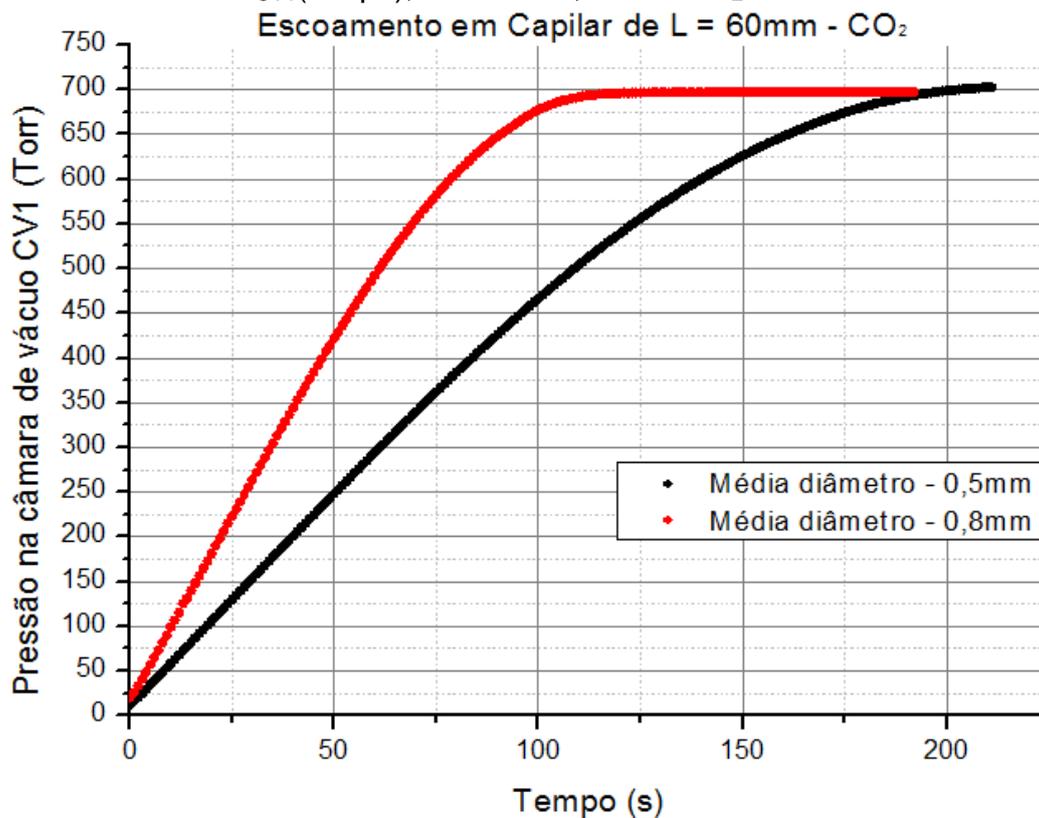
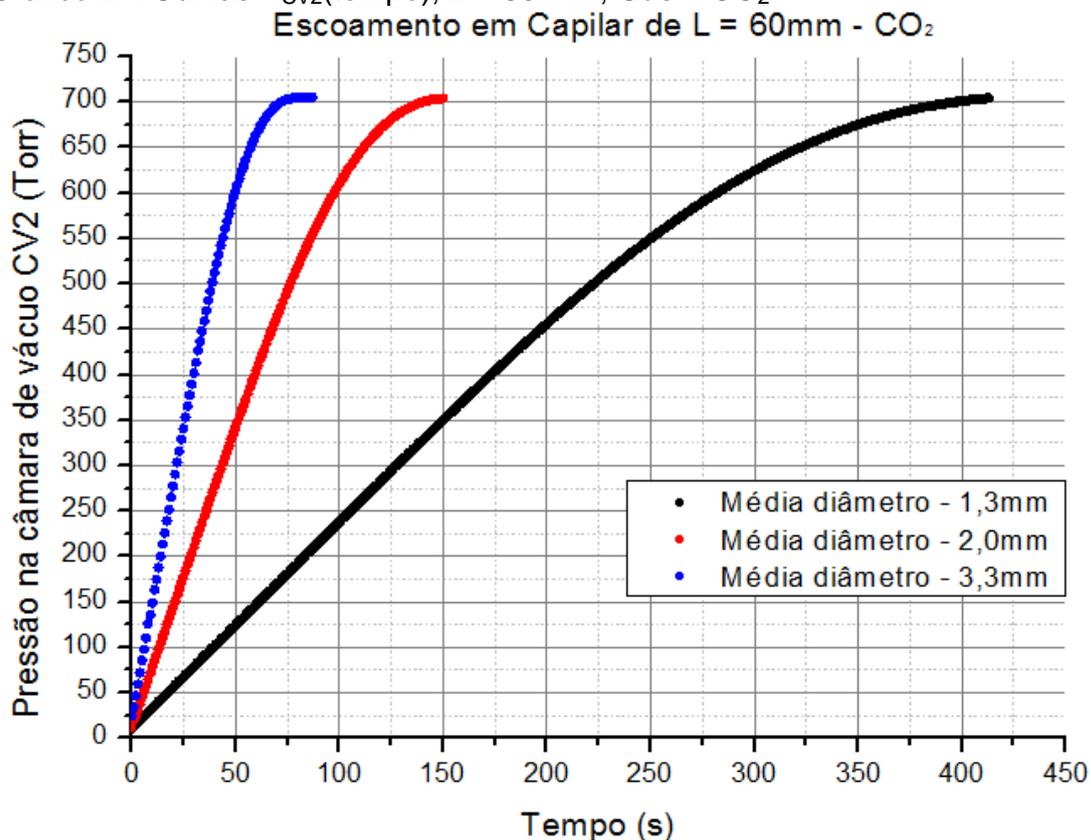
Gráfico 23: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 60 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .Gráfico 24: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 60 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .

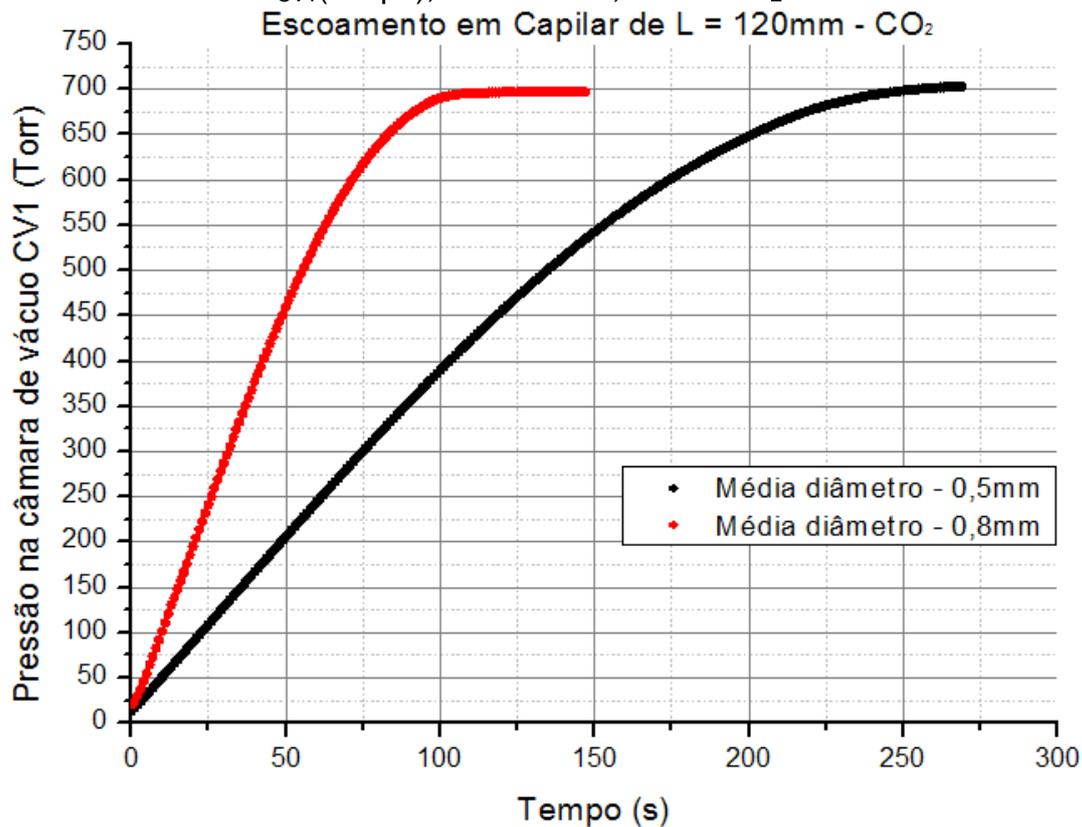
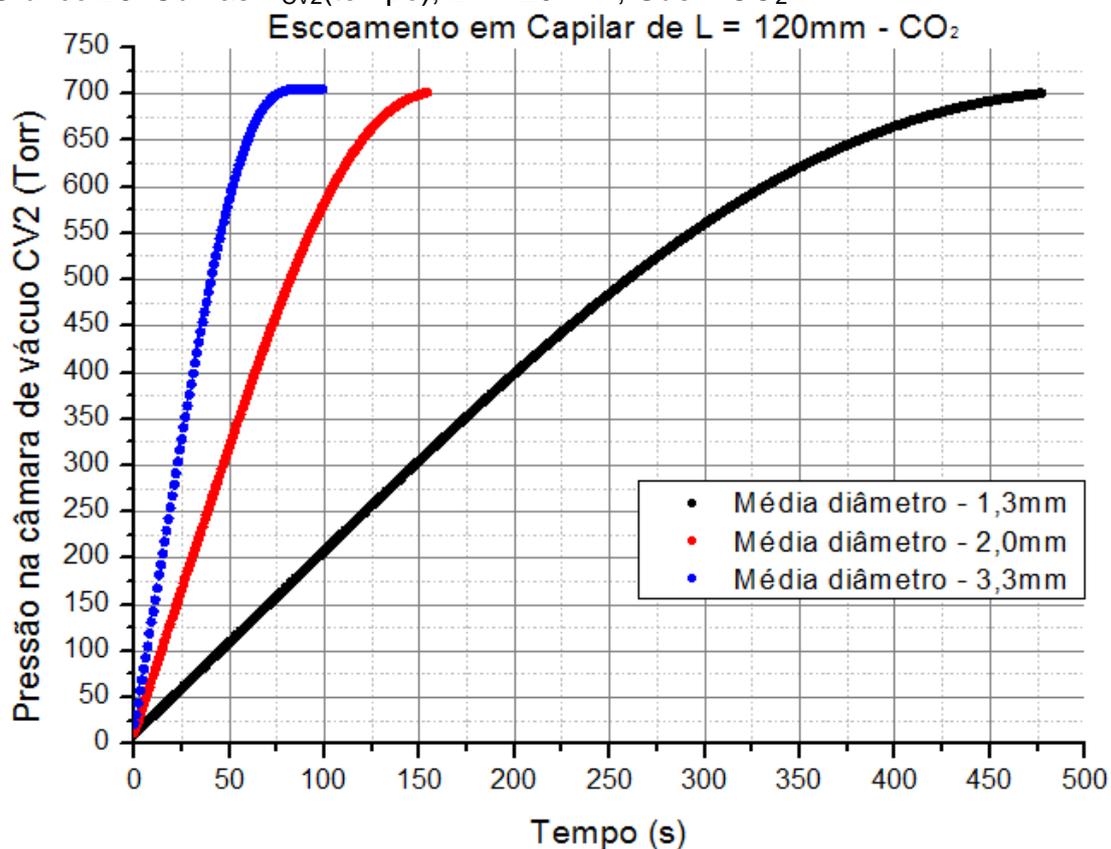
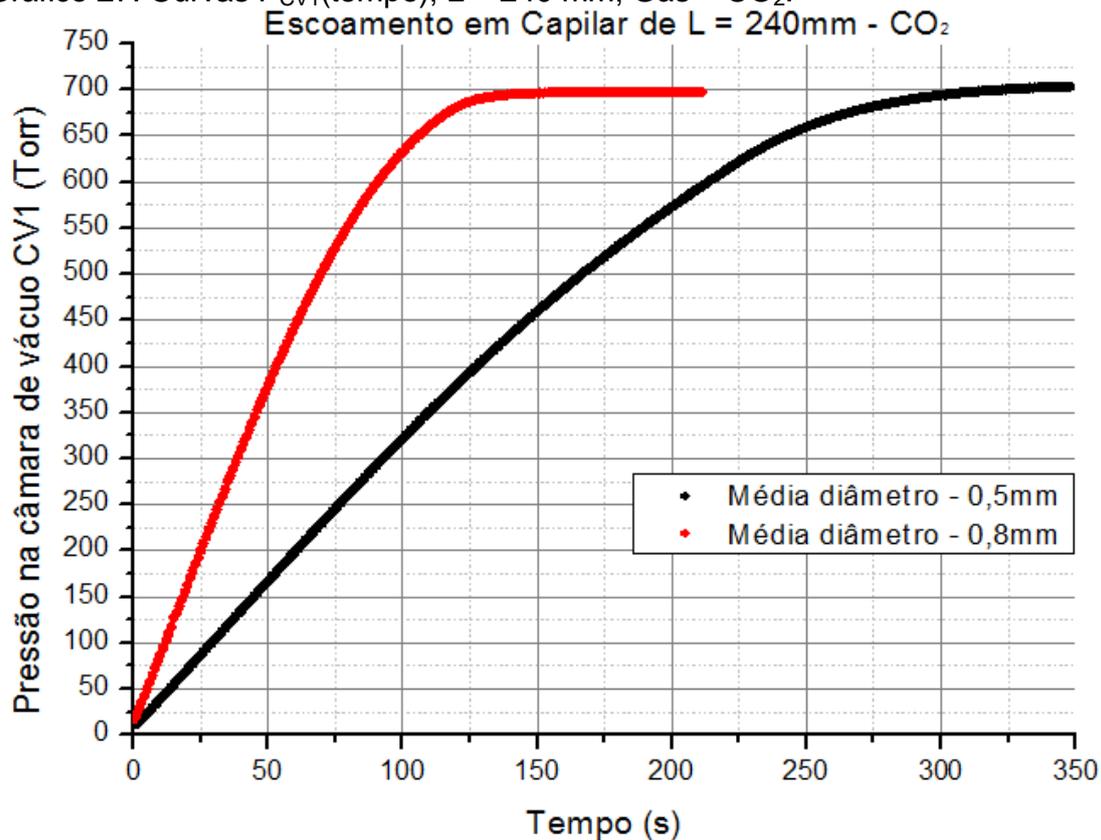
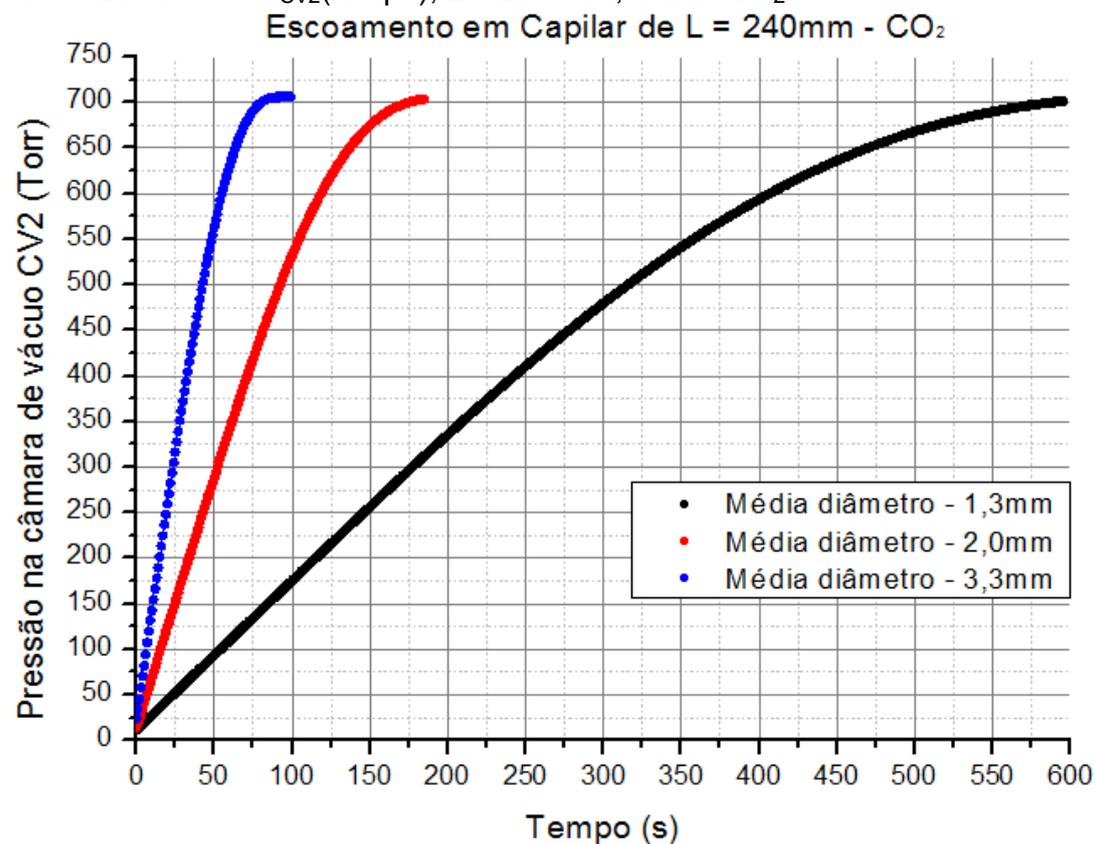
Gráfico 25: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 120 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .Gráfico 26: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 120 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .

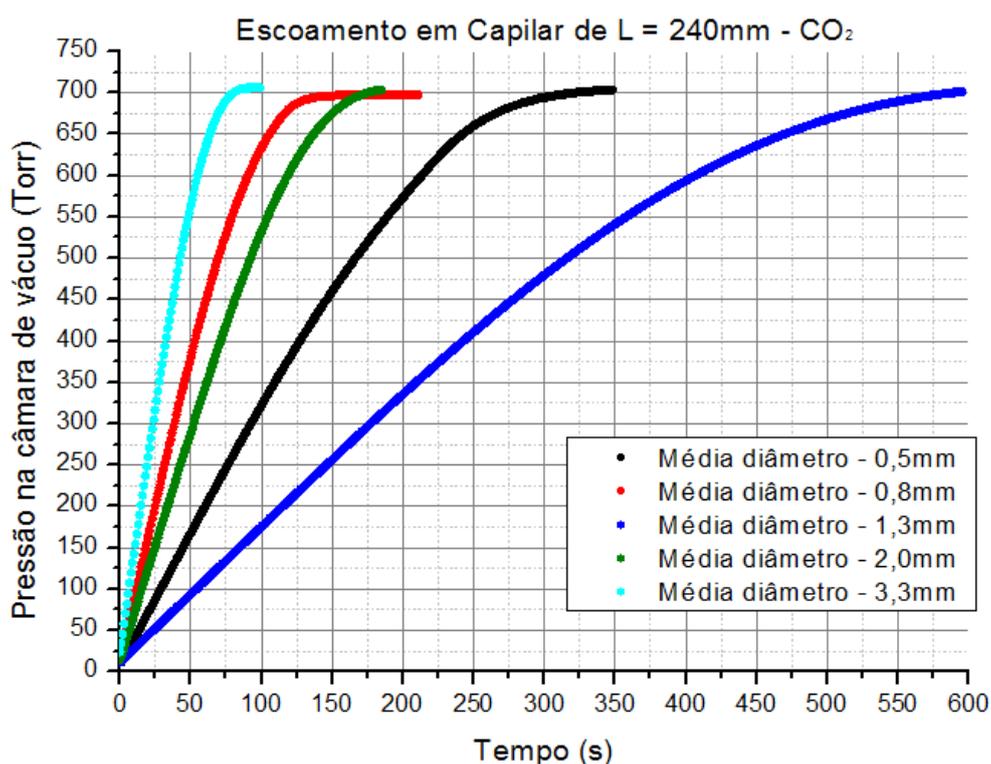
Gráfico 27: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 240 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .Gráfico 28: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 240 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .

Com base nas observações dos gráficos acima, de imediato nota-se que as curvas tendem a assumir o mesmo formato que na primeira análise seguindo um padrão, o qual demonstra que independente do comprimento, quanto maior for o diâmetro, menos tempo leva para o gás escoar (válido para os dois gases). Isto é identificado também pelo coeficiente angular correspondente a inclinação das regiões lineares das curvas que aumenta à medida que cresce o diâmetro interno do capilar.

Além disso, nota-se que o efeito da dimensão do diâmetro no escoamento é muito mais pronunciado do que o comprimento, ao considerar que o espaçamento das curvas é muito maior para o conjunto de gráficos desta segunda análise. Esse fato pode ser explicado com base na equação 17 da condutância para um tubo em regime molecular, onde se vê que o diâmetro influencia no cálculo da condutância com um fator de quarta potência, enquanto o comprimento influencia com um fator de primeira potência.

Apenas lembrando que não foram plotadas curvas com os 5 valores de diâmetros internos em um mesmo gráfico, pois há a influência do volume da câmara para a qual o gás foi expandido que desloca as curvas, como pode-se ver no gráfico 29 abaixo.

Gráfico 29: Curvas  $P_{cv}(\text{tempo})$ ;  $L = 240 \text{ mm}$ ; Gás =  $\text{CO}_2$ .



A terceira análise feita objetivou notar qual a influência do tipo de gás no escoamento de cada capilar. Plotando-se as curvas, como se pode ver abaixo nos gráficos 30 e 31, encontra-se o mesmo comportamento em todos os casos: o gás nitrogênio escoava sempre de modo mais rápido do que o dióxido de carbono, do mesmo modo que nas análises anteriores, isto é notado pelo coeficiente angular da parte linear da curva que é maior para o  $N_2$  e menor para o  $CO_2$ . É interessante ressaltar que este comportamento justifica o efeito da viscosidade do gás. O valor do coeficiente de viscosidade encontrado para o dióxido de carbono (137,6) é menor do que o encontrado para o nitrogênio (166,6), ou seja, o gás com menor coeficiente de viscosidade interage mais com a tubulação e demora mais tempo para escoar, e portanto, demora mais para atingir a pressão final na câmara de vácuo. (Quanto menor é o coeficiente de viscosidade maior é a interação do gás com partículas).

Gráfico 30: Curvas  $P_{CV1}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ;  $D = 0,5 \text{ mm}$ ; Gases =  $CO_2$  e  $N_2$ .

Escoamento em Capilar de  $D = 0,5 \text{ mm}$  e  $L = 30 \text{ mm}$

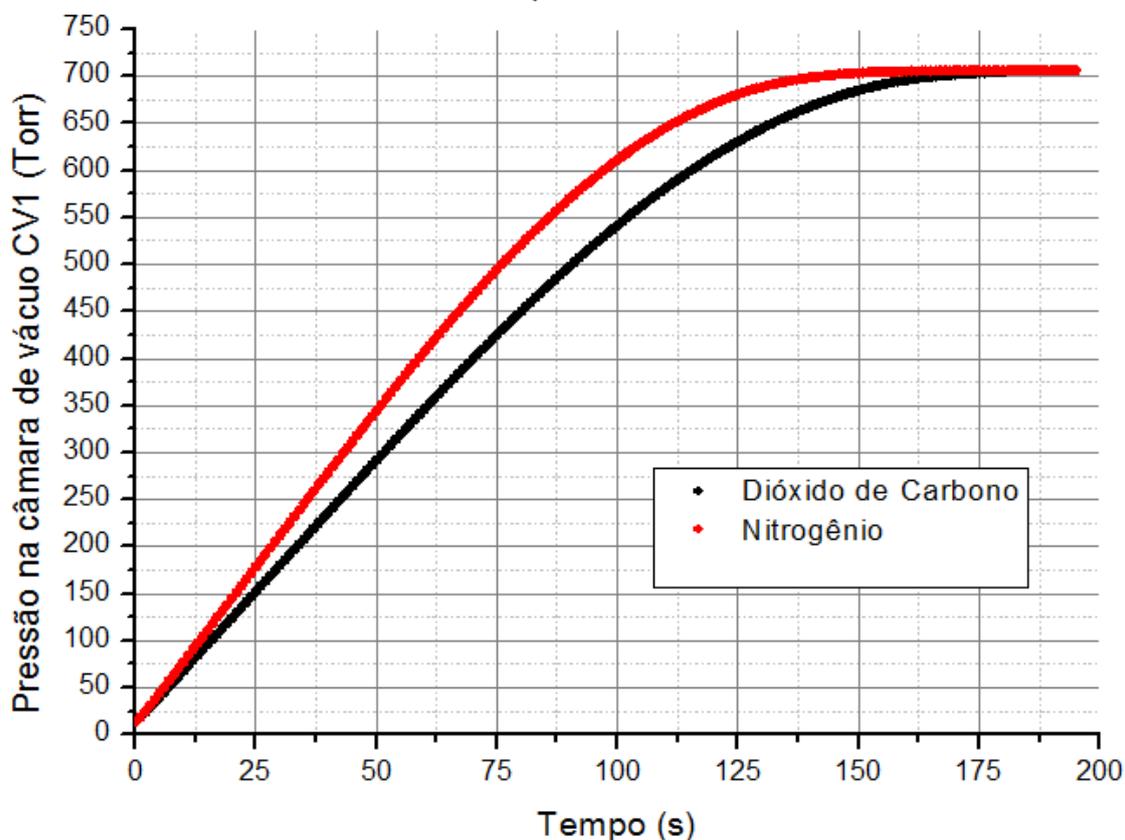
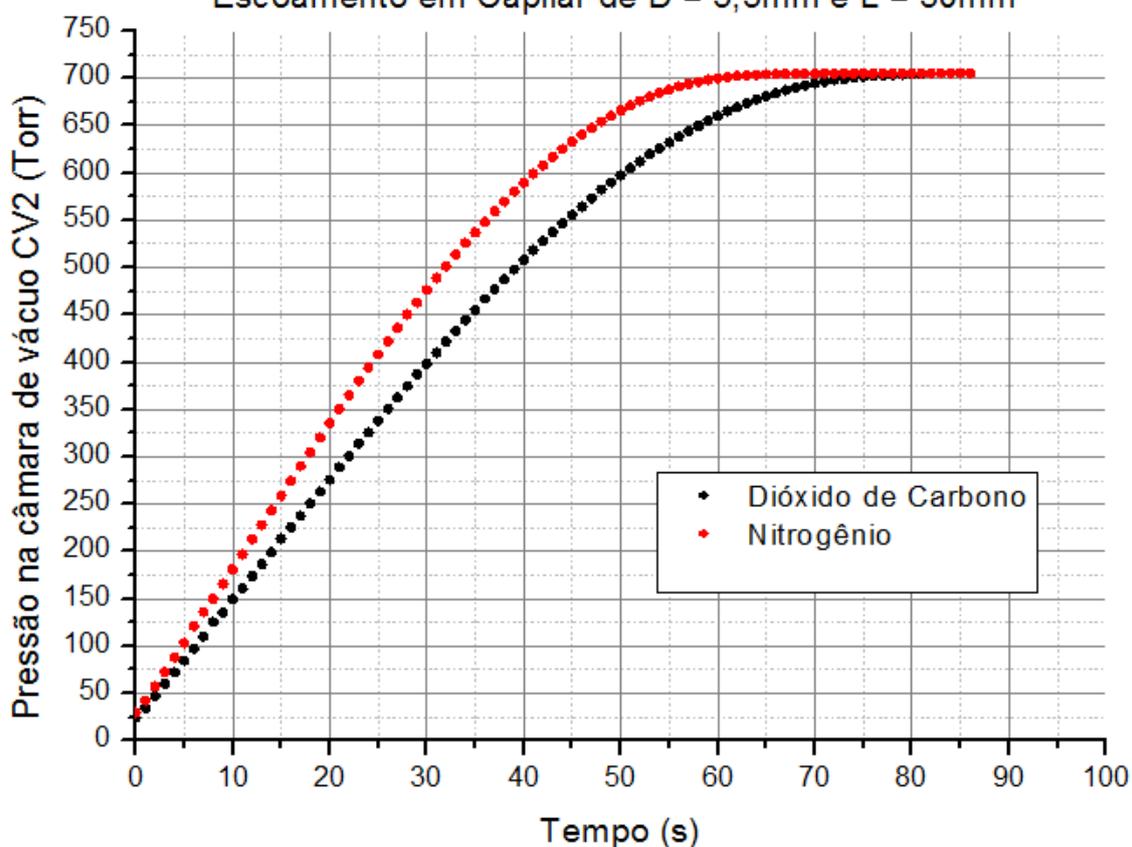


Gráfico 31: Curvas  $P_{CV2}(\text{tempo})$ ;  $L = 30 \text{ mm}$ ;  $D = 3,3 \text{ mm}$ ; Gases =  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .  
Escoamento em Capilar de  $D = 3,3 \text{ mm}$  e  $L = 30 \text{ mm}$



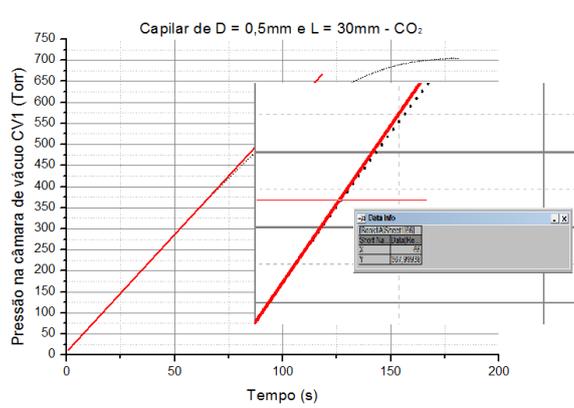
A sequência de análise dos dados se deu no estudo para determinação das razões de pressão crítica para cada curva média obtida dos capilares. Este parâmetro é obtido pela razão entre a pressão para a qual ocorre o limiar do escoamento bloqueado e a pressão de entrada. Como a pressão de entrada foi mantida constante em equilíbrio com a pressão atmosférica e medida com um manômetro de membrana capacitiva, basta determinar qual é a pressão a partir da qual se obtém escoamento bloqueado.

Para isso, foram utilizados 3 métodos a fim de se identificar qual forneceria uma melhor solução para encontrar o valor desejado. O primeiro deles se trata da derivada de uma função ajustada aos pontos para verificar até que momento esta é constante (já que a bloqueagem ocorre na região linear do escoamento e a derivada de uma reta é uma constante). No entanto devido à suscetibilidade às mínimas variações que a derivada apresenta, tornou-se inviável determinar o ponto desejado já que por se tratarem de pontos experimentais, mínimas variações causam uma mudança abrupta nela.

O segundo método, seria ajustar uma equação de reta aos pontos experimentais da região linear da curva e observar a tendência do coeficiente  $R^2$  que define estatisticamente qual a qualidade do modelo ajustado para definir uma reta. Esse coeficiente, variando de 0 a 1 pode ser obtido por uma ferramenta do software OriginPro 8.5, de modo que a tendência ao fator 1 aumenta a veracidade de que o ajuste feito é uma reta. Sendo assim, basta adicionar ponto a ponto os dados experimentais e observar a variação do  $R^2$ . No entanto, ao ser realizado percebeu-se que havia muitos pontos em que o coeficiente estava muito próximo a 1, com incerteza de centésimo de milésimo, implicando em um grande questionamento sobre qual ponto adotar, portanto não foi utilizado.

Por fim, o terceiro método proposto e adotado para identificação dos parâmetros consiste em traçar uma reta (ajustada sobre os pontos experimentais), identificando visualmente a partir de que ponto a reta não sobrepõe mais os dados e estes deixam de variar linearmente. Apesar de ser um procedimento de se executar sem grandes dificuldades é totalmente dependente da habilidade visual e do cuidado com que se analisa a curva. No entanto, como qualquer tratamento experimental possui sua incerteza atrelada a ele e nesse caso ela é dada considerando um ponto acima e um abaixo do ponto escolhido como o de estagnação para o escoamento bloqueado. O método escolhido está representado no gráfico 32 abaixo.

Gráfico 32: Representação do método de obtenção dos parâmetros de razão de pressão crítica.



A tabela 8 relaciona as razões de pressão crítica determinadas para os capilares e seus respectivos erros percentuais obtidos pela equação 33, localizada no apêndice A.

Tabela 8: Razões de pressão crítica determinadas.

Gás	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Razão de pressão crítica experimental	Erro percentual
N <sub>2</sub> (Rc=0,5266)	0,5	30	0,551 ± 0,011	-4,6
		60	0,521 ± 0,009	1,1
		120	0,442 ± 0,007	16,1
		240	0,443 ± 0,006	15,9
	0,8	30	0,569 ± 0,017	-8,0
		60	0,525 ± 0,016	0,3
		120	0,500 ± 0,018	5,0
		240	0,479 ± 0,015	9,0
	1,3	30	0,545 ± 0,004	-3,5
		60	0,521 ± 0,004	1,0
		120	0,488 ± 0,004	7,3
		240	0,462 ± 0,003	12,2
	2	30	0,600 ± 0,013	-14,0
		60	0,568 ± 0,012	-7,9
		120	0,549 ± 0,013	-4,3
		240	0,544 ± 0,011	-3,3
	3,3	30	0,713 ± 0,024	-35,4
		60	0,695 ± 0,024	-31,9
		120	0,671 ± 0,023	-27,4
		240	0,649 ± 0,022	-23,2
CO <sub>2</sub> (Rc= 0,5475)	0,5	30	0,538 ± 0,013	1,8
		60	0,489 ± 0,011	10,7
		120	0,463 ± 0,009	15,5
		240	0,457 ± 0,001	16,5
	0,8	30	0,624 ± 0,011	-14,1
		60	0,528 ± 0,011	3,5
		120	0,503 ± 0,011	8,2
		240	0,414 ± 0,009	24,5
	1,3	30	0,505 ± 0,005	7,8
		60	0,486 ± 0,005	11,3
		120	0,476 ± 0,004	13,1
		240	0,464 ± 0,003	15,2
	2	30	0,592 ± 0,016	-8,0
		60	0,588 ± 0,016	-7,4
		120	0,521 ± 0,013	4,9
		240	0,507 ± 0,012	7,3
	3,3	30	0,636 ± 0,026	-16,1
		60	0,615 ± 0,026	-12,3
		120	0,598 ± 0,026	-9,2
		240	0,527 ± 0,025	3,7

Partindo dos valores encontrados na tabela acima, prossegue-se o estudo da razão de pressão crítica (representada por  $R_c$ ) em função do comprimento e comparando-a para os dois gases utilizados, vistos nos gráficos 33 a 42 na sequência.

Gráfico 33:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,5 \text{ mm}$  –  $N_2$ .

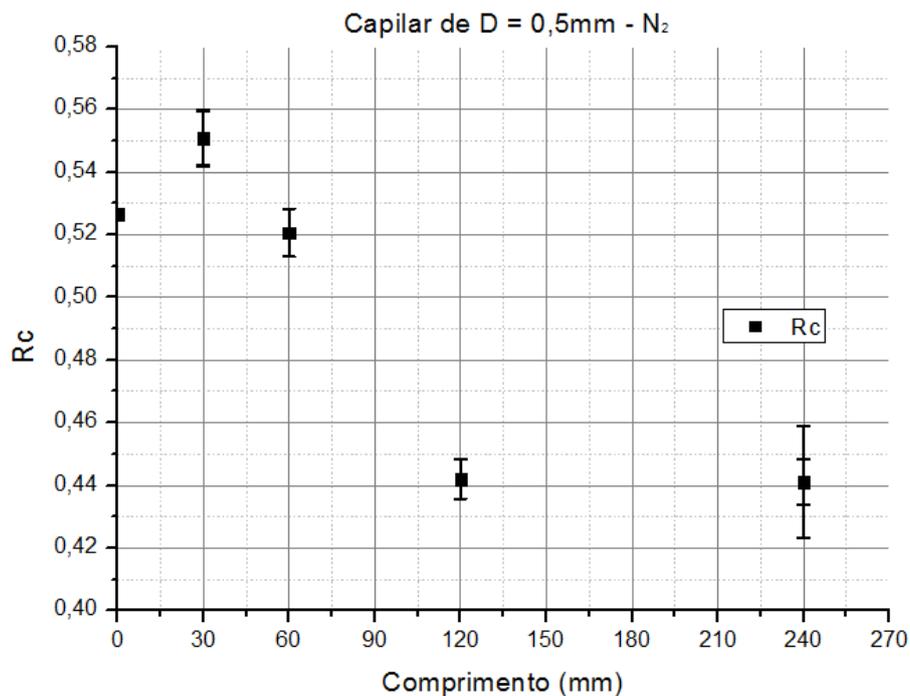


Gráfico 34:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,8 \text{ mm}$  –  $N_2$ .

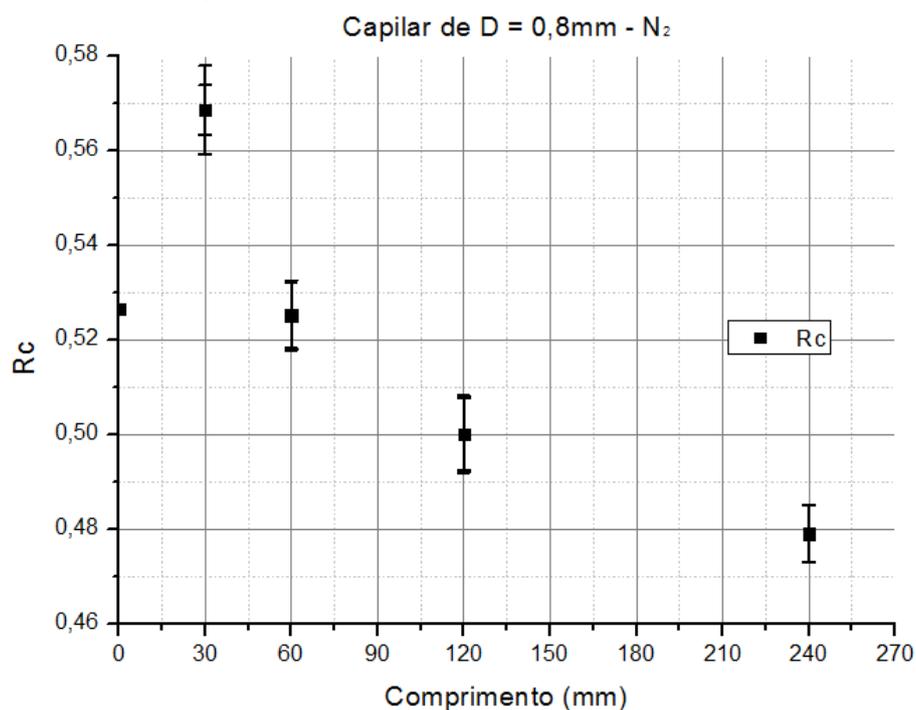


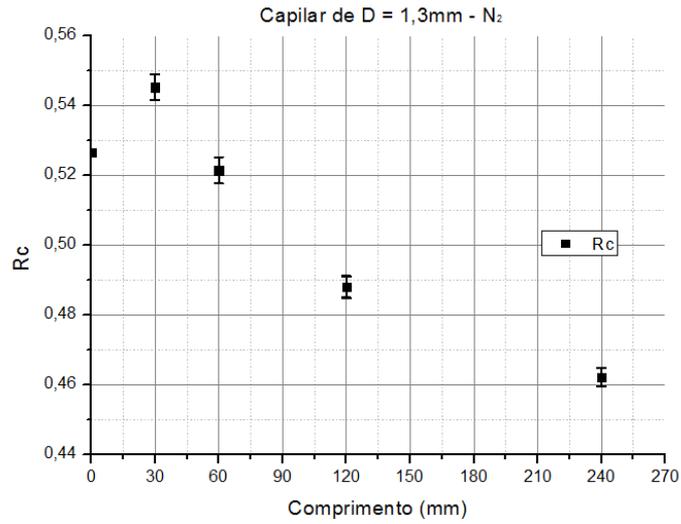
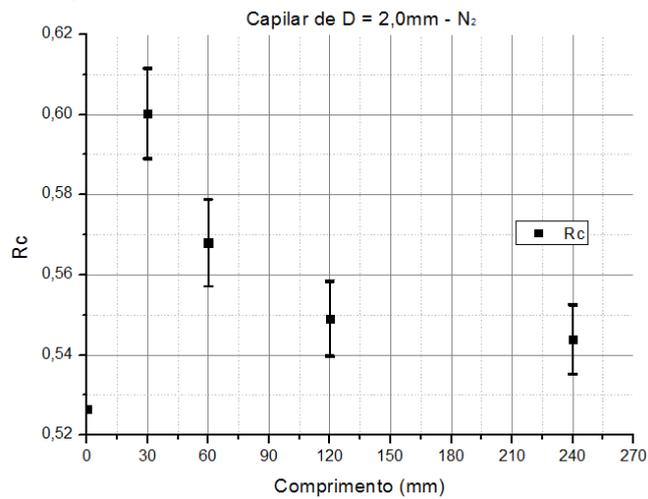
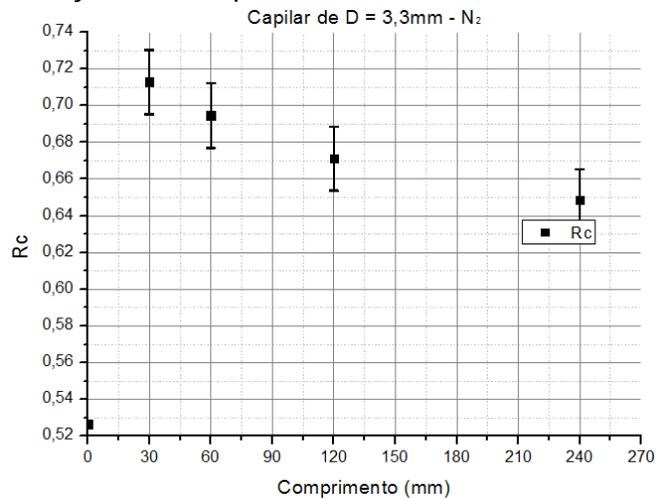
Gráfico 35:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 1,3 \text{ mm} - \text{N}_2$ .Gráfico 36:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 2,0 \text{ mm} - \text{N}_2$ .Gráfico 37:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 3,3 \text{ mm} - \text{N}_2$ .

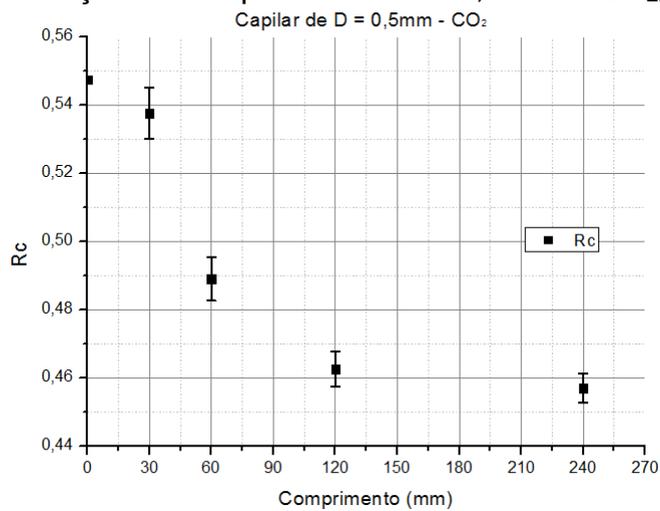
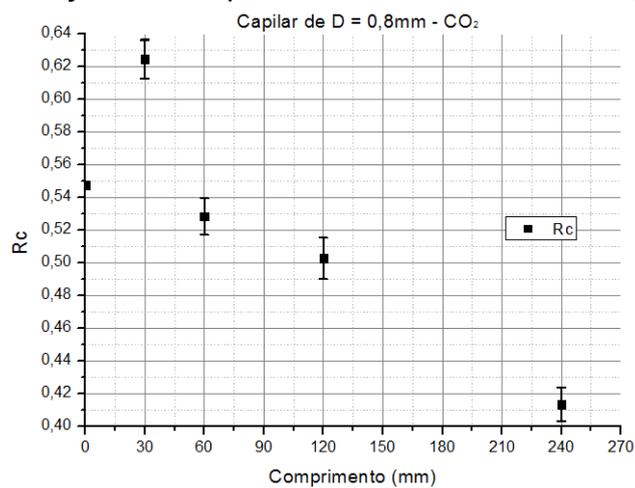
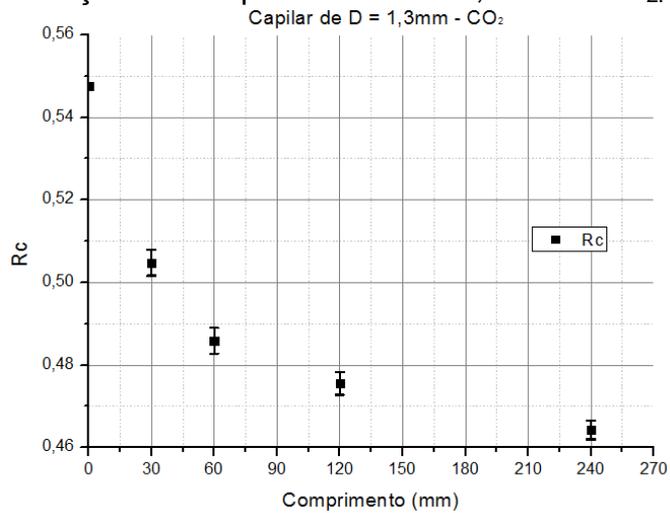
Gráfico 38:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,5 \text{ mm} - \text{CO}_2$ .Gráfico 39:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,8 \text{ mm} - \text{CO}_2$ .Gráfico 40:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 1,3 \text{ mm} - \text{CO}_2$ .

Gráfico 41:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 2,0 \text{ mm} - \text{CO}_2$ .  
Capilar de  $D = 2,0 \text{ mm} - \text{CO}_2$

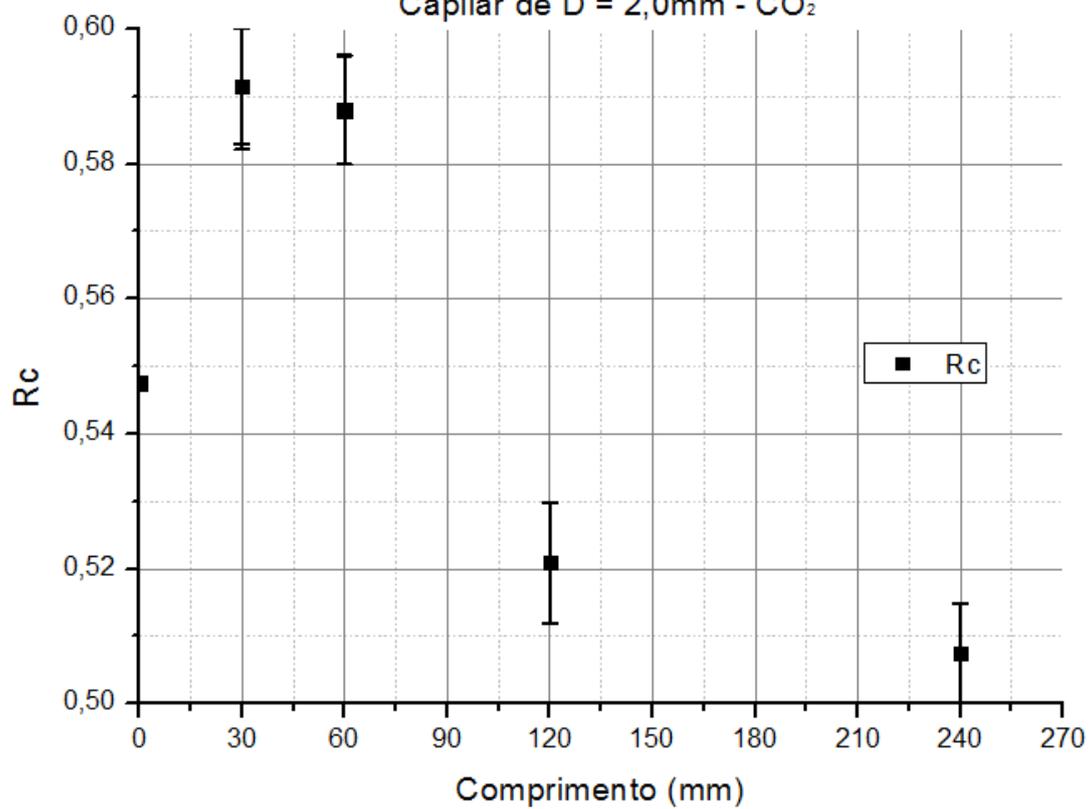
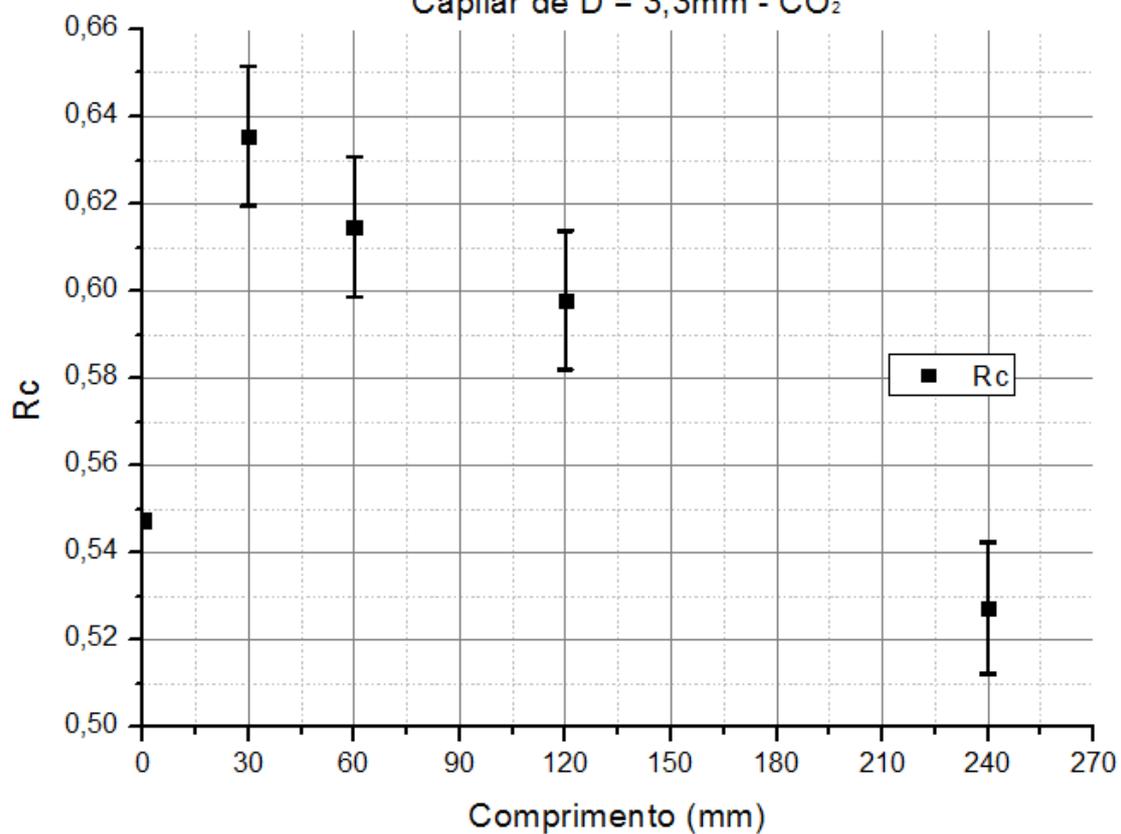


Gráfico 42:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 3,3 \text{ mm} - \text{CO}_2$ .  
Capilar de  $D = 3,3 \text{ mm} - \text{CO}_2$



A partir dos gráficos acima, percebe-se que para todos os capilares, de modo geral, há um comportamento semelhante. Em todos os casos, conforme se aumenta o comprimento o fator  $R_c$  diminui. No entanto, para alguns gráficos, como por exemplo o 42, a maioria dos fatores  $R_c$  é maior do que o  $R_c$  teórico, enquanto para outros como o gráfico 40 os fatores encontrados são menores do que o teórico.

Ainda, percebe-se que para alguns casos os pontos tendem a demonstrar comportamento linear, enquanto para outros demonstram tendência a um comportamento exponencial. No entanto, nenhuma das duas funções foi bem ajustada para estes pontos, talvez por serem poucos pontos utilizados, acabam atrelando sua incerteza como um fator significativo e impossibilitando um bom ajuste pelo software.

A princípio também nota-se a tendência dos fatores encontrados convergirem para o  $R_c$  teórico à medida que se diminui o diâmetro do capilar, sendo que para os diâmetros maiores não há essa convergência, mas um deslocamento dos pontos acima do valor experimental.

Para o caso da comparação dos  $R_c$ 's encontrados temos os gráficos 43 a 47 abaixo.

Gráfico 43:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,5 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .

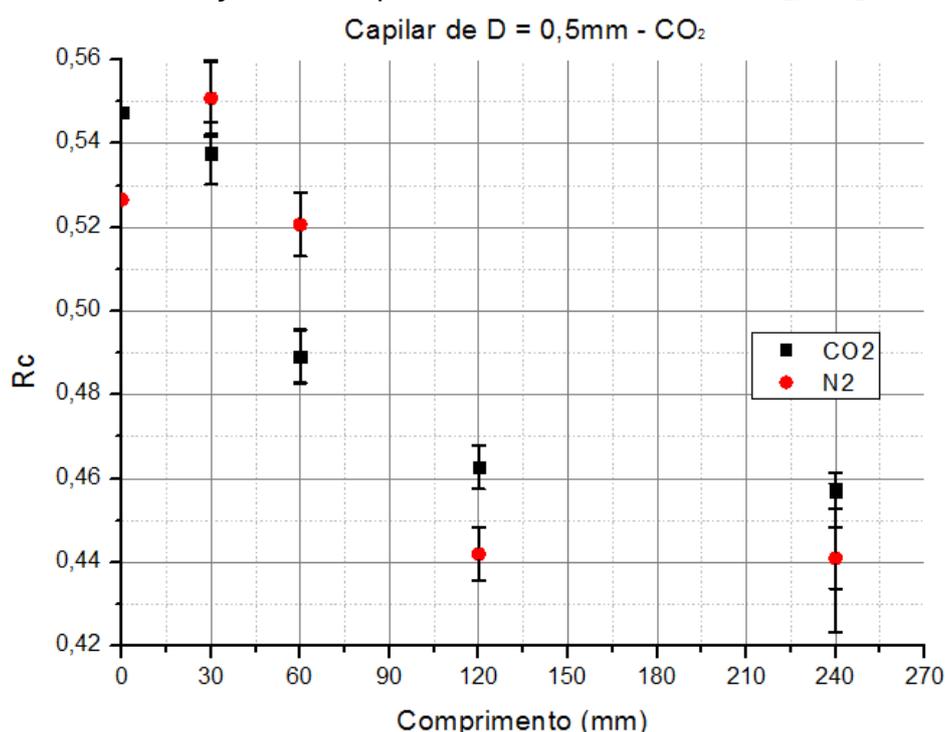


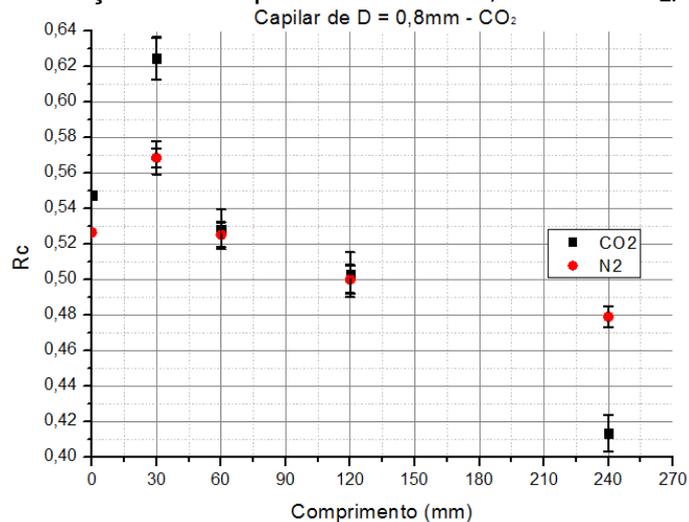
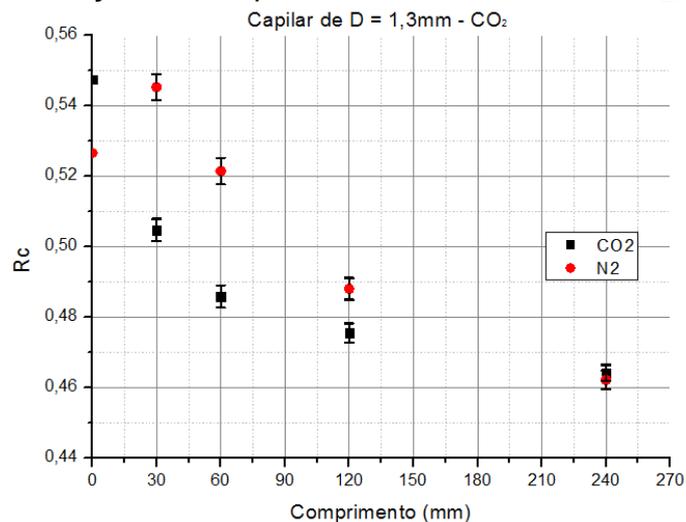
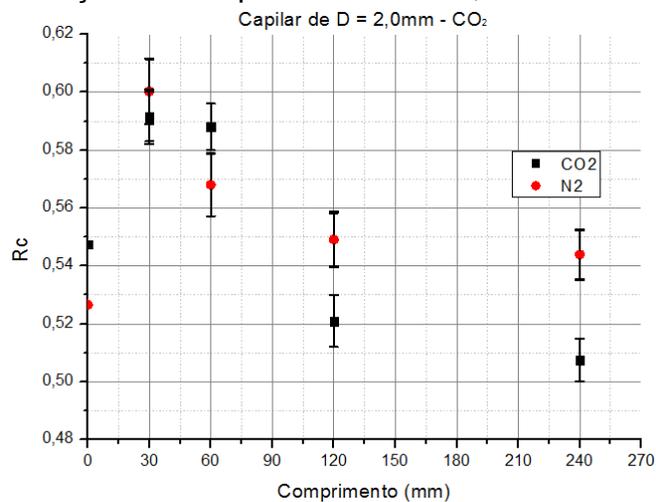
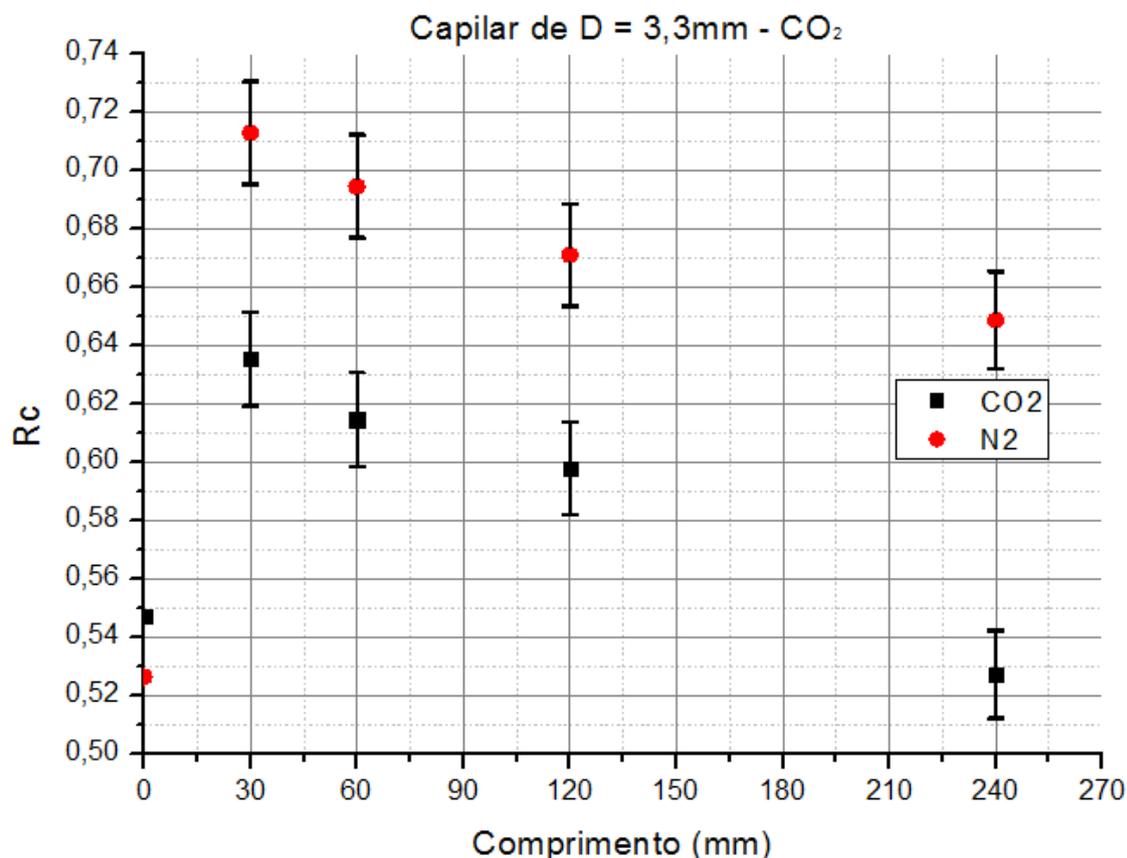
Gráfico 44:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 0,8 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .Gráfico 45:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 1,3 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .Gráfico 46:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 2,0 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .

Gráfico 47:  $R_c$  em função do comprimento –  $D = 3,3 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ .

A partir dos gráficos acima onde se compara o efeito de cada gás diante os fatores  $R_c$ , espera-se que para comprimentos pequenos os parâmetros críticos dos dois gases se aproximem e conforme é aumentado o comprimento (distancia-se de um orifício) se afastem, como o observado nitidamente no gráfico 46. Isto é devido ao pronunciamento da viscosidade do gás à medida que o capilar se torna mais comprido e há mais interação entre as moléculas do gás e as paredes do tubo. No entanto, os outros gráficos distanciaram-se deste padrão provavelmente devido a erros aleatórios atrelados ao julgamento do ponto de estagnação. Como os pontos analisados para as diferentes situações são muito próximos, facilmente a incerteza pode influenciar no posicionamento do gráfico de modo a mascarar o padrão esperado.

Já no estudo da razão de pressão crítica ( $R_c$ ) em função do diâmetro, temos os gráficos 48 a 55 na sequência.

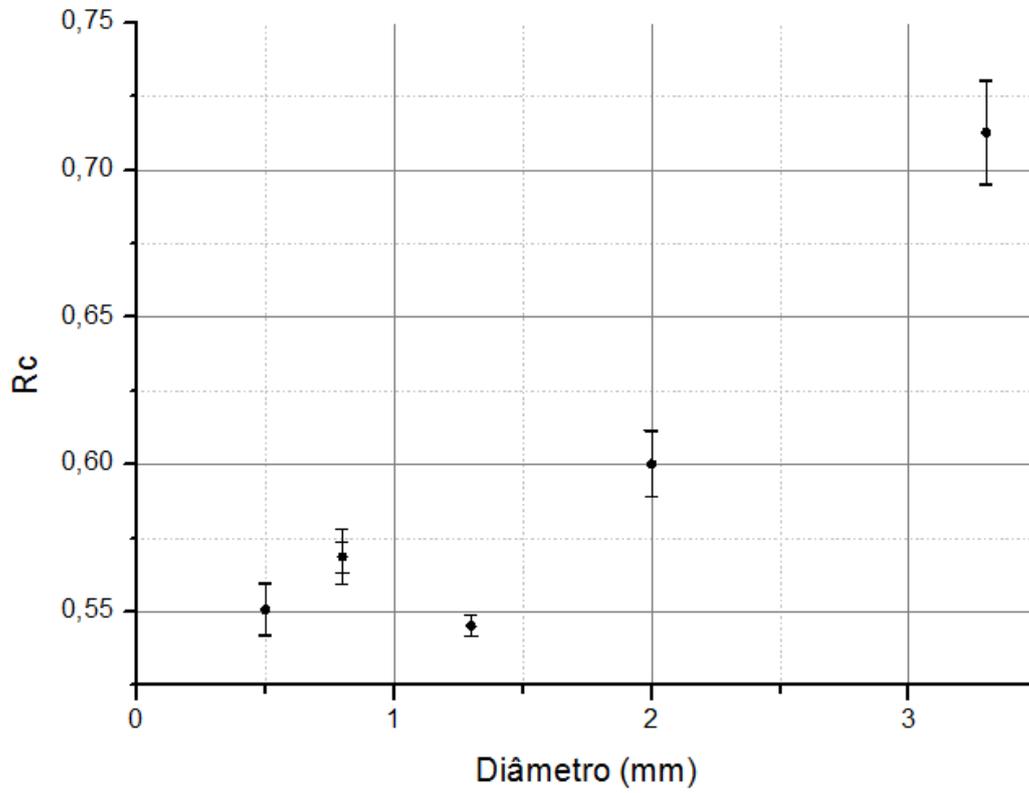
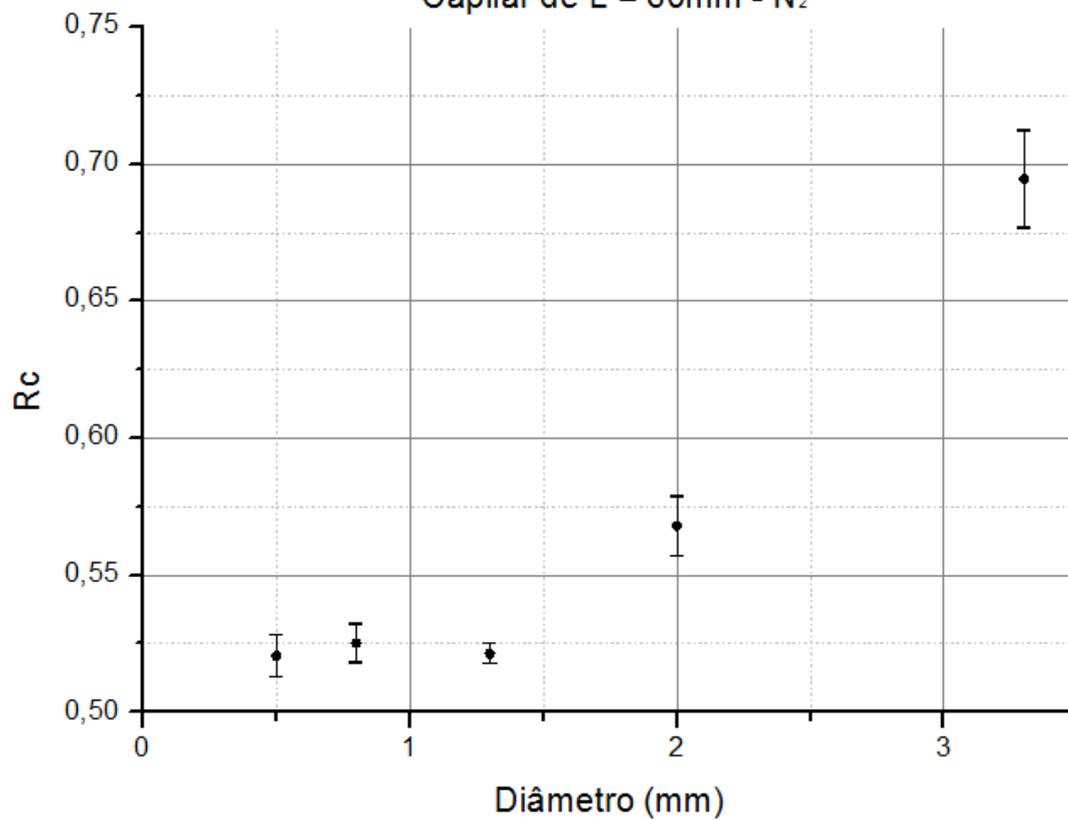
Gráfico 48:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 30 \text{ mm}$  –  $N_2$ .Capilar de  $L = 30 \text{ mm}$  -  $N_2$ Gráfico 49:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 60 \text{ mm}$  –  $N_2$ .Capilar de  $L = 60 \text{ mm}$  -  $N_2$ 

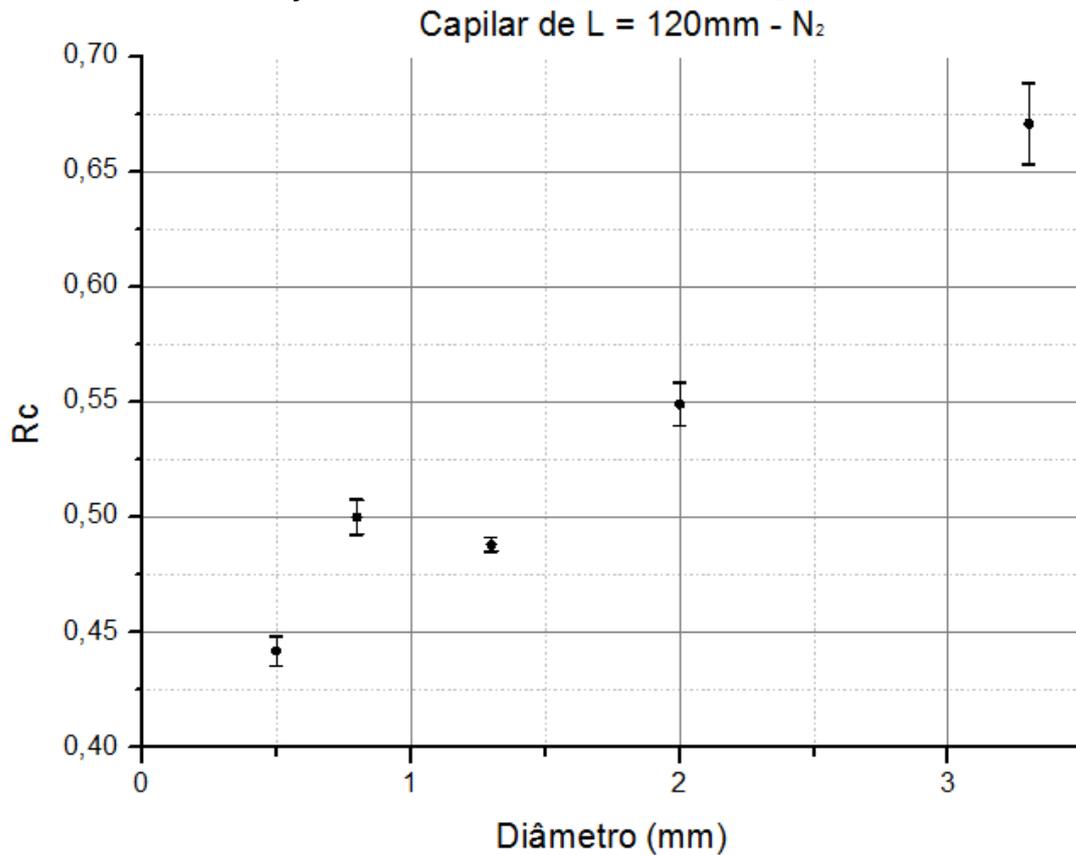
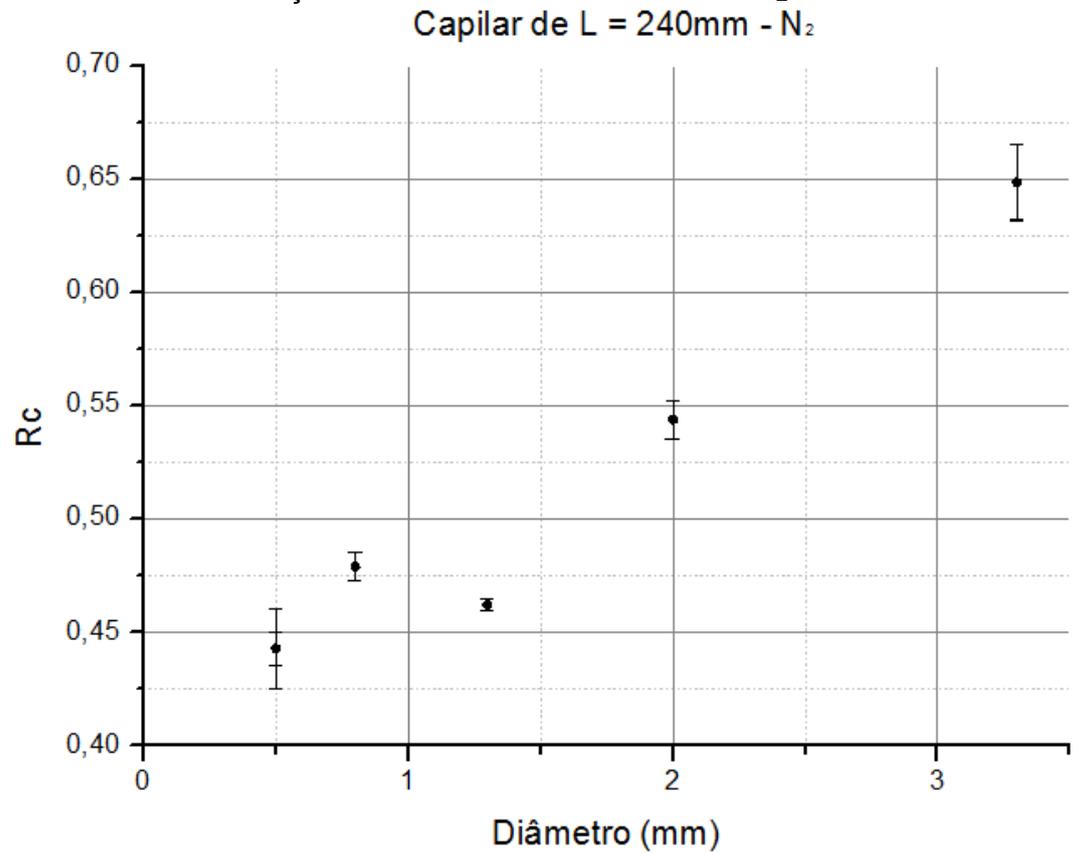
Gráfico 50:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 120 \text{ mm}$  –  $N_2$ .Gráfico 51:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 240 \text{ mm}$  –  $N_2$ .

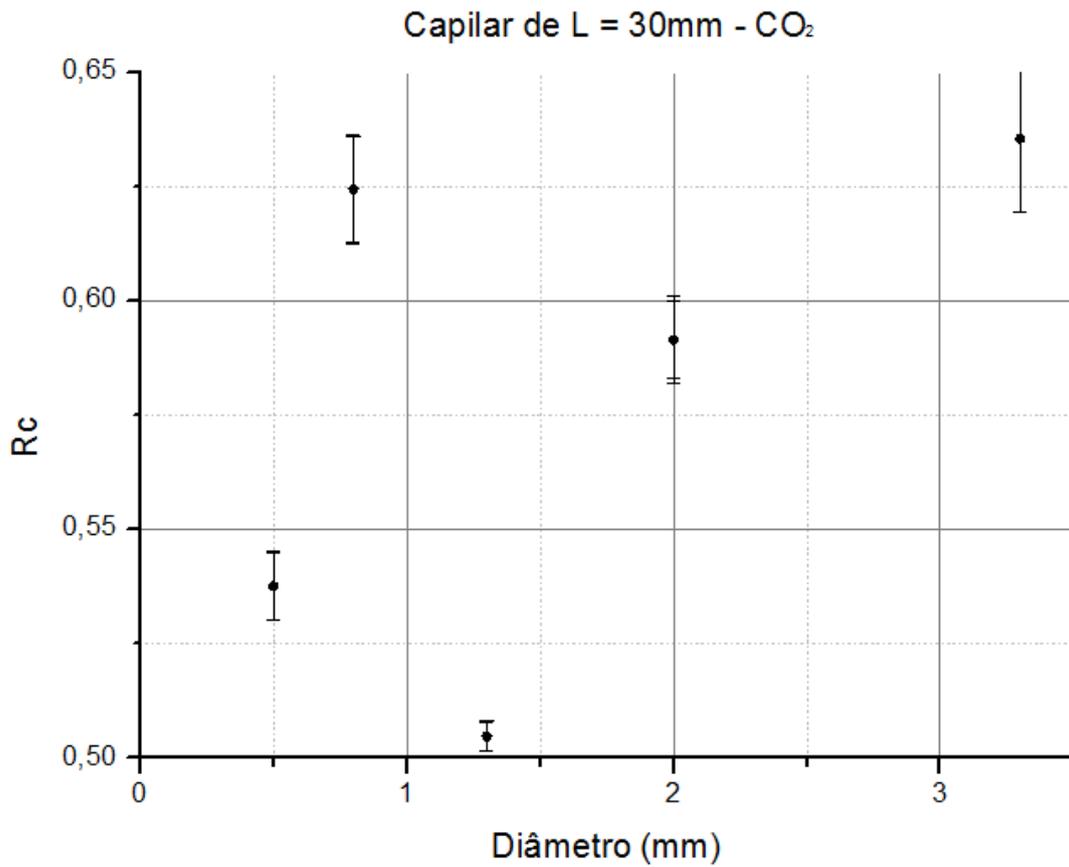
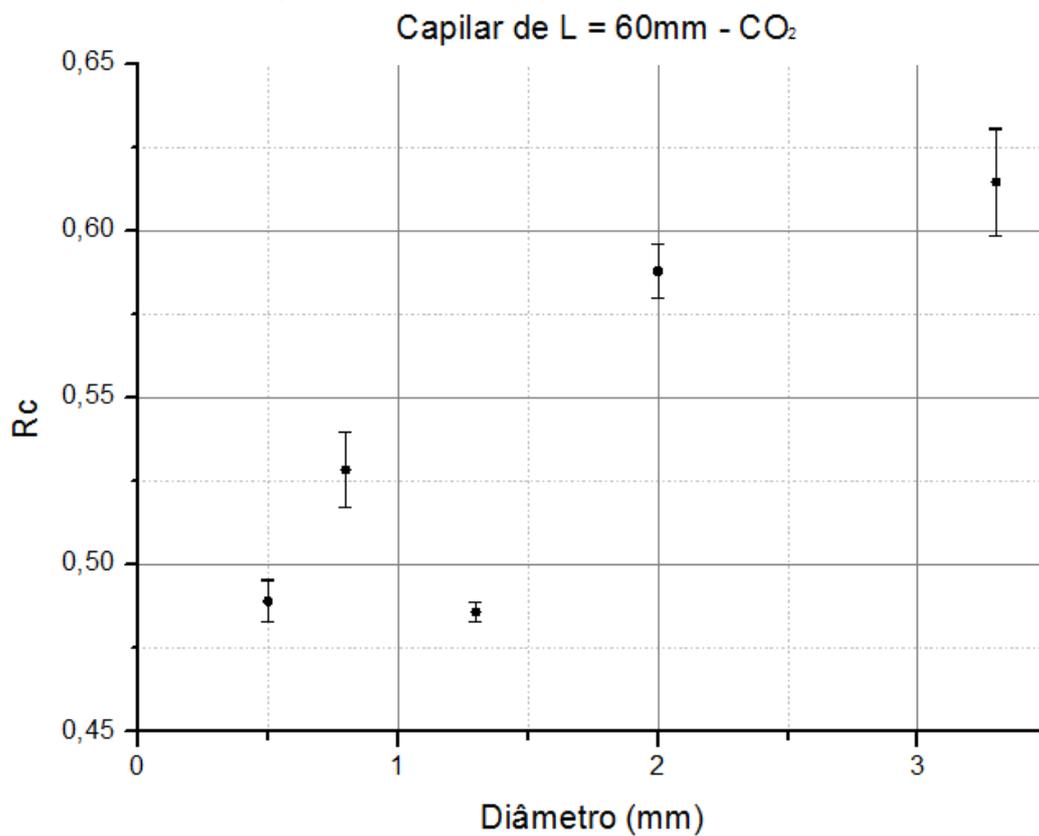
Gráfico 52:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 30 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$ .Gráfico 53:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 60 \text{ mm}$  –  $\text{CO}_2$ .

Gráfico 54:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 120$  mm –  $\text{CO}_2$ .  
Capilar de  $L = 120$ mm -  $\text{CO}_2$

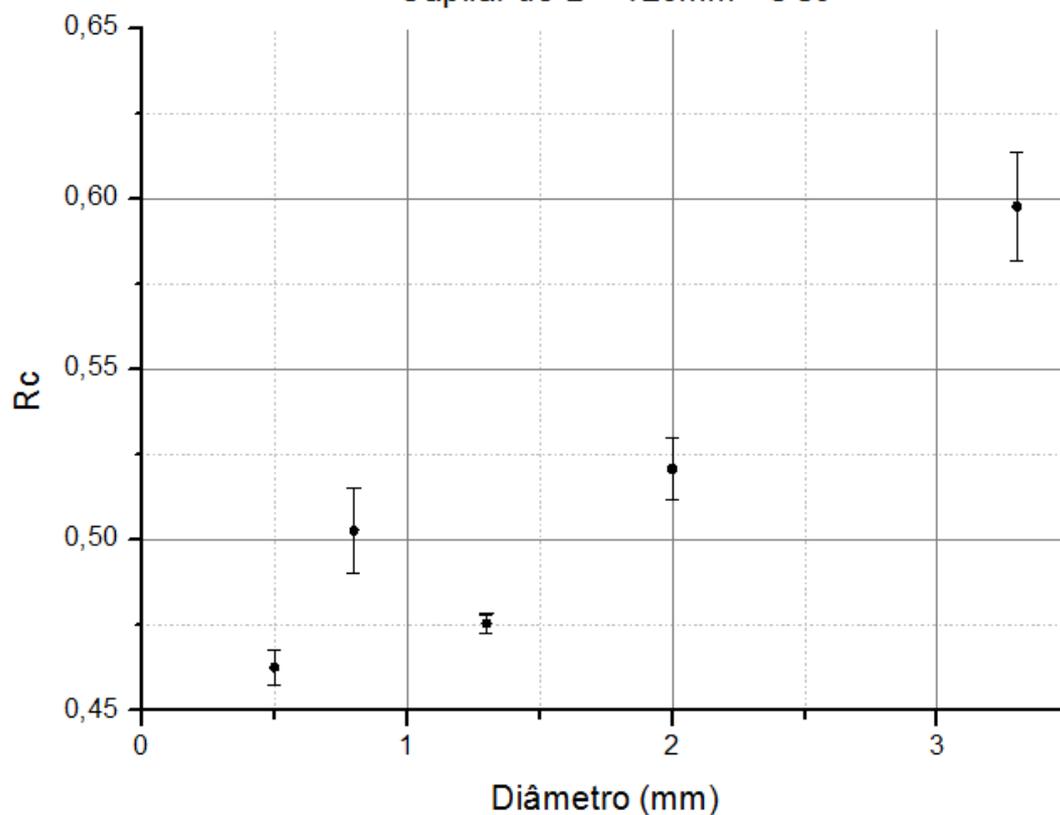
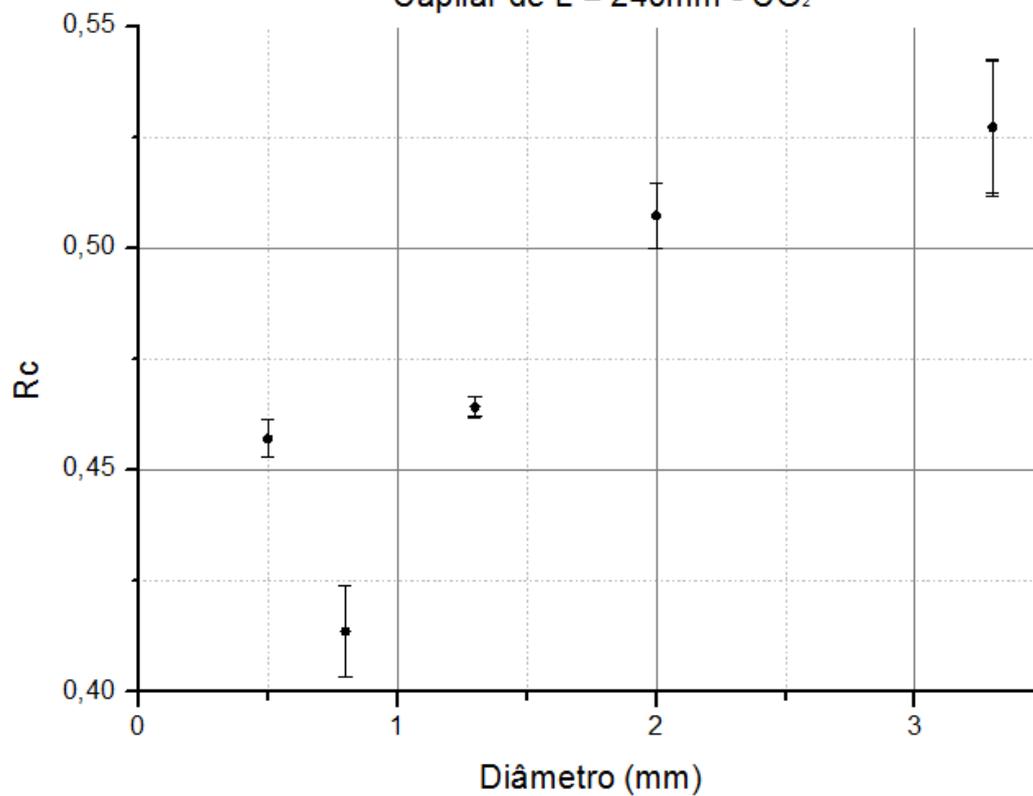


Gráfico 55:  $R_c$  em função do diâmetro –  $L = 240$  mm –  $\text{CO}_2$ .  
Capilar de  $L = 240$ mm -  $\text{CO}_2$



A partir dos gráficos de  $R_c$  em função do diâmetro nota-se que a razão de pressão crítica demonstra uma tendência crescente com o aumento do diâmetro para todos os casos. Apesar dos pontos correspondentes ao diâmetro interno de 0,8 mm não seguirem a tendência da curva.

Para finalizar as análises desse projeto ainda propõe-se o estudo do *throughput* característico na região de escoamento bloqueado, observando o comportamento deste diante a variação do comprimento dos capilares. Para isso o método utilizado será o de ajustar uma reta para a região linear das curvas de variação de pressão em função do tempo, para por meio de sua derivada multiplicada pelo volume da câmara de vácuo (estudo de obtenção do volume relacionado no apêndice) obtê-lo, conforme se expressa na equação 26.

A partir da equação 10, considerando-se volume constante ( $p \frac{dV}{dt} = 0$ ), temos que:

$$Q = V \frac{dp}{dt} \quad (26)$$

Os valores encontrados serão ainda comparados aos cálculos realizados a partir do modelo teórico dado pela equação 20. Os dados obtidos estão plotados nos gráficos 56 a 65.

Gráfico 56: *Throughput* em função do comprimento para o gás  $N_2$   $D = 0,5$  mm.

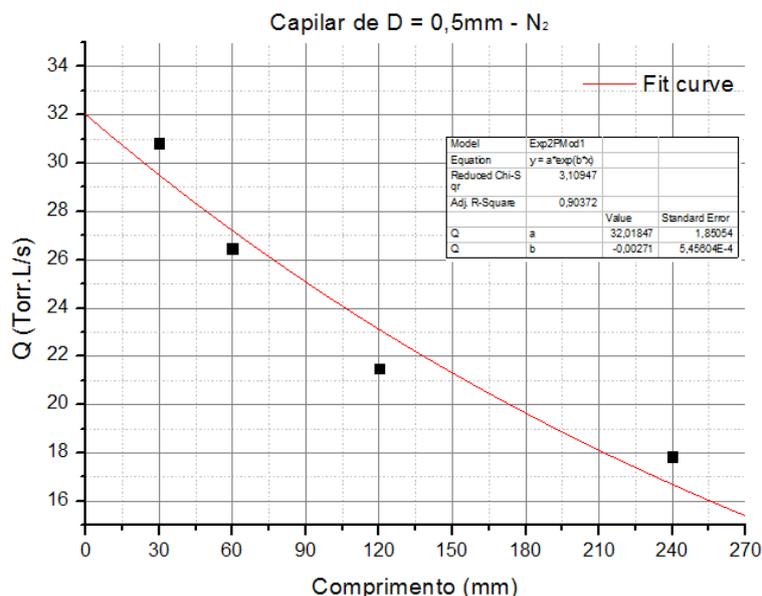


Gráfico 57: *Throughput* em função do comprimento para o gás  $N_2$   $D = 0,8$  mm.  
Capilar de  $D = 0,8$ mm -  $N_2$

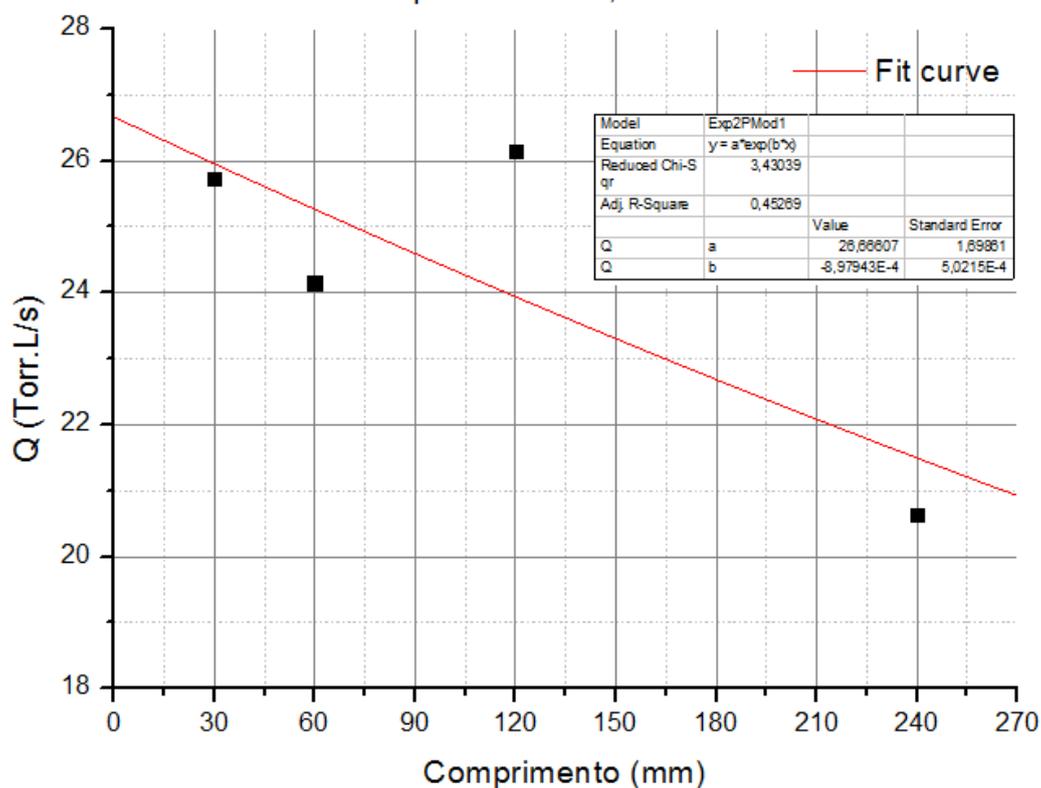


Gráfico 58: *Throughput* em função do comprimento para o gás  $N_2$   $D = 1,3$  mm.  
Capilar de  $D = 1,3$ mm -  $N_2$

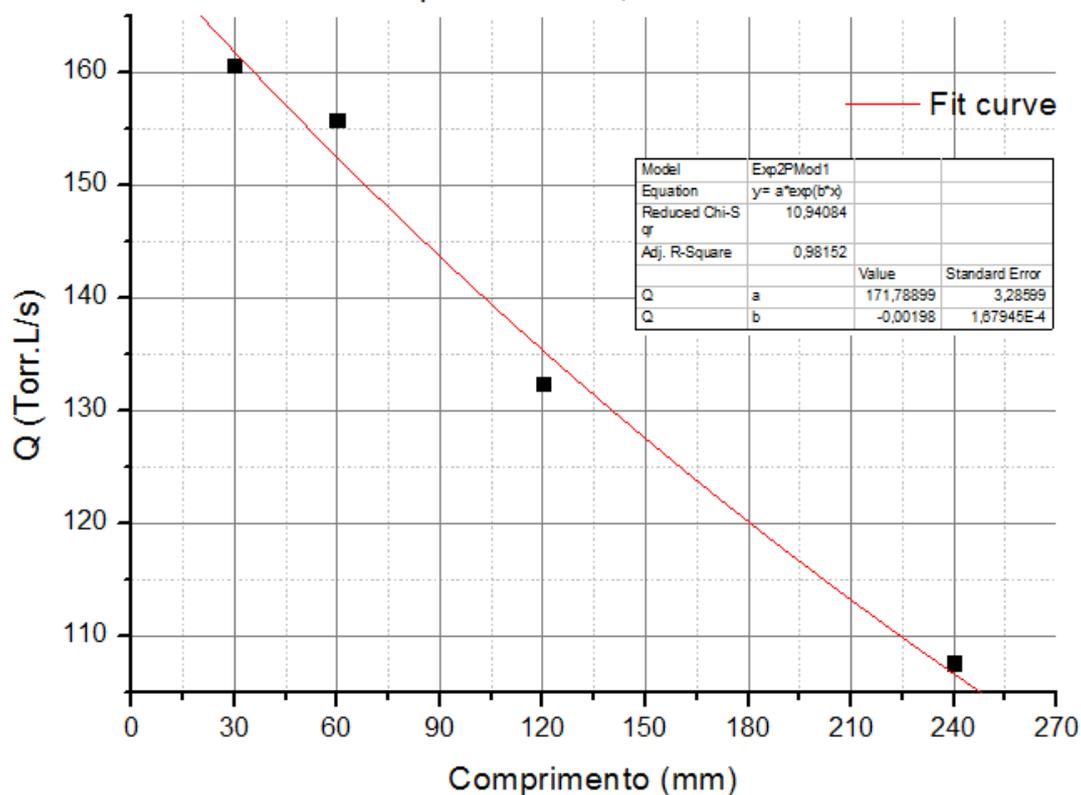


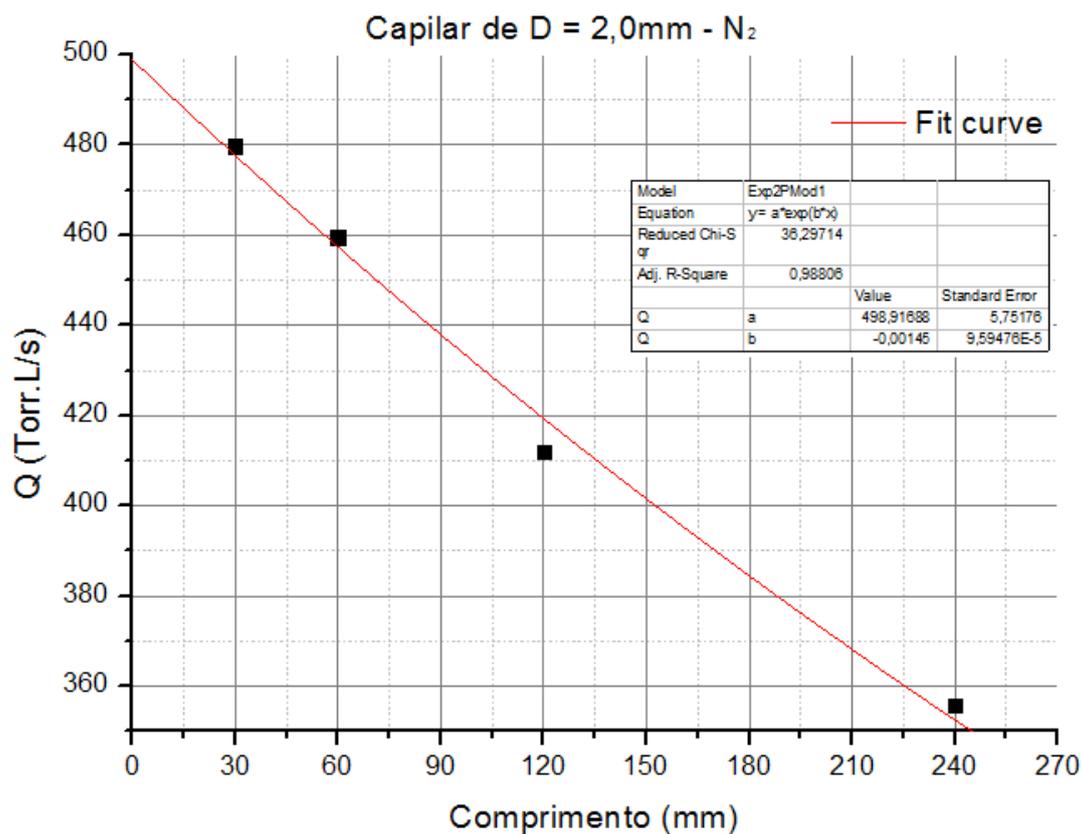
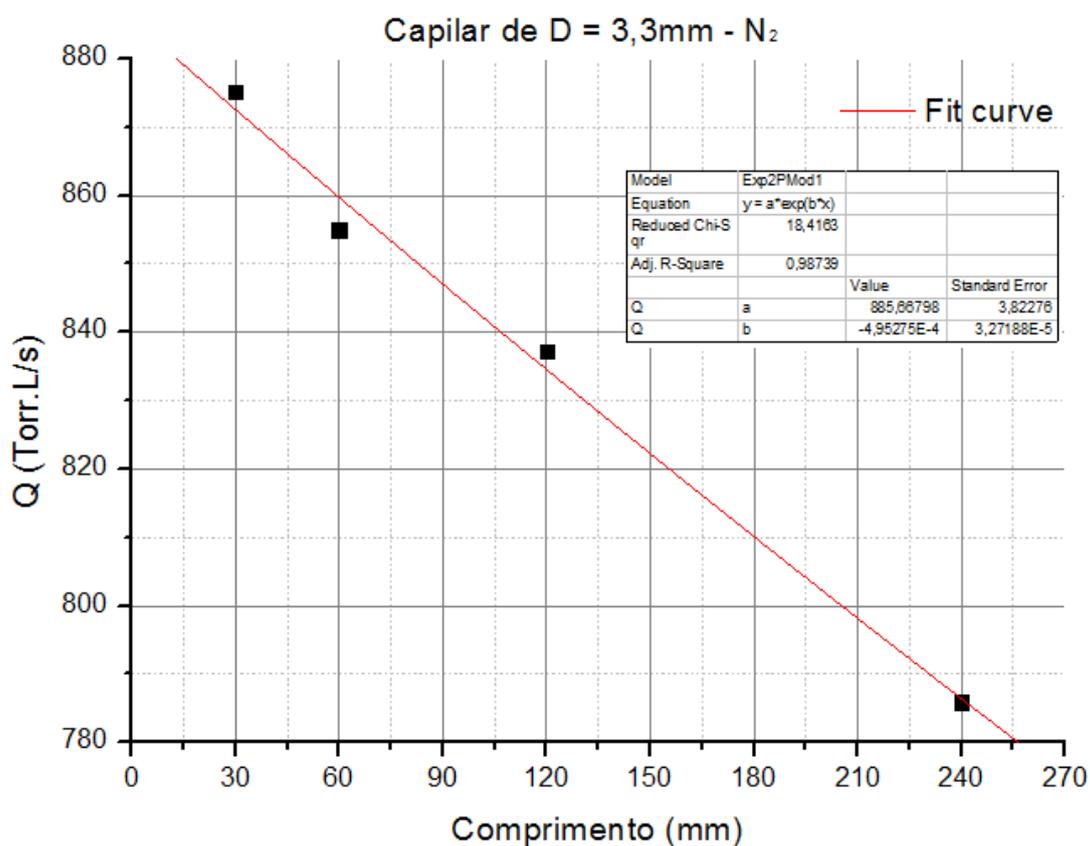
Gráfico 59: *Throughput* em função do comprimento para o gás N<sub>2</sub> D = 2,0 mm.Gráfico 60: *Throughput* em função do comprimento para o gás N<sub>2</sub> D = 3,3 mm.

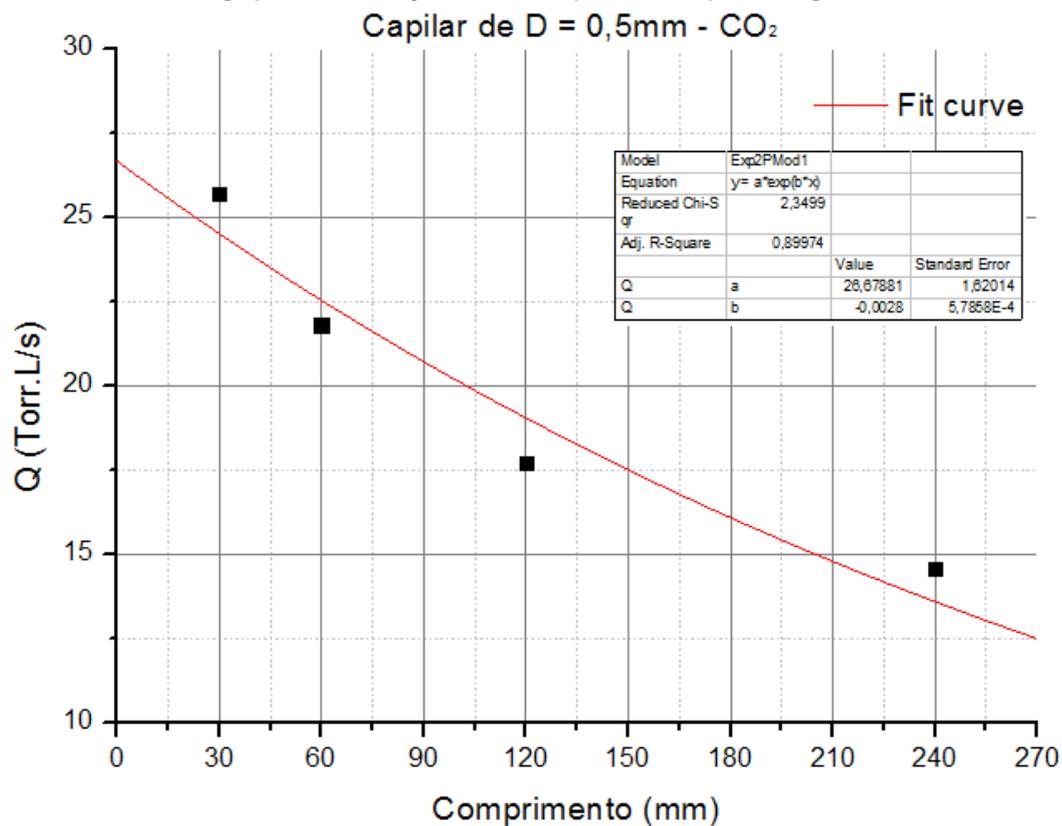
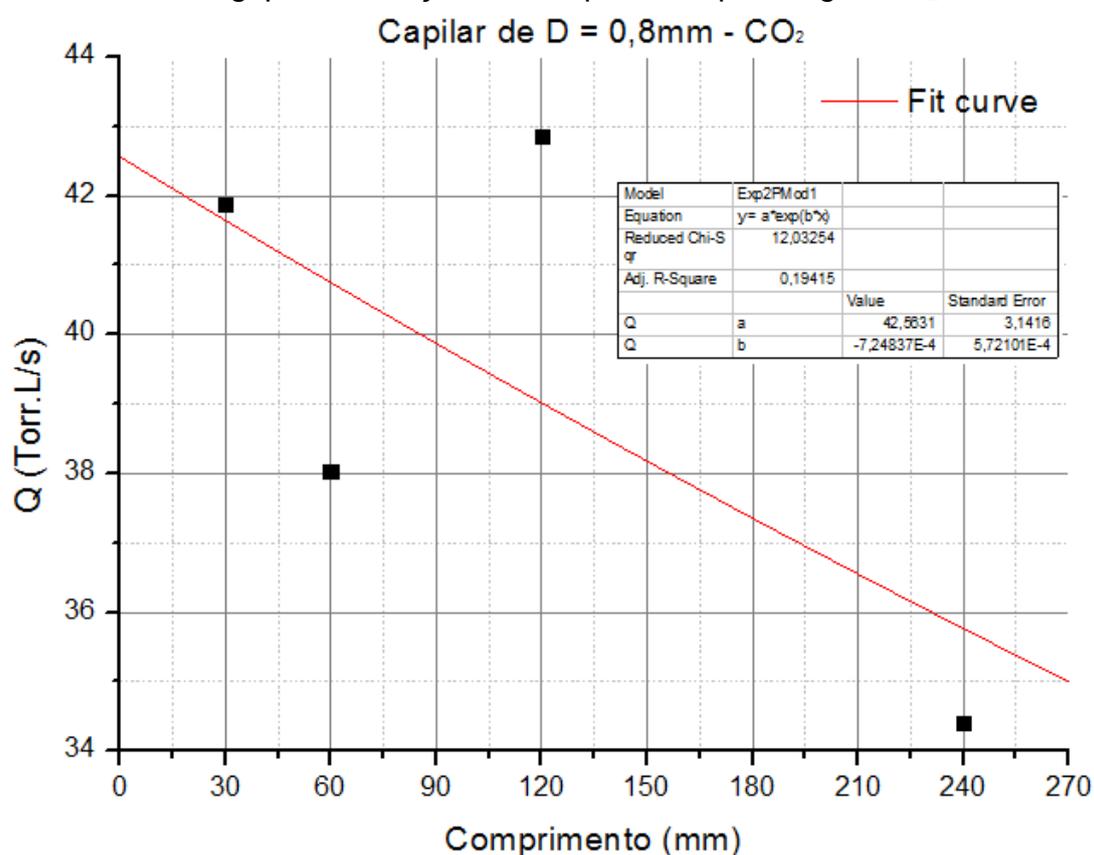
Gráfico 61: *Throughput* em função do comprimento para o gás CO<sub>2</sub> D = 0,5mm.Gráfico 62: *Throughput* em função do comprimento para o gás CO<sub>2</sub> D = 0,8mm.

Gráfico 63: *Throughput* em função do comprimento para o gás CO<sub>2</sub> D = 1,3mm.  
Capilar de D = 1,3mm - CO<sub>2</sub>

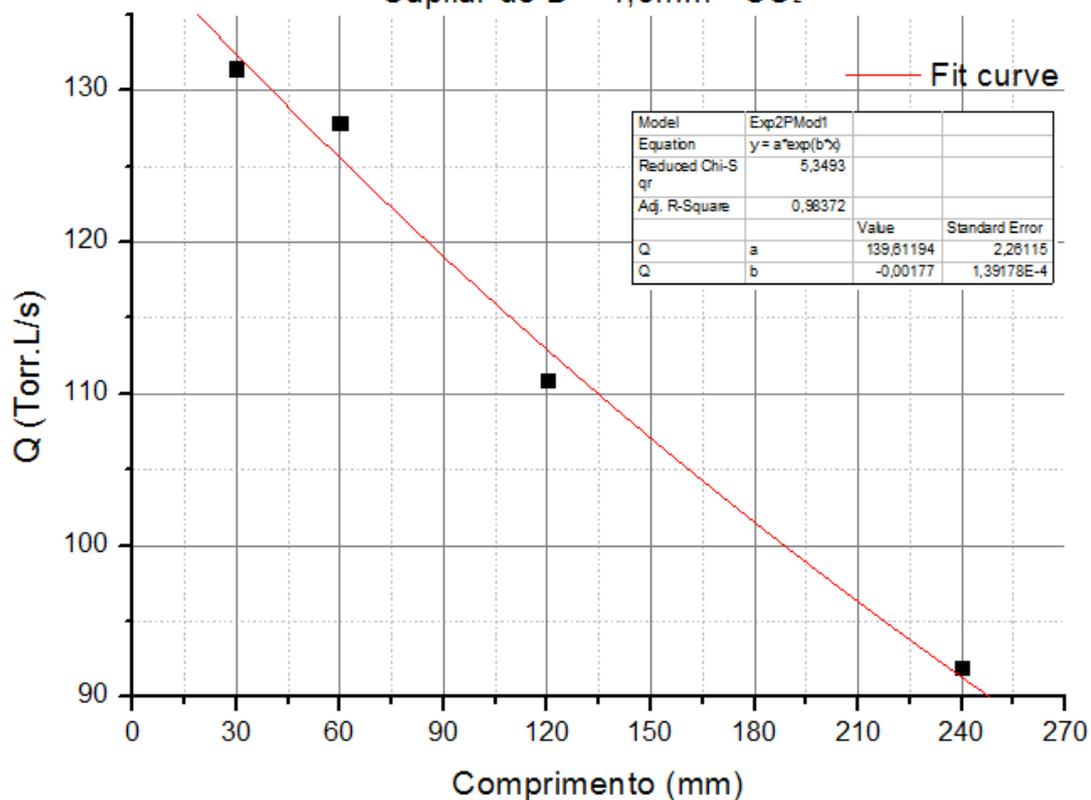


Gráfico 64: *Throughput* em função do comprimento para o gás CO<sub>2</sub> D = 2,0mm.  
Capilar de D = 2,0mm - CO<sub>2</sub>

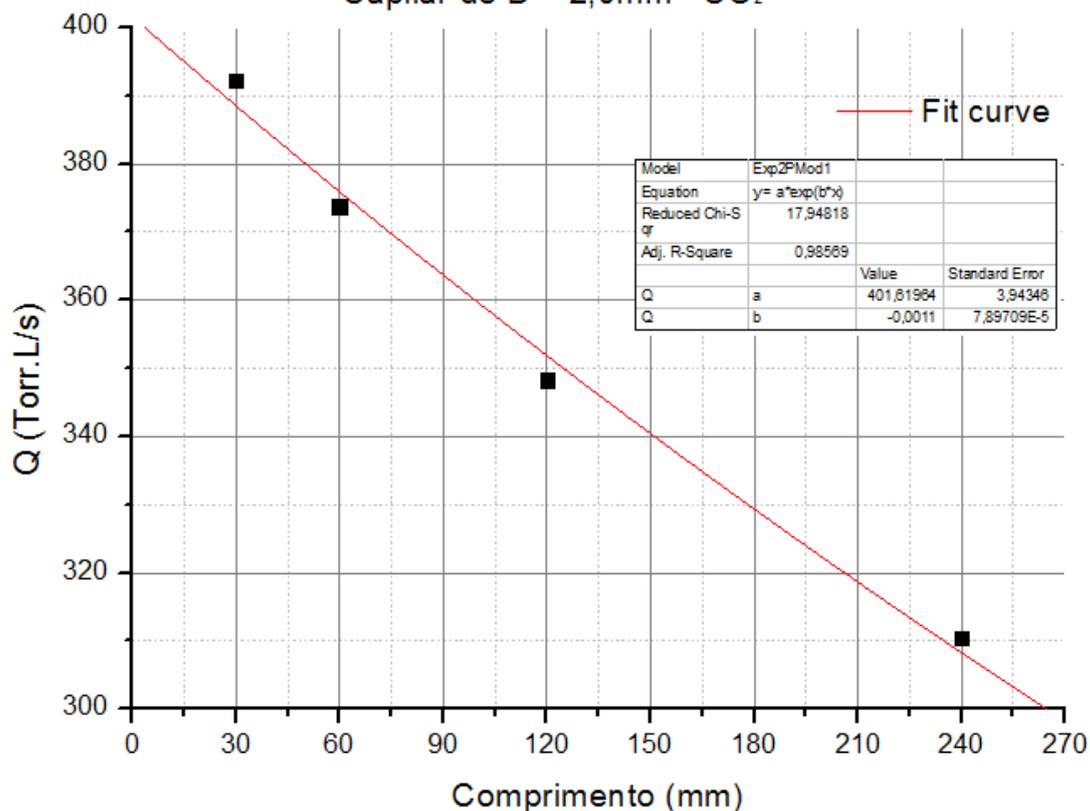
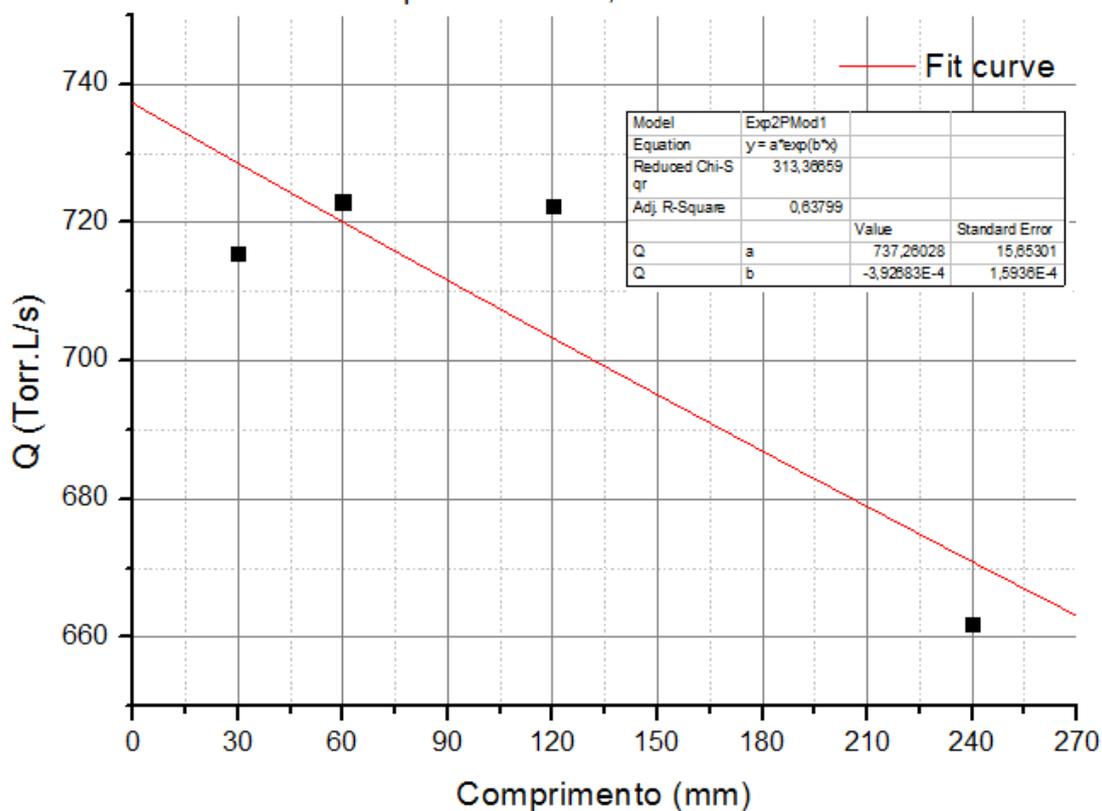


Gráfico 65: *Throughput* em função do comprimento para o gás CO<sub>2</sub> D = 3,3mm.  
Capilar de D = 3,3mm - CO<sub>2</sub>



Nota-se nos gráficos acima que o comportamento do *throughput* em função do comprimento do capilar é de que este tende a diminuir conforme se aumenta o comprimento do tubo para um mesmo diâmetro. Esse padrão foi ajustado para uma curva exponencial de formato ' $a \cdot e^{b \cdot x}$ ', sendo que  $a$  e  $b$  são constantes ( $b$  sempre negativo devido a curva decrescente com tendência a zero) e  $x$  é o comprimento do capilar. Ainda, caso considere-se um orifício (comprimento zero) o *throughput* seria dado pela extrapolação da curva, ou seja o próprio valor da constante ' $a$ '.

Os modelos foram analisados observando-se a qualidade do ajuste dado pelo parâmetro Adj. R-square ( $R^2$ ), visto nas tabelas contidas no canto superior dos gráficos plotados (as tabelas contém os parâmetros extraídos do software referentes ao modelo ajustado). Foram encontrados coeficientes maiores do que 0,89 para todos os casos exceto para o capilar com diâmetro de 0,8 mm, devido o tubo com 120 mm de comprimento apresentar um comportamento fora da tendência da curva, desvio este, gerado pela variação interna do seu diâmetro posteriormente verificada. O capilar de 3,3 mm, para o escoamento

com dióxido de carbono também apresentou um baixo  $R^2$  e distanciou-se do padrão exponencial ajustado. Os gráficos não foram plotados com as barras de incertezas tradicionais, pois como o desvio neste caso depende apenas da incerteza do volume da câmara de vácuo e do desvio padrão da reta (calculado pelo próprio software), o ponto plotado como quadrado acabou representando a região de erro, já que os valores encontrados foram muito baixos.

A partir de todos estes dados estruturou-se a tabela 9, que contém também os resultados teóricos obtidos a partir da equação 20. Como essa equação considera o cálculo para orifícios, os *throughputs* experimentais são dados para o menor comprimento de capilar utilizado (30 mm) e no caso da extrapolação feita o valor encontrado também é para um orifício.

Tabela 9: *Throughputs* determinados.

Diâmetro (mm)	<i>Throughput</i> experimental (Torr.L/s)		<i>Throughput</i> teórico (Torr.L/s)		<i>Throughput</i> da extrapolação (Torr.L/s)	
	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0,5	30,8 ± 1,2	25,7 ± 1,1	27,73	21,42	32,0 ± 1,8	27,7 ± 1,6
0,8	25,7 ± 1,7	41,9 ± 2,6	70,18	54,30	27,7 ± 1,7	43,7 ± 3,1
1,3	160,7 ± 8,6	131,4 ± 4,3	187,09	145,02	172,8 ± 3,3	140,7 ± 2,3
2	480 ± 26	392 ± 14	441,80	342,49	499,9 ± 5,8	402,6 ± 3,9
3,3	875 ± 41	716 ± 30	1202,71	933,72	886,7 ± 3,8	737,3 ± 15,7

A partir da tabela 9, é possível notar que alguns valores encontrados aproximam-se muito dos cálculos teóricos enquanto outros não tanto. A princípio, esse resultado levou a uma suspeita, já que os parâmetros adotados para determinar experimentalmente o *throughput* possuem pequenas incertezas e são de simples obtenção (derivada da pressão no tempo e volume). Então, se refez alguns cálculos utilizando o Excel para verificar se o algoritmo do programa Origin não está influenciando na análise, no entanto nenhuma diferença significativa foi notada.

Pode-se questionar também a manipulação da equação 20, considerando a sua forma simplificada onde se tem a multiplicação da área do capilar pela pressão de entrada (constante e obtida com um medidor de membrana capacitiva) e por um fator constante relativo a cada gás, no caso, para o nitrogênio utiliza-se o fator 20 enquanto para o dióxido de carbono o

fator 15,5. Observa-se que são 3 parâmetros também de fácil acesso e que a princípio não causariam tamanha divergência.

Sendo assim, o que se conclui é que como toda modelagem realizada, existe uma série de fatores que são levados em consideração para deduzir a expressão em questão. Então, ao tratar de aplicar um modelo em um experimento, por mais que se tente controlar as variáveis, haverá uma divergência em relação à teoria. Esse provavelmente foi o fator que levou a discrepância dos resultados observada nesse último caso. De imediato, sabe-se que a equação considera um gás ideal, sem viscosidade e fluxo através de um orifício, quando o experimento trata de um gás real escoando por uma tubulação onde há o pronunciamento da viscosidade.

#### **4. Conclusões e perspectivas futuras**

A realização deste trabalho possibilitou caracterizar capilares para a obtenção de *throughputs* constantes em diversas faixas na condição de escoamento bloqueado. Considerando que os resultados foram alcançados partindo-se de características físicas como o diâmetro e o comprimento da tubulação torna-se extremamente interessante aproveitar tal conhecimento para a manipulação de um sistema natural e passivo aplicado à calibração de medidores de fluxo, de maneira a ser uma opção econômica e prática.

Observou-se no 1º experimento que a condutância aumenta à medida que o comprimento dos capilares diminui, uma vez que o coeficiente angular associado à região linear das curvas aumenta, sendo que para comprimentos menores o tempo de subida da pressão é menor e conforme é aumentado o comprimento, o tempo para a elevação de pressão também aumenta, como também a influência do diâmetro interno do capilar diante ao comprimento que é muito mais significativa. No 2º experimento, a partir dos resultados obtidos também baseados na inclinação da reta, notou-se que aumentando o diâmetro interno do capilar a condutância cresce já que o coeficiente angular aumenta proporcionalmente. Além disso, nota-se a maior influência do diâmetro considerando que é um fator a quarta potência se comparado ao comprimento que é um fator a primeira potência como descrito pela equação 17.

No 3º experimento, comparou-se a influência do tipo de gás no escoamento pelo capilar e viu-se que para o gás com menor coeficiente de viscosidade ( $\text{CO}_2$  – 137,6), o escoamento é mais lento (em relação ao  $\text{N}_2$  com coeficiente de viscosidade de 166,6) visto que a evolução temporal da pressão é mais demorada, também observada a partir da inclinação da reta e de seu coeficiente angular.

Já a partir do 4º experimento, onde se focou o estudo da determinação e comportamento da razão de pressão crítica ( $R_c$ ), observou-se que à medida que se aumenta tanto o comprimento quanto o diâmetro, o  $R_c$  se afasta do valor teórico encontrado na literatura, sendo que para comprimentos maiores o  $R_c$  tende a diminuir, mas aumentando o diâmetro o  $R_c$  segue uma tendência de crescimento. Ainda, ao comparar o fator  $R_c$  para cada capilar diante o escoamento com os 2 gases utilizados nota-se que conforme se aumenta a

dimensão do comprimento dos capilares há uma tendência dos fatores  $R_c$  se distanciarem, devido ao provável pronunciamento do efeito de viscosidade do gás. De modo geral, o que se conclui desse experimento é que o escoamento bloqueado e o fator  $R_c$  apresentaram indícios marcantes da dependência da geometria da tubulação não considerada no modelo teórico.

No 5º e último experimento, onde se analisou a influência do capilar diante o *throughput*, notou-se que aumentando o comprimento do capilar o *throughput* diminui. Ainda, verificou-se uma divergência entre os dados experimentais obtidos e os valores teóricos calculados a partir da expressão 20. A princípio não se esperava esse distanciamento, pois a obtenção experimental partiu de parâmetros de fácil acesso, levando a deduzir que os fatores considerados para determinação da equação utilizada baseiam-se em simplificações que se distanciam dos parâmetros adotados no experimento. Desse modo, seria viável estabelecer um elo com teóricos deste fenômeno para obter meios de explicar melhor os dados obtidos, considerando que há pouca literatura sobre o assunto e esta se baseia em fatores ideais ao invés de reais.

Por fim, vale mencionar que este trabalho foi enriquecido com uma quantidade enorme de dados experimentais, e que isto só foi possível de ser obtido devido à meticulosidade dos procedimentos adotados tanto na metodologia de medição quanto na organização e análise.

## **5. Referências bibliográficas**

- [1] A. Chambers, R. K. Fitch, B. S. Halliday, Basic Vacuum Technology – 2ª ed., London 1998.
- [2] Degaspero F. T. – Modelagem e Análise Detalhadas de Sistema de Vácuo – Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- [3] Degaspero, F. T. - Sistema de Medição de Velocidade de Bombeamento – IFUSP
- [4] Degaspero, F. T. - Medição de Pressão com coluna de mercúrio Metrologia em Vácuo – FATEC-SP, LTV, 2010.
- [5] MOUTINHO, A. M. C., Tecnologia do Vácuo, 1º edição, 1980. Universidade Nova de Lisboa.
- [6] SILVA, S. F., Análise teórico-experimental de condutâncias em Pré-vácuo, Tese de Graduação, MPCE, FATEC-SP, 2010.
- [7] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker; Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. Fundamentos da física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 8. Ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2008.
- [8] Wolfgang Bauer, Gary D. Westfall, Helio Dias. Física para Universitários - Relatividade, Oscilações, Ondas e Calor.
- [9] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Van\\_der\\_Waals\\_Isotherms.PNG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Van_der_Waals_Isotherms.PNG)
- [10] <http://www.blucher.com.br/materiaisdeapoio/termo%2017.pdf>
- [11] [www.rumoaota.com/site/attachments/522\\_termodinamica\\_artigo\\_gabriel.pdf](http://www.rumoaota.com/site/attachments/522_termodinamica_artigo_gabriel.pdf)
- [12] Arakawa, Rodrigo. CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO PRIMÁRIO DE VÁCUO PELO MÉTODO DE EXPANSÃO ESTÁTICA. São Paulo : s.n., 2013. pp. 71-90.
- [13] [http://portal.ifi.unicamp.br/apostilas\\_bif/f640/Cap1.pdf](http://portal.ifi.unicamp.br/apostilas_bif/f640/Cap1.pdf)

## 6. Apêndices

### **APÊNDICE A: Determinação dos volumes das câmaras de vácuo utilizadas no trabalho por meio do método experimental de expansão estática de Boyle-Mariotte**

A lei de Boyle-Mariotte trata das condições de volume e pressão para o gás de um sistema em um processo isotérmico (processo com temperatura constante). A lei é dada pela equação 27 [7]:

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad (27)$$

Onde  $p_1$  e  $p_2$  são as pressões e  $V_1$  e  $V_2$  são os volumes.

Baseando-se nesta simples equação determinou-se o volume das câmaras de vácuo ( $V_{CV}$ ) utilizadas no projeto. Para isto, utilizou-se um arranjo dividido em 2 partes. A primeira composta por uma câmara de volume bem definido e conhecido ligada e isolada por uma válvula a uma segunda câmara de volume desconhecido e maior do que a primeira (parâmetro a se determinar).

Monitora-se inicialmente a câmara conhecida que está mantida em pressão atmosférica enquanto a desconhecida está mantida em ambiente de vácuo. Então, abre-se a válvula que as separam e por difusão o gás da primeira preenche o volume da segunda. Ao equilibrar a pressão do sistema, esta é aferida.

A partir das situações inicial e final deste procedimento, obtém-se 4 parâmetros:  $p_i$ ,  $V_i$ ,  $p_f$  e  $V_f$ , respectivamente pressão inicial, volume inicial, pressão final e volume final do sistema, como relacionado na equação 28 para lei de Boyle-Mariotte:

$$p_i \times V_i = p_f \times V_f \quad (28)$$

Sabendo-se que  $p_i$  e  $p_f$  são parâmetros obtidos experimentalmente,  $V_i$  é conhecido e  $V_f$  corresponde a soma entre o volume a se determinar e o volume

conhecido, obtém-se a equação para determinar-se o volume desconhecido do sistema isolando o respectivo termo ( $V_{CV}$ ) como observa-se na equação 29.

$$V_{CV} = \left( \frac{p_i}{p_f} \times V_i \right) - V_i \quad (29)$$

Com este método foram determinados os volumes de 2 câmaras: uma de menor volume  $V_{CV1}$  e uma de maior volume  $V_{CV2}$ . A medida obtida é proveniente da média de 5 procedimentos repetidos, mantendo-se as mesmas condições experimentais, sendo que foram realizadas medições considerando também um sistema com os 2 volumes juntos de maneira que a soma dos volumes  $V_{CV1}$  e  $V_{CV2}$  (individuais) encontrados deva resultar no volume total do sistema. O volume padrão utilizado  $V_i$  foi obtido do trabalho de conclusão de curso do estudante Rodrigo Arakawa no Laboratório de Tecnologia do Vácuo que o determinou a partir do método gravimétrico [12].



Figura 17: Câmara de volume padrão ( $V_i$ ).



Figura 18: Câmara de volume menor ( $V_{CV1}$ ).



Figura 19: Câmara de volume maior ( $V_{cv2}$ ).



Figura 20: Sistema completo ( $V_i+V_{cv1}+V_{cv2}$ ).

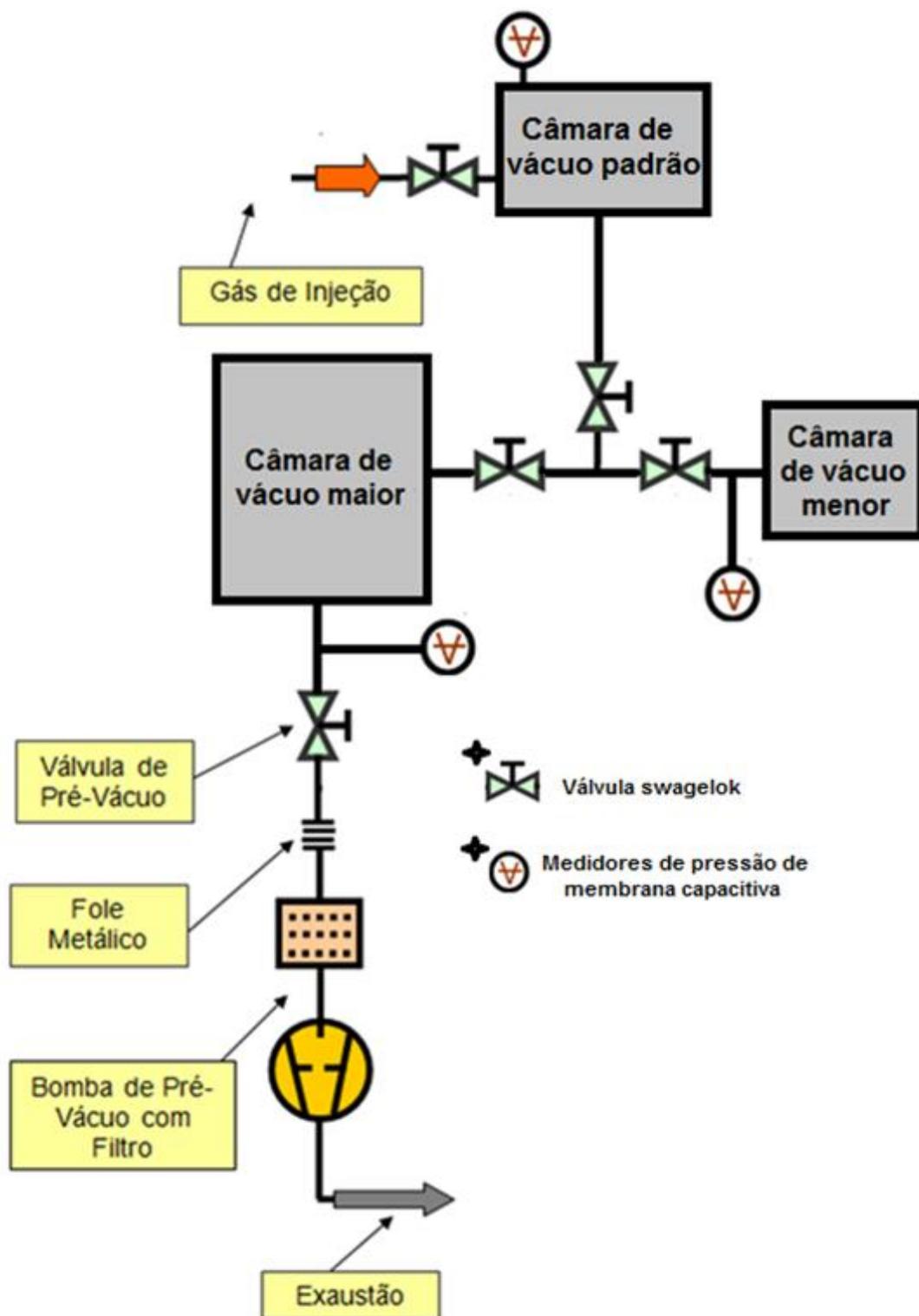


Figura 21: Desenho esquemático do arranjo experimental.

Os dados obtidos nos experimentos assim como os parâmetros de controle e os resultados calculados estão relacionados nas tabelas 10 e 11 a seguir:

Tabela 10: Dados experimentais.

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

Tabela 11: Volumes determinados.

Câmara de Vácuo	Volume (litros)
<b>CV<sub>1</sub></b>	<b>4,6 ± 0,1</b>
<b>CV<sub>2</sub></b>	<b>56,4 ± 0,8</b>
<b>Sistema Completo</b>	<b>60,3 ± 0,6</b>
<b>V<sub>i</sub></b>	<b>1,07 ± 0,01</b>

Os cálculos realizados utilizam das fórmulas de média aritmética (M – equação 30), desvio padrão (DP – equação 31) e erro relativo (E – equação 32).

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad (30)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (31)$$

$$E = \left( \frac{DP}{M} \right) \quad (32)$$

$$E\% = \left( \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right) \times 100 \quad (33)$$