

# Modelagem e medição de condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar com gases bloqueados

## Modeling and conductance measurement in laminar viscous flow regime with gases in choked flow

Edelson da Silva Procopio Venuto<sup>1</sup>, Johnes Soares Santos<sup>2</sup>, Natália Kazumi Gushiken<sup>1</sup>, Francisco Tadeu Degasper<sup>2</sup>

### RESUMO

O propósito principal deste trabalho é estudar o fenômeno do escoamento compressível, mais conhecido como *choked flow* em tubos de diversos diâmetros e comprimentos utilizando quatro tipos de gases (argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono), bem como determinar o ponto de bloqueio para estes diferentes tubos. Entende-se por ponto de bloqueio o valor numérico da razão da pressão de saída pela pressão de entrada, a partir do qual a taxa de transferência de gás, ou como em inglês o *throughput*, não é mais constante. Enquanto a razão entre as pressões não atingir o ponto de bloqueio, os capilares podem ser utilizados como controladores passivos de vazão de gás. A utilização de capilares apresenta uma série de vantagens para a medição de vazão por serem dispositivos isentos de partes móveis e que em princípio funcionam em uma larga faixa de pressão, com vazão de gás constante, isto é, bloqueados. Quando bloqueados, a vazão apresenta baixa incerteza nas medições e garantindo uma vazão praticamente constante durante sua operação. Em fundamentos teóricos apresentaremos a definição de taxa de transferência de gás e os termos *throughput* e *vazão*, uma vez que há certa confusão na apresentação destes conceitos.

**Palavras-chave:** Tecnologia do vácuo; Medição de velocidade de bombeamento; Dinâmica de gases.

### ABSTRACT

The main purpose of this work is to study the phenomenon of compressible flow, better known as choked flow in pipes of various diameters and lengths. Using four types of gases (argon, helium, nitrogen and carbon dioxide), as well as determining the blocking point for these different tubes. Means for blocking point the numerical value of the ratio of exit pressure to inlet pressure, from which the gas transfer rate (throughput) is not constant. While the ratio between pressure does not reach the locking point, the capillaries may be used as passive gas flow controllers. The use of capillaries presents a number of advantages for the flow measurement devices are free of moving parts and which in principle operate in a wide pressure range, with a constant gas flow. When blocking, the flow has low uncertainty in the measurements and ensuring an almost constant flow rate during operation. In theoretical foundations we present the definition of gas throughput and throughput terms and flow, since there is some confusion in the presentation of these concepts.

**Keywords:** Vacuum technology; Pumping speed measurement; Gas dynamics.

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo – Escola Politécnica – São Paulo (SP) – Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia de São Paulo – São Paulo (SP) – Brasil

**Autor correspondente:** Edelson da Silva Procopio Venuto - Universidade de São Paulo – Escola Politécnica – Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 - trav. 3, sala A1-46. CEP 05508-900 - São Paulo (SP) – Brasil E-mail: edelsonvenuto@gmail.com, ftd@fatecsp.br

**Recebido:** 30/05/2016 **Aprovado:** 02/08/2016

## INTRODUÇÃO

A tecnologia do vácuo ocupa um papel importante em muitos processos industriais e também em atividades de pesquisa; identifica-se que cada vez mais aplicações em geral utilizam a tecnologia do vácuo em seus processos. A característica inerente de fornecer ambientes inertes e com um número muito reduzido de átomos e/ou moléculas proporciona uma maior qualidade nos resultados obtidos. Uma vez que o ar atmosférico contém muitos gases ativos em sua composição, e principalmente vapor d'água, estas substâncias podem reagir com os materiais envolvidos e afetar significativamente na qualidade dos processos que ocorrem em pressão atmosférica.

Dentro deste cenário, encontra-se muitas vezes a necessidade de se trabalhar com a injeção controlada de gases em sistemas de vácuo para a realização de processos. Ainda, pode-se encontrar a necessidade de enriquecimento de gases especiais nas atmosferas reduzidas nas câmaras de vácuo e reatores para execução de algum processo em baixa pressão. Para esta tarefa, geralmente utilizam-se rotâmetros ou medidores de fluxo de massa térmico (*mass flow meters*), cujo funcionamento deste último é baseado na capacidade térmica dos gases. Como todo instrumento de medição, os rotâmetros e *mass flow meters* precisam ser calibrados periodicamente, de modo a manter confiável seu funcionamento. A utilização de capilares como controladores de fluxo de gases pode servir como padrão de comparação durante a calibração destes medidores de fluxo de gases, desde que sejam mantidas as condições de pressão constante no recipiente de entrada e a razão entre as pressões nos recipientes de entrada e saída esteja abaixo da razão crítica ( $r_c$ ) sejam mantidas. Após serem devidamente caracterizados os capilares também podem ser usados de forma eficiente e eficaz na medição da velocidade de bombeamento de bombas de vácuo, assim como na medição de velocidade efetiva de bombeamento de câmaras de vácuo em geral.

Os ensaios experimentais descritos neste trabalho foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Antes de apresentarmos qualquer resultado físico proveniente das caracterizações dos capilares é necessária uma breve introdução de alguns conceitos básicos utilizados na ciência e tecnologia do vácuo. No contexto deste trabalho é interessante determinarmos uma das principais grandezas do transporte de gases em baixas pressões, o chamado *throughput* ( $Q$ ). O *throughput* é definido de partida como sendo

$$Q = kT \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta,  $N$  é o número de moléculas e  $t$  é o tempo. O *throughput* é uma

grandeza que depende da variação no tempo do número de moléculas em um recipiente, desde que a temperatura seja conhecida. Outra forma de interpretar o *throughput* é dada pela Equação 2

$$Q = \frac{2}{3} \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

Ou seja, o *throughput* é igual a dois terços da variação no tempo de energia cinética média do movimento de translação das moléculas na câmara de vácuo no tempo. Da teoria cinética dos gases tem-se que as moléculas estão em movimento incessante, assim, elas têm energia cinética. A variação da pressão na câmara de vácuo leva à variação do seu número de moléculas, desta forma, leva à variação da energia cinética da totalidade de moléculas na câmara de vácuo. Desta forma, a partir da Equação 2, podemos interpretar que, durante o processo de bombeamento dos sistemas de vácuo estamos lidando com a vazão da energia cinética média dos átomos e/ou moléculas. Observamos também, que o *throughput* é dado em unidades de potência (energia na unidade de tempo).

Cabe notar que em nosso idioma, o conceito de *throughput* é traduzido muitas vezes como vazão ou ainda fluxo. Segundo um dos autores deste trabalho (Degasperi), estes dois últimos termos são inadequados, e mesmo errados. Uma tradução direta da palavra *throughput* é taxa de transferência, palavra que traduz adequadamente o conceito, uma vez que vazão, na mecânica dos fluidos significa quantidade de massa de fluido na unidade tempo que cruza uma superfície (vazão mássica). Ainda, significa o volume de fluido na unidade de tempo que cruza uma superfície (vazão volumétrica). No caso do fluido líquido, como a densidade é praticamente constante (fluido incompressível), as duas definições não trazem confusão. Ocorre que com gases – como são fluidos compressíveis – tem-se que especificar (com uma ou outra definição) de forma que a densidade do gás seja necessariamente explicitada. Desta forma, utiliza-se neste trabalho o termo *throughput*, ou sua tradução, taxa de transferência.

Devido ao movimento de translação das moléculas, a pressão em função do tempo em sistemas de baixa pressão pode ser modelada como um processo de balanço de energia cinética dos átomos e moléculas presentes no sistema de vácuo. Assim, podemos escrever a evolução temporal da pressão no sistema de vácuo multiplicada pelo volume da câmara de vácuo como sendo igual à somatória de todas as fontes de gases presentes no sistema menos o *throughput* que sai do sistema. A Equação 3 apresenta uma abordagem mais comum no cálculo do *throughput* para sistemas de vácuo.

$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = Q_{VR} + Q_{VV} + Q_{Vap} + Q_{Sub} + Q_{Deg} + Q_{Perm} + Q_{FBV} + Q_{GP} + Q_{IC} - kT \frac{dN_{BV}(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\Rightarrow V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = -kT \frac{dN_{BV}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

onde,  $Q_{VR}$  é o *throughput* devido ao vazamento real,  $Q_{VV}$  é o *throughput* devido ao vazamento virtual,  $Q_{Vap}$  é o *throughput* devido à vaporização,  $Q_{Sub}$  é o *throughput* devido à sublimação,  $Q_{Deg}$  é o *throughput* devido à desgaseificação,  $Q_{Perm}$  é o *throughput* devido à permeação,  $Q_{FBV}$  é o *throughput* devido à fonte gasosa da bomba de vácuo,  $Q_{GP}$  é o *throughput* devido aos gases e vapores de processo,  $Q_{IC}$  é o *throughput* devido à injeção controlada de gases e vapores.

Para uma boa compreensão do comportamento dos sistemas de vácuo tem-se considerar o processo de bombeamento de gases e vapores em vácuo<sup>(1,2)</sup>.

No regime de escoamento compressível as variações da massa específica do fluido não podem ser desprezadas, esses efeitos de compressibilidade são encontrados principalmente nos gases e vapores, já que ambos têm grande capacidade de compressão, diferentemente dos líquidos que são sempre considerados fluidos incompressíveis, ou seja, sua massa específica é constante independentemente das condições de escoamento ou do estado do fluido. A Tabela 1 mostra o regime de escoamento dos fluidos em função do número de *Mach* (Ma). Este é um número adimensional é a razão da velocidade local de escoamento e a velocidade local do som.

**Tabela 1:** Regimes de escoamento em função do número de Mach.

Ma	Regime	Observações
Ma < 0,3	Incompressível	Massa específica não varia com a velocidade
0,3 < Ma < 0,8	Compressível	Variações da massa específica são significativas
0,8 < Ma < 1,0	Transônico	-
1,0 < Ma < 5,0	Supersônico	-
5,0 < Ma < 8,0	Hipersônico	-

Diz-se que um gás está em bloqueio quando seu escoamento atinge a velocidade crítica, ou em outras palavras, quando a velocidade do escoamento se iguala a velocidade local do som, nesta situação o número de *Mach* é igual à unidade.

Para que esta situação ocorra, é necessário que o escoamento acelere ou desacelere até atingir a velocidade do som. As propriedades críticas do escoamento são denotadas com um índice sobrescrito (\*), temos que as propriedades de estagnação, ou seja, na blocagem, são dadas pelas Equações 4 e 5,

$$\frac{p_0^*}{p} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = r_c \quad (4)$$

$$\frac{T_0^*}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \quad (5)$$

$$\frac{p_0^*}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (6)$$

Onde  $r_c$  é a chamada razão crítica, cujo valor experimental é calculado pela razão da pressão na câmara de vácuo,  $p_{CV}$  e a pressão no reservatório de gás à entrada do sistema,  $p_0$ . O valor teórico da razão crítica segundo os resultados da mecânica dos fluidos aplicada à dinâmica dos gases rarefeitos depende única e exclusivamente do parâmetro  $\gamma$ , ( $\gamma = C_p / C_v$ ) que é a razão entre o calor específico molar a pressão constante e o calor específico molar a volume constante. Estas propriedades termodinâmicas dependem do número de átomos que o gás contém, como mostrado na Tabela 2.

Considerando uma expansão adiabática, conforme os resultados da dinâmica dos fluidos compressíveis o *throughput* passando por um orifício de área A é dado por dois modos distintos, como se pode ver nas equações 7 e 8, sendo que a transição entre estes modos é dada pelo valor de  $r_c$ .

**Tabela 2:** Parâmetro  $\gamma$  em função do tipo de gás.

Tipo de gás	$\gamma$	$r_c$
Monoatômico	1,66	0,4881
Diatômico	1,4	0,5281
Triatômico	1,3	0,5457
Poliatômico	1,1	0,5847

1º modo:  $0 < p_{CV}/p_0 < r_c$

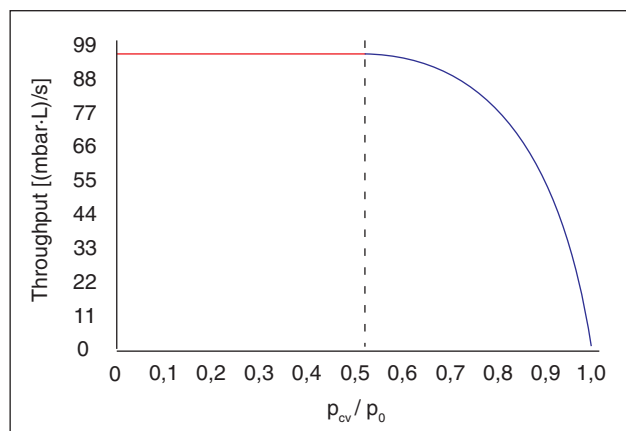
$$Q = A p_0 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\left(\frac{RT}{M}\right) \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)} \quad (7)$$

2º modo:  $p_{CV}/p_0 \geq r_c$

$$Q = A p_0 \left(\frac{p_{CV}}{p_0}\right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{RT}{M} \left[ 1 - \left(\frac{p_{CV}}{p_0}\right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

Sendo A a área do orifício,  $p_0$  a pressão na câmara de entrada,  $p_{CV}$  a pressão na câmara de vácuo, ainda, R é a constante universal dos gases perfeitos, T é a temperatura absoluta e M é o peso molecular do gás. Quando a razão da pressão na câmara de vácuo pela pressão na entrada for menor que a razão crítica o *throughput* é constante, já que o modelo matemático, primeiro modo, desta região só relaciona constantes. Mas a partir do momento em que esta condição não é mais verdadeira, o *throughput* passa a decair devido ao aumento da pressão na câmara de vácuo, e esta situação se mantém até que não haja mais fluxo de gás; isto ocorre quando a pressão na câmara de vácuo se iguala à pressão de entrada. A Figura 1 representa esta situação; a região vermelha da curva mostra a validade do primeiro modo, onde o *throughput* é constante. Já a parte azul da curva representa o segundo modo, sendo que o *throughput* depende da pressão

na câmara de vácuo e diminui à medida que esta cresce. A transição entre os dois modelos é dada quando a razão entre as pressões atinge a razão crítica<sup>(3,4,5)</sup>.



**Figura 1:** Throughput em função da razão entre a pressão na câmara de vácuo e a pressão na câmara de entrada.

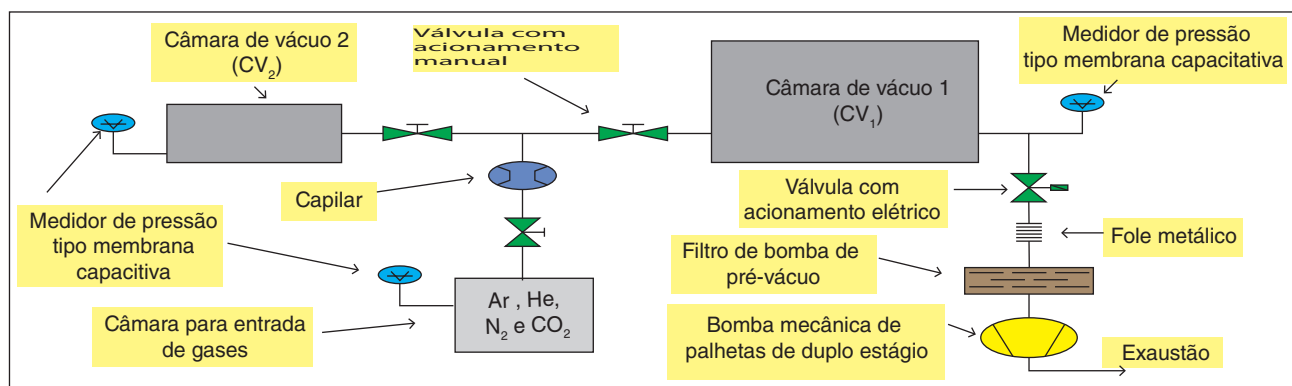
## MATERIAIS E MÉTODOS

As experiências foram realizadas utilizando-se quatro diâmetros de capilares:  $(0,5 \pm 0,1)$  mm,  $(1,3 \pm 0,1)$  mm,  $(2,0 \pm 0,1)$  mm e  $(3,3 \pm 0,1)$  mm. Cada um destes diâmetros tem quatro comprimentos distintos:  $(30 \pm 1)$  mm,  $(60 \pm 1)$  mm,  $(120 \pm 1)$  mm e  $(240 \pm 1)$  mm. Para efetuar a caracterização do capilar, posiciona-se este entre duas câmaras a pressões distintas. A pressão na câmara de entrada é mantida constante enquanto que a câmara de saída ( $CV_1$  ou  $CV_2$ ) é mantida inicialmente em vácuo. A Figura 2 representa o sistema de vácuo utilizado durante a caracterização dos capilares, a câmara de vácuo 1 tem um volume de  $(56,4 \pm 0,8)$  L enquanto que a câmara de vácuo 2 tem um volume de  $(4,6 \pm 0,1)$  L. A utilização de duas câmaras de vácuo de volumes distintos para o estudo do fenômeno da bloqueagem se deve ao fato de haver vários capilares com dimensões bem distintas entre si. No caso de um gás que sai do reservatório de entrada e passa por um capilar de pequeno diâmetro, digamos 0,5 mm, e vai para a câmara de vácuo 1 ( $CV_1$ ) o tempo da transferência de gás da câmara de entrada para a câmara de saída será muito grande, já que o

volume a ser preenchido é considerável e a resistência à passagem do gás também é elevada, desta maneira a quantidade de gás utilizada durante o processo será maior. A situação oposta ao caso especificado anteriormente também não é vantajosa, já que o estudo do fenômeno pode ser prejudicado pelo rápido aumento da pressão no tempo. Por estes motivos, optou-se por utilizar a câmara de menor volume ( $CV_2$ ) para o capilar de 0,5 mm de diâmetro, enquanto que a câmara de vácuo 1 ( $CV_1$ ) será utilizada para os capilares de dimensões superiores: 1,3 mm, 2,0 mm e 3,3 mm de diâmetro. Isto em nada atrapalha o estudo efetuado neste trabalho, somente altera o tempo que leva para a pressão nas duas câmaras de vácuo se equalizarem.

Inicialmente, a câmara de saída deve inicialmente estar a uma pressão suficientemente baixa, da ordem de  $10^{-1}$  mbar, enquanto que a pressão na câmara de entrada mantém-se constante em torno de 940 mbar e com seu interior preenchido com o gás de interesse (Ar, He,  $N_2$  ou  $CO_2$ ). Quando esta condição inicial é estabelecida a válvula que liga o sistema à bomba de vácuo é fechada e a válvula que interliga as duas câmaras é aberta, dando passagem ao gás presente na câmara de entrada para a câmara que se encontra em vácuo, a passagem do gás é realizada através do capilar que se pretende caracterizar, por ser a menor condutância do sistema de vácuo a restrição a passagem do gás será dominada exclusivamente pelo capilar. As pressões nas câmaras de vácuo são medidas através de medidores de membrana capacitiva, estes medidores são utilizados pelo fato de serem medidores diretos de pressão, ou seja, a pressão não depende do tipo de gás que se encontra no ambiente.

Devido ao tamanho reduzido dos capilares caracterizados é necessária a utilização de componentes auxiliares para a inserção dos capilares no sistema de vácuo, a Figura 3 representa o conjunto montado em vista expandida das peças auxiliares utilizadas na montagem dos capilares, O conjunto é composto por duas peças externas utilizadas para a fixação do conjunto ao sistema de vácuo, ambas utilizam conexões do tipo KF10, e duas peças internas que são utilizadas para dar o devido suporte mecânico ao capilar e aos anéis de vedação do conjunto e a Figura 4 mostra o aspecto deste conjunto auxiliar após a montagem.



**Figura 2:** Diagrama do sistema de vácuo.

Certamente não devemos ter vazamento entre o tubo capilar e o seu anel de vedação junto aos cilindros internos conforme mostrado na Figura 3. Outro cuidado fundamental é não sujar ou deixar qualquer tipo de resíduo no interior do capilar, uma vez que uma obstrução alterará o valor de *throughput* do gás que passará por ele. A passagem do gás entre os recipientes tende a diminuir a pressão da câmara de entrada de gases e consumir o gás de trabalho ali presente, para que isto não ocorra é necessário repor a quantidade de gás que saiu, para que a pressão na câmara de entrada se mantenha constante – condição necessária para a ocorrência da bloqueio. Como é praticamente impossível determinar *in situ* a quantidade de gás que deve ser injetada para que a pressão se mantenha constante, um dos acessos da câmara de entrada é mantido aberto e o fluxo de gás proveniente do cilindro de gás é mantido em uma vazão suficientemente alta. Desta forma, o excesso de gás vindo do cilindro é expulso através desta passagem aberta à atmosfera, e assim, a pressão no recipiente de entrada é mantida constante e igual à pressão atmosférica, e ao mesmo tempo com uma atmosfera composta somente do gás de interesse.

A injeção de gás na câmara de entrada é feita de modo que o fluxo que sai do cilindro não incida diretamente na entrada do capilar, ao invés disso, procura-se injetar o gás de forma que ele se distribua uniformemente na câmara. A pressão no recipiente de entrada também é monitorada por um manômetro de membrana capacitiva.

É de vital importância que a taxa de amostragem, na coleta dos pontos experimentais, seja a menor possível, isto garante uma maior precisão durante a caracterização do ponto em que o *throughput* (taxa de transferência) não é mais constante. Para isto foi montado um sistema de coleta automática de dados. Este sistema é composto por um multímetro de bancada que lê o

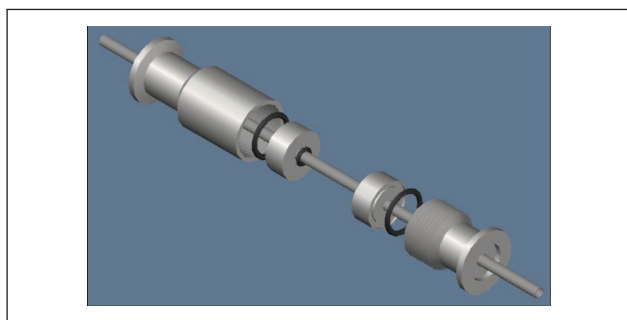


Figura 3: Vista expandida do conjunto.

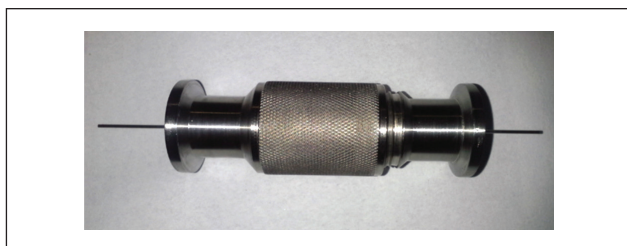


Figura 4: Conjunto após a montagem.

sinal enviado pelo sensor (manômetro) de membrana capacitiva e armazena o sinal lido em formato de Tabela. Este sistema de coleta automatizado tem um intervalo de tempo de amostragem de um segundo.

## RESULTADOS

O resultado proveniente dos procedimentos experimentais descritos na seção Materiais e Métodos se dá através de gráficos que relacionam o aumento na pressão na câmara de vácuo com o tempo. Para minimizar a influência de erros aleatórios durante o tratamento dos dados experimentais obtidos cada capilar é caracterizado duas vezes para o mesmo gás. O resultado que será considerado para as análises corresponde ao valor médio das duas curvas extraídas. A Figura 5 mostra o formato típico das curvas obtidas para a caracterização dos capilares. Em um primeiro momento a evolução da pressão se dá de maneira linear e após o ponto da razão crítica a variação da pressão tende a diminuir até que esta se equalize com a pressão atmosférica, mantendo-se constante, neste ponto não há mais passagem de gás entre os dois recipientes.

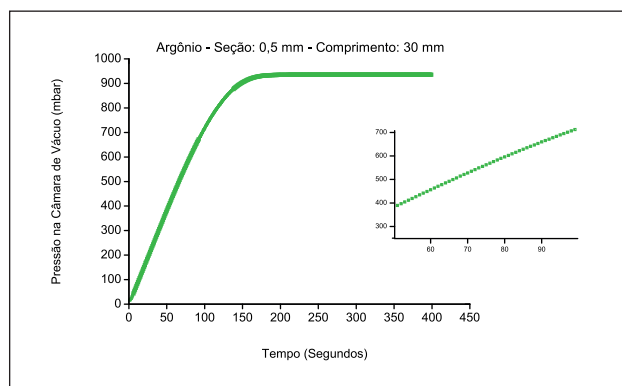


Figura 5: Detalhe do gráfico pressão x tempo.

Esta curva da Figura 5 refere-se ao capilar de 0,5 mm de diâmetro com comprimento de 30 mm, o gás de processo utilizado durante sua extração foi o argônio. O detalhe no gráfico mostra claramente o quão pequeno é o espaçamento entre os pontos experimentais.

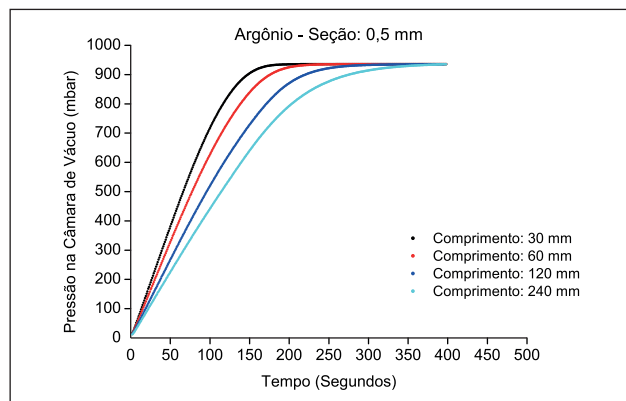
As dimensões dos capilares têm grande influência na passagem do gás entre as câmaras, já que estes são os elementos que mais opõem resistência a esta passagem. Uma maneira de sistematizar o estudo desta influência neste trabalho é fixar dois parâmetros, por exemplo, o tipo de gás e o diâmetro enquanto o comprimento é variado. A Figura 6 retrata esta situação.

O capilar com menor comprimento fornece menor resistência à passagem de gás, ou seja, condutância maior, assim sendo, a pressão na câmara de vácuo para este capilar cresce mais rapidamente. A situação contrária é presenciada pelo capilar de 240 mm, que opõe maior resistência à passagem de gás e conseqüentemente o tempo para que a pressão leve para estabilizar é bem maior do que

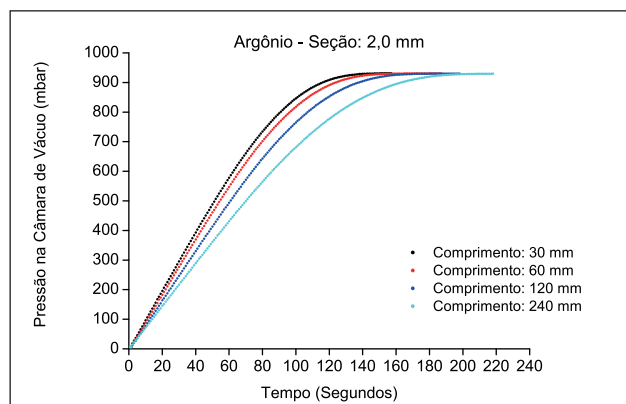


o tempo dos outros capilares. Situação análoga é encontrada para outros diâmetros, como pode ser visto nas Figuras 7 e 8.

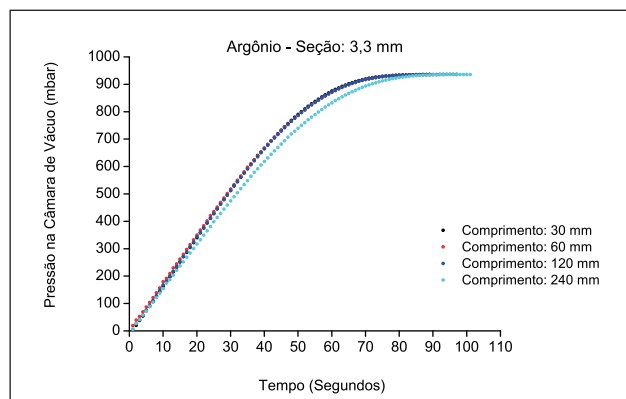
Nota-se que à medida que o diâmetro do capilar cresce, as curvas parametrizadas com os comprimentos tendem a aproximar-se, formando um único aglomerado. Demonstrando desta forma que o diâmetro tem maior influência do que o comprimento na condutância do capilar. Esta afirmação pode ser novamente constatada quando fixamos o comprimento do capilar e parametrizamos seu diâmetro, como pode ser visto na Figura 9.



**Figura 6:** Curvas pressão x tempo para os capilares de 0,5 mm, gás de processo argônio.



**Figura 7:** Curvas pressão x tempo para os capilares de 2,0 mm, gás de processo argônio.

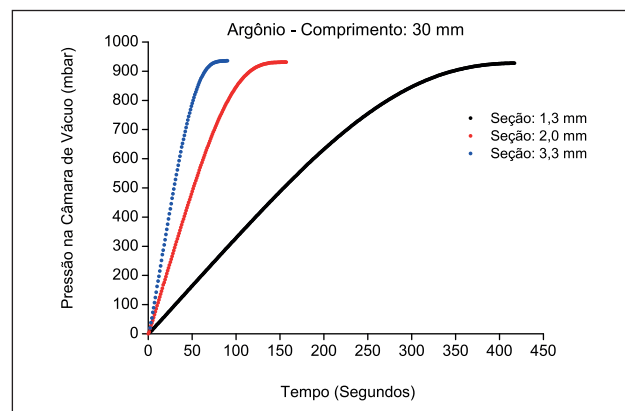


**Figura 8:** Curvas pressão x tempo para os capilares de 3,3 mm, gás de processo argônio.

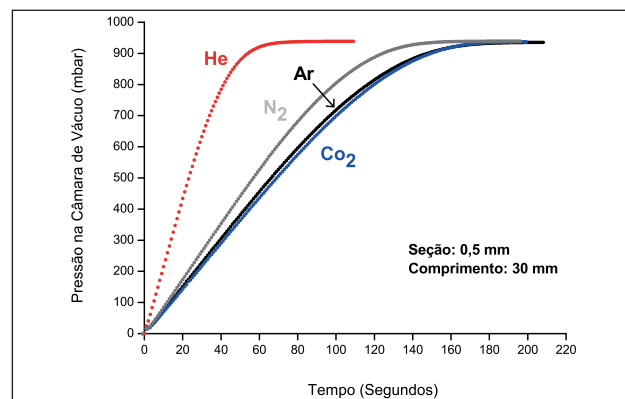
A última possibilidade de combinação dos resultados experimentais é a fixação do capilar enquanto comparamos os dois gases no mesmo gráfico. Quando estamos tratando de orifícios a inclinação das curvas na região linear depende de alguns fatores (vide Equação 7), como  $A$ ,  $p_0$ ,  $R$  e  $T$  são comuns a todos os gases os únicos parâmetros que regem o *throughput* em orifícios são o fator  $\gamma$  e a massa molecular do átomo/molécula. A Figura 10 mostra os resultados da fixação de um capilar enquanto os gases de processo são parametrizados.

Após a coleta e análise parcial de todos os gráficos para verificação de alguma anormalidade, procedeu-se a o tratamento matemático dos gráficos obtidos através da experiência. Este tratamento baseia-se na caracterização do parâmetro da razão crítica,  $r_c$ , para os vários capilares e a realização do cálculo do *throughput* experimental nos mesmos. Uma maneira de analisar o final da região linear das curvas pressão em função do tempo seria traçar uma reta aos pontos experimentais e julgar quando estes pontos começam a se afastar da reta traçada. Esta técnica é de fácil execução e fornece a obtenção dos resultados de maneira rápida e segura.

A desvantagem deste tipo de análise reside no fato de que ela depende muito da acuidade visual do observador e de seu



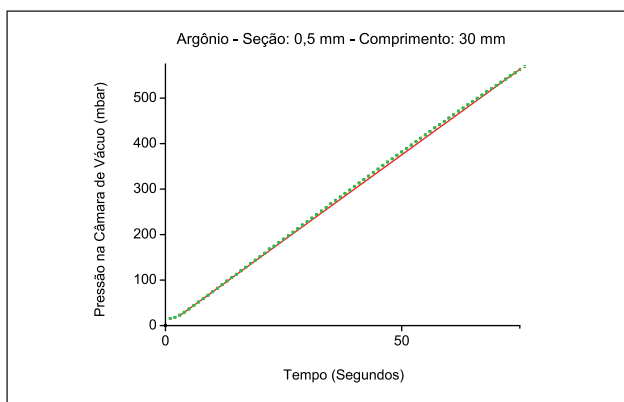
**Figura 9:** Curvas pressão x tempo para o capilar de 30 mm, gás de processo argônio. As curvas em azul, vermelho e preto referem-se respectivamente aos diâmetros (seção) de 3,3 mm, 2,0 mm e 1,3 mm.



**Figura 10:** Curvas pressão x tempo para o capilar de 0,5 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento

discernimento, provavelmente dois observadores distintos não teriam a mesma opinião sobre qual é o último ponto que segue a linearidade nestas curvas. Mas, como em todas as medidas físicas, a incerteza do resultado exato se faz presente, quantificar o quanto importante é esta incerteza faz parte do processo como um todo e é tão importante quanto quantificar o valor em si.

Neste trabalho, a incerteza será quantificada considerando um ponto acima e um ponto abaixo do ponto julgado como correto; esta maneira de fornecer o intervalo de confiança depende muito da densidade de pontos que há na curva, já que em curvas que contém muitos pontos o espaço entre estes será menor e consequentemente o erro experimental será maior. A Figura 11 ilustra o processo descrito anteriormente para encontrar o último ponto linear das curvas pressão versus tempo.



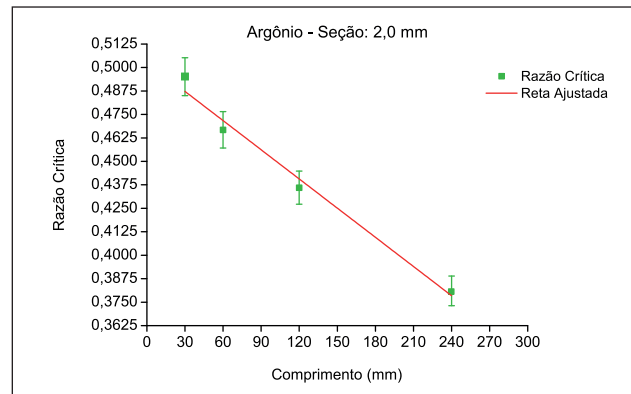
**Figura 11:** Detalhe da curva pressão x tempo para o capilar de 0,5 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, gás de processo argônio.

A decisão de onde ocorre o ponto de não concordância entre as duas linhas – uma curva e outra reta – é de difícil escolha. Para um julgamento mais acertado, procurou-se fazer várias vezes e com mais de uma pessoa. Outra maneira é fazer o julgamento considerando uma pessoa realizando em duas ou três vezes distanciadas de algumas horas entre si.

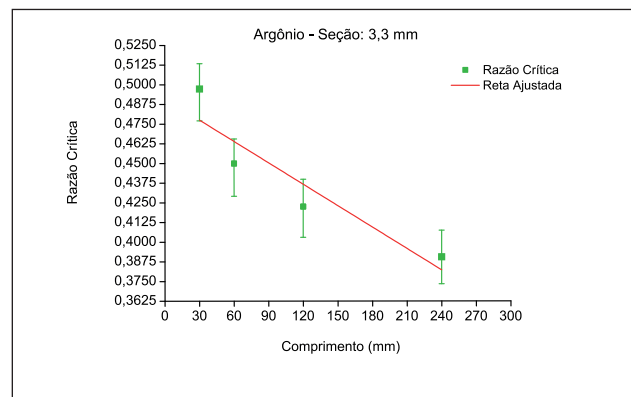
Utilizando esta técnica para determinação do último ponto da região linear é possível determinar os valores da razão crítica,  $r_c$ , para todos os capilares utilizados, verificando qual é a influência das dimensões dos capilares neste parâmetro. As próximas curvas, Figuras 12 e 13, representam qual a influência do comprimento do capilar na razão crítica.

Os gráficos da razão crítica em função do comprimento mostram que há certa tendência deste valor cair linearmente com o comprimento do tubo. A partir destes pontos experimentais é possível ajustar uma reta e descobrir qual seria a razão crítica para um tubo de comprimento nulo (equivalente a um orifício). Nos gráficos mostrados nas Figuras 12 e 13 encontramos um valor de  $(0,503 \pm 0,006)$  e  $(0,491 \pm 0,018)$  para os diâmetros de 2,0 mm e 3,3 mm, respectivamente. A barra de erros é maior para o capilar de 3,3 mm pois os pontos experimentais de sua curva característica são mais espaçados. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos

da razão crítica ( $r_c$ ) para todos os capilares e para os quatro tipos distintos de gás<sup>(6,7)</sup>.



**Figura 12:** Curva  $r_c$  x comprimento para o capilar de 2,0 mm, gás de processo argônio.



**Figura 13:** Curva  $r_c$  x comprimento para o capilar de 3,3 mm, gás de processo argônio.

**Tabela 3:** Razão crítica em função das dimensões do capilar e do gás utilizado.

Gás	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Razão de pressão crítica
$N_2$	0,5	30	$0,551 \pm 0,011$
		60	$0,521 \pm 0,009$
		120	$0,442 \pm 0,007$
		240	$0,443 \pm 0,006$
	1,3	30	$0,545 \pm 0,004$
		60	$0,521 \pm 0,004$
	1,3	120	$0,488 \pm 0,004$
		240	$0,462 \pm 0,003$
	2,0	30	$0,600 \pm 0,013$
		60	$0,568 \pm 0,012$
		120	$0,549 \pm 0,013$
		240	$0,544 \pm 0,011$
$CO_2$	3,3	30	$0,713 \pm 0,024$
		60	$0,695 \pm 0,024$
		120	$0,671 \pm 0,023$
		240	$0,649 \pm 0,022$

...continua

Tabela 3: Continuação...

Gás	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Razão de pressão crítica
CO <sub>2</sub>	0,5	30	0,538±0,013
		60	0,489±0,011
		120	0,463±0,009
		240	0,457±0,001
	1,3	30	0,505±0,005
		60	0,486±0,005
		120	0,476±0,004
		240	0,464±0,003
	2,0	30	0,592±0,016
		60	0,588±0,016
		120	0,521±0,013
		240	0,507±0,012
	3,3	30	0,636±0,026
		60	0,615±0,026
		120	0,598±0,026
		240	0,527±0,025
Ar	0,5	30	0,488±0,016
		60	0,454±0,007
		120	0,448±0,006
		240	0,428±0,005
	1,3	30	0,495±0,003
		60	0,475±0,003
		120	0,459±0,003
		240	0,399±0,002
	2,0	30	0,495±0,010
		60	0,467±0,010
		120	0,436±0,009
		240	0,381±0,008
	3,3	30	0,497±0,020
		60	0,450±0,021
		120	0,423±0,020
		240	0,391±0,017
He	0,5	30	0,486±0,023
		60	0,459±0,018
		120	0,432±0,014
		240	0,418±0,009
	1,3	30	0,492±0,005
		60	0,444±0,005
		120	0,441±0,004
		240	0,371±0,004
	2,0	30	0,486±0,013
		60	0,468±0,012
		120	0,446±0,011
		240	0,422±0,010
	3,3	30	0,482±0,022
		60	0,473±0,022
		120	0,426±0,022
		240	0,402±0,020

## CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

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

No quesito do valor da razão crítica para tubos, de acordo com os dados experimentais obtidos e posterior análise percebe-se certa tendência deste valor cair linearmente à medida que o comprimento da tubulação cresce, e quando se extrapola a reta ajustada para um tubo com comprimento zero (orifício) o valor obtido é semelhante ao fornecido pela literatura.

O fenômeno de escoamento compressível através de tubos mostrou-se extremamente interessante, visto as grandes aplicações para este fenômeno e o fato de existirem poucos resultados experimentais sobre o assunto.

Cabe mencionar que a metodologia de trabalho desenvolvida foi utilizada com sucesso na medição de velocidade de bombeamento de bombas de vácuo, tanto de pré-vácuo como de alto-vácuo. Também foi utilizado este trabalho para a caracterização de sistemas de alto-vácuo de grande porte para indústria de metalização a vácuo de faróis e lanternas. Os resultados alcançados fizeram com que o assunto fosse estudado em maior profundidade no Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da FATEC-SP.

Para alcançar resultados confiáveis, o manuseio de todo o arranjo experimental, em particular o do porta-capilar foi feito utilizando luvas para que a gordura e sujeiras da mão não interfiram na medição. Todas as práticas consagradas em tecnologia do vácuo foram utilizadas para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À empresa PV-Prest Vácuo Ltda. e ao Laboratório de Integração e Testes – LIT do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pelo empréstimo de equipamentos aplicados no desenvolvimento do trabalho e ao CNPq pela concessão de bolsas PIBIC aos estudantes e bolsistas do Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP.

## REFERÊNCIAS

1. DEGASPERI, F. T., Contribuições para Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Campinas – SP. 2006.



2. DEGASPERI, F. T., Modelagem e Análise Detalhada de Sistemas de Vácuo. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Campinas – SP. 2002.
3. SHAMES, I. H., Mecânica dos Fluidos. Princípios Básicos (Volume 1) e Análise e Escoamento (Volume 2). Editora Edgard Blücher Ltda. 1973. São Paulo.
4. ANDERSON JR., J. A., Modern Compressible Flow – With Historical Perspective. McGraw-Hill International Editions. Second Edition. 1990.
5. JOHN, J. E., KEITH, T. G., Gas Dynamics. Third Edition. Pearson Prentice Hall. 2006.
6. VENUTO, E. S. P., Modelagem e Medição de Condutâncias no Regime de Escoamento Viscoso Laminar com Gases Monoatômicos Blocaados. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC. Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos – MPCE. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2013.
7. SANTOS, J. S., Modelagem e Medição de Condutâncias no Regime de Escoamento Viscoso Laminar com Gases Diatômicos e Poliatômicos Blocaados. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC. Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos – MPCE. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP – CEETEPS. 2013.