

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final

Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto, construção e instalação de um bocal sônico para medição de vazão de ar

Autor: **Fernando Palomari Spolidorio**

Orientador: **Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa**

Campinas, Janeiro de 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final

Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto, construção e instalação de um bocal sônico para medição de vazão de ar

Autor: **Fernando Palomari Spolidorio**

Orientador: **Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa**

Curso: Engenharia Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Campinas, 2016

S.P. – Brasil

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido completado sem a ajuda das pessoas às quais presto minha homenagem.

Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa pela orientação, paciência e dedicação ao cumprimento do trabalho.

Aos técnicos, Alcimar da Silveira e Adriano Navarro de Moraes pela ajuda técnica quanto a usinagem e instalação do bocal.

Aos diversos alunos da graduação e da pós-graduação que prestaram ajuda em momentos de dificuldade.

À minha família pelo apoio irrestrito durante as várias etapas de minha vida que me trouxeram até aqui.

Aos meu colegas e amigos pelo suporte contínuo e, finalmente, à minha namorada, Vitoria Jacarandá Lakiss, pela ajuda incansável em variadas situações de dificuldade.

Índice

	Lista de Figuras	2
	Lista de Tabelas	2
	Nomenclatura	2
Capítulo 1	Introdução	5
Capítulo 2	Revisão bibliográfica	6
Capítulo 3	Cálculos teóricos	10
3.1	Pressão, densidade, temperatura e Mach na garganta	10
3.2	Pressão, densidade, temperatura e Mach na entrada do bocal	12
3.3	Número de Reynolds e coeficientes de descarga	13
3.4	Backpressure máximo	15
Capítulo 4	Instrumentação	15
4.1	Construção do bocal de Venturi	15
4.2	Instrumentos e procedimento experimental	16
Capítulo 5	Resultados e discussão	19
5.1	Bocal com garganta de 1 mm de diâmetro	19
5.2	Bocal com garganta de 0,6 mm de diâmetro	24
Capítulo 6	Calibração do bocal	26
6.1	Metodologia de calibração	26

6.2	Equação de calibração	27
6.3	Programa supervisorio	28
Capítulo 7	Conclusão	33
	Referências bibliográficas	33

Lista de Figuras

Figura 1: Padrões de escoamento bifásico	5
Figura 2: Croquis do bocal de Venturi.	7
Figura 3: Relação entre vazão mássica e razão de pressões.	8
Figura 4: Dimensões do bocal de acordo com a norma ISO 9300:2005.	16
Figura 5: Bancada experimental.	17
Figura 6: Medidor de pressão diferencial Validyne.	17
Figura 7: Medidor de pressão e temperatura SMAR.	17
Figura 8: Tambor rotativo.	18
Figura 9: Posicionamento dos instrumentos conforme a norma ISO 9300:2005.	18
Figura 10: Curvas experimentais obtidas pelo bocal sônico.	21
Figura 11: Curvas experimentais obtidas de pelo bocal sônico e corrigidas pelo coeficientes de descarga.	22
Figura 12: Velocidade do escoamento de ar em relação à razão de pressões P_b/P_0 .	222
Figura 13: Linearidade da vazão mássica em função de P_0 .	23
Figura 14: Seção cônica do bocal.	24
Figura 15: Novo bocal de 0,6 mm de diâmetro de garganta.	25
Figura 16: Reta de calibração do bocal de 0,6 mm	25
Figura 17: Válvulas da linha experimental.	26
Figura 18: Linearidade entre a vazão mássica e a pressão de estagnação.	28

Lista de Tabelas

Tabela 1: Vazão mássica de acordo com a pressão de estagnação.	10
Tabela 2: Pressão crítica de acordo com a pressão de estagnação	10

Tabela 3: Densidade crítica de acordo com a pressão de estagnação.	11
Tabela 4: Velocidade na garganta de acordo com a pressão de estagnação.	11
Tabela 5: Condições de entrada em um bocal de diâmetro de garganta de 1 mm.	12
Tabela 6: Número de Reynolds para diferentes diâmetros e pressões.	14
Tabela 7: Coeficientes para cálculo de C_d' .	14
Tabela 8: Coeficientes de descarga de acordo com a norma ISO 9300:2005.	14
Tabela 9: Pressão máxima a juzante do bocal.	15
Tabela 10: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=1,05$ bar.	19
Tabela 11: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=2,20$ bar.	20
Tabela 12: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=3,20$ bar.	20
Tabela 13: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=4,20$ bar.	21

Nomenclatura

Letras Latinas

P_0	Pressão de estagnação	[bar]
P^*	Pressão crítica	[bar]
T_0	Temperatura de estagnação	[K]
T^*	Temperatura crítica	[K]
c_p	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
c_v	Calor específico a volume constante	[kJ/kg.K]
k	Razão entre os calores específicos	-
A_t	Área transversal da garganta	[m ²]

A_l	Área transversal da tubulação da linha	[m ²]
\dot{m}^*	Vazão mássica engasgada	[kg/s]
R	Constante universal dos gases ideais	[kJ/kg.K]
V_t	Velocidade do escoamento na garganta	[m/s]
c	Velocidade do som	[m/s]
d	Diâmetro da garganta	[m]

Letras Gregas

ρ_0	Densidade de estagnação	[kg/m ³]
ρ^*	Densidade crítica	[kg/m ³]

Capítulo 1

Introdução

Bocais de vazão crítica de Venturi são usados para determinar a taxa de escoamento de massa de um gás em um sistema. O laboratório de escoamentos multifásicos do Departamento de Energia da FEM opera desde 1993 com objetivo de estudo sendo o escoamento simultâneo de gás e líquido em tubulações que ocorre com frequência nas indústrias de produção de petróleo e energia nuclear, também estando presente em processos químicos de diversas plantas de produção energética. A mistura bifásica se distribui em diferentes arranjos espaciais, também denominados por padrões, dentro da tubulação em que escoam. Tais padrões são definidos pelas características operacionais da linha, entre eles: diâmetro e inclinação do tubo, vazões de gás e de líquido, e também as propriedades físicas de transporte de fluidos. A Figura 1 ilustra os padrões de acordo com a disposição do gás, ou seja, bolhas dispersas, intermitente, agitado ou anular.

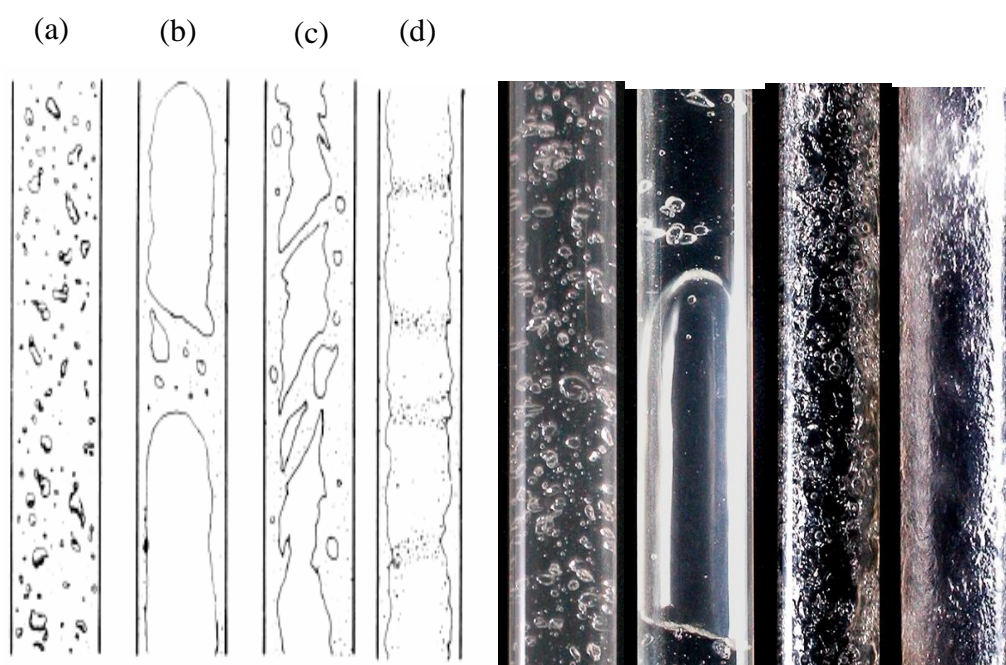


Figura 1: Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em linhas verticais, representação esquemática e fotografias. (a) bolhas dispersas, (b) intermitente, (c) agitado e (d) anular.

Diferentes mecanismos físicos controlam a interação das estruturas de gás-líquido de acordo com o padrão de escoamento regente. Tais mecanismos determinam as taxas de transferência de massa, quantidade de movimento e energia devido à presença das interfaces. Deste modo, o conhecimento da vazão mássica de gás é de suma importância já que este define os fenômenos bifásicos em todos os padrões apresentados na Figura 1.

É comum a ocorrência de flutuações de pressão na linha devido às distribuições de fase, que por sua vez faz com que a vazão de gás também flutue. Assim, a instalação de um bocal sônico na linha permitirá isolar as perturbações de pressão causadas pelas diferentes fases ao passarem pelo mesmo, possibilitando diminuir a incerteza de medição do gás. Deste modo, o projeto de Iniciação Científica visou melhorar a infra-estrutura laboratorial por meio do projeto, construção, instalação e operação de um bocal sônico para medição de vazão.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Para que ocorra escoamento de um fluido em uma tubulação é necessária a existência de uma diferença de pressões entre suas extremidades. Supondo-se que o bocal seja instalado na tubulação da linha do laboratório como ilustra a Figura 1, tal situação pode ser obtida usando-se um reservatório de gás a P_0 e T_0 (pressão e temperatura de estagnação, ou seja, condições para um fluido desacelerado até o repouso isentropicamente) a montante do bocal, e uma combinação de bomba/válvula de vácuo para criação de uma baixa pressão, P_b (backpressure), a jusante do mesmo. Estamos interessados nas variações paramétricas do gás seco ao escoá-lo através do bocal. Além, também é importante conhecer como a taxa de vazão mássica aumenta conforme diminui-se gradativamente P_b . A pressão no plano de saída do bocal, P_e , será frequentemente igual a P_b , mas nem sempre.

Quando a válvula que controla a vazão de gás está fechada, P_0 é uniforme em todo o bocal e não existe escoamento. Entretanto, se a pressão P_b é reduzida abaixo de

P_0 , inicia-se o escoamento. Conforme abaixamos progressivamente P_b (sendo P_e ainda igual a P_b), o escoamento passará por uma região subsônica e a vazão continuará a crescer, assim como o número de Mach.

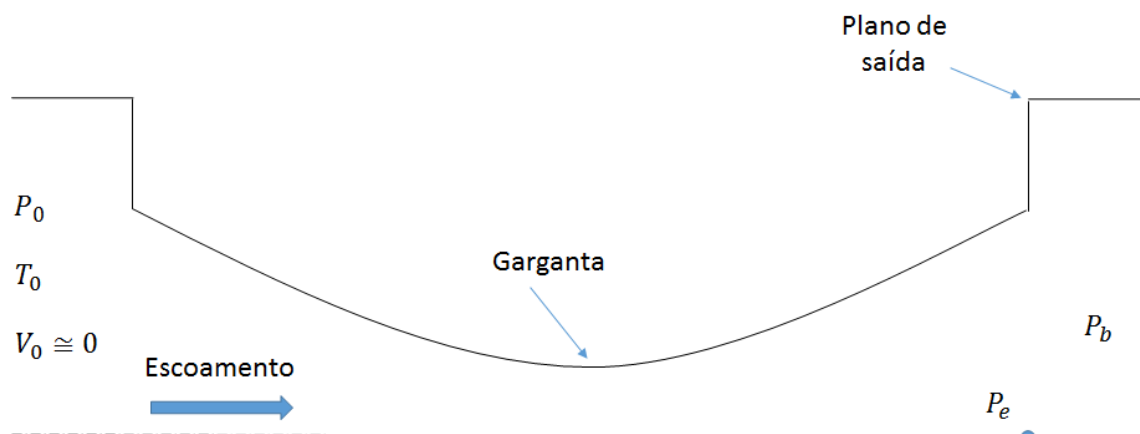


Figura 2: Croquis do bocal de Venturi.

Entretanto, existe um limite para o número de Mach. O único local passível de atingir a unidade de Mach é onde a variação da área transversal do bocal é nula, ou seja, na garganta. Portanto, não é possível atingir condições sônicas na seção convergente do bocal pois assumimos que o escoamento comece do repouso ($M=0$). Caso assumissemos escoamento supersônico ($M>1$) na saída (garganta), obrigatoriamente teria-se que ter $M=1$ na seção convergente, o que viola a afirmação feita.

Deste modo, a vazão máxima se dá em condições sônicas na garganta, e $P_e=P_b=P^*$ que é a pressão crítica que pode ser calculada a partir da Equação 1:

$$\frac{P_0}{P^*} = \left[\frac{k+1}{2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (1)$$

Nesta condição, temos um “choked flow”, que estabelece uma vazão máxima que não pode ser aumentada. Considerando-se o ar seco como gás ideal, k (razão entre os calores específicos, $\frac{c_p}{c_v}$) é 1,4, então $P_b/P_0 = 0,528$ como mostra a Figura 2:

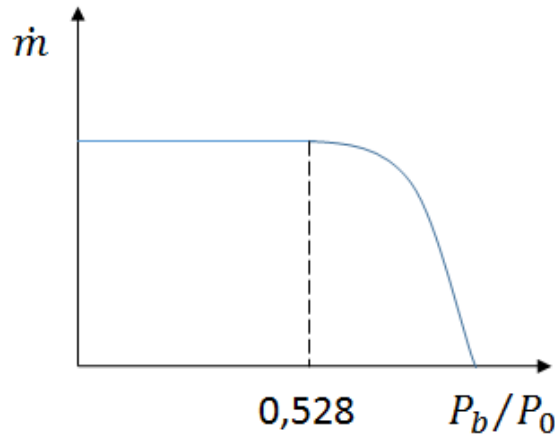


Figura 3: relação entre vazão mássica e razão de pressões.

Caso continuássemos a diminuir o valor de P_b , ao contrário do esperado, a vazão mássica não aumentaria, mantendo-se constante, e a distribuição de pressão permaneceria sendo $P_e = P^* > P_b$. Ao sair do bocal, o escoamento se ajusta a P_b . Entretanto, o faria de forma inesentrópica e tridimensional numa série de ondas e choques. Sendo assim, os conceitos de escoamento isentrópicos não podem mais ser aplicados.

Apesar do conceito parecer estranho, para o aumento da vazão mássica além do ponto crítico seria necessário $M_e > 1$, o que não é possível como já discutido. Outra explicação é que assim que o escoamento atinge a condição sônica, ele se torna “surdo” às mudanças de pressão a jusante. Qualquer alteração no backpressure se propagaria no fluido na velocidade do som em todas as direções, desta forma a velocidade sônica do escoamento não permite a transmissão de tal informação para o montante do bocal.

Mesmo que o escoamento isentrópico seja uma idealização, é um bom método de aproximação para o comportamento real do bocal já que o mesmo acelera o fluido, fazendo com que o gradiente interno de pressão seja favorável. Isso faz com que as camadas limites sejam finas e minimizem os efeitos de atrito.

A temperatura na garganta, T^* , é calculada levando-se em consideração a temperatura de estagnação (T_0) e, novamente, k . A relação é mostrada a seguir na Equação 2:

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

A Equação 3 descreve a relação entre a densidade crítica do escoamento, ρ^* , e a densidade de estagnação (ρ_0) e k.

$$\frac{\rho_0}{\rho^*} = \left[\frac{k+1}{2} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (3)$$

A densidade nas condições de estagnação pode ser calculada usando-se a equação de estado dos gases ideais que relaciona P_0 , T_0 e a constante universal dos gases ideais, R ($287 \frac{N.m}{Kg.K}$), como mostra a Equação 4:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} \quad (4)$$

A vazão mássica pode ser calculada a partir da Equação 5 que relaciona a vazão crítica com a área transversal da garganta (A_t), P_0 , T_0 , R e k.

$$\dot{m}^* = A_t P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (5)$$

Inicialmente, projetamos um bocal de diâmetro na garganta de 1 mm que foi submetido a diferentes pressões de estagnação (1-4 bar). A dimensão foi escolhida para garantir que a potência dos compressores da linha mantivessem a pressão constante.

Para garantir o bom funcionamento das medições feitas com o bocal foi necessário que as pressões e temperaturas de estagnação estivessem de acordo com os valores previamente estabelecidos. Tal garantia é dada através da instalação de tomadas de pressão e temperatura tanto a montante quanto a juzante do bocal. Todas as posições de instalação e dimensões do bocal seguiram as instruções estabelecidas pela norma ISO 9300:2005 ("Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles"). A opção pelo uso da norma se deu ao fato da mesma ser utilizada mundialmente, facilitando a comparação com metodologias e resultados de experimentos já realizados por outros estudiosos.

A instalação do bocal na linha de teste foi feita com a ajuda de duas mangas que foram responsáveis por manter o bocal em posição.

Capítulo 3

Cálculos teóricos

3.1 Pressão, densidade, temperatura e Mach na garganta

Para calcular as condições de escoamento no bocal de Venturi devemos primeiramente considerar as condições de estagnação a montante do bocal. A temperatura ambiente foi considerada como a de estagnação ($T_0 = 300K$) e variou-se os valores da pressão de estagnação manométrica ($P_{01} = 1 \text{ bar}$, $P_{02} = 2 \text{ bar}$, $P_{03} = 3 \text{ bar}$, $P_{04} = 4 \text{ bar}$) na linha em que o bocal foi instalado; a tubulação de entrada tem 26 mm de diâmetro interno.

Entre os parâmetros calculados estão a vazão mássica, pressão, densidade e velocidade de saída do bocal. Os valores obtidos para a vazão mássica de acordo com a Equação 5 estão dispostos na Tabela 1:

Tabela 1: Vazão mássica de acordo com a pressão de estagnação.

P_0	\dot{m}^*
1	0,0003
2	0,0005
3	0,0007
4	0,0009

Os respectivos resultados para a pressão crítica resultantes da Equação 1 são mostrados abaixo:

Tabela 2: Pressão crítica de acordo com a pressão de estagnação

P_0	P^*
1	1,58
2	1,06
3	1,58
4	2,11

Já a Tabela 3 mostra os valores obtidos para a densidade de estagnação a partir das Equações 3 e 4:

Tabela 3: Densidade crítica de acordo com a pressão de estagnação.

P_0	ρ_0	ρ^*
1	2,26	1,43
2	3,42	2,17
3	4,58	2,90
4	5,74	3,64

Ao relacionarmos os valores de vazão mássica, densidade e área do orifício podemos derivar a Equação 6 para a velocidade do escoamento na garganta:

$$V_t = \frac{\dot{m}^*}{\rho^* A_t} \quad (6)$$

Deste modo, para as diferentes vazões e densidades encontradas previamente, a Tabela 4 mostra os valores obtidos da velocidade na garganta:

Tabela 4: Velocidade na garganta de acordo com a pressão de estagnação.

P_0	V_t
1	316,94
2	316,94
3	316,94
4	316,94

A Equação 7, quando avaliada em $T=300K$, confirma o valor de 316 m/s quando o escoamento se encontra engasgado:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (7)$$

3.2 Pressão, densidade, temperatura e Mach na entrada do bocal

Para calcular as condições de entrada no bocal (subscrito “i”) é necessária a realização de iterações matemáticas com as Equações 8 e 9. Diferentes valores para o Mach acarretam em diferentes valores de velocidade; deste modo o processo deve ser repetido até que as duas equações converjam.

$$V_i = \sqrt{kRT_0}M_i \quad (8)$$

$$V_i' = \frac{\dot{m}^*}{\rho_i A_l} \quad (9)$$

Sabendo agora o número de Mach na entrada do bocal, as outras propriedades do escoamento estão definidas de acordo com as equações a seguir:

$$\rho_i = \rho_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_i^2 \right]^{-\frac{1}{k-1}} \quad (10)$$

$$T_i = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_i^2 \right]^{-1} \quad (11)$$

$$P_i = P_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_i^2 \right]^{-\frac{k}{k-1}} \quad (12)$$

A Tabela 5 mostra as condições de entrada de acordo com as equações acima para o bocal de 1 mm:

Tabela 5: Condições de entrada em um bocal de diâmetro de garganta de 1 mm.

P_0	ρ_i	T_i	P_i	V_i	Mach
1	2,31	300	1	0,28	0,0008
2	3,64	300	2	0,28	0,0008
3	4,66	300	3	0,28	0,0008
4	5,82	300	4	0,28	0,0008

Como podemos observar, a velocidade de entrada do escoamento no bocal é baixa. Deste modo, quando comparada à velocidade do som, o número de Mach se mostra muito baixo; isso faz com que a pressão de entrada no bocal seja a própria pressão de estagnação, o mesmo acontece com a temperatura. Tal comportamento não seria obtido caso a velocidade de entrada fosse alta, o que causaria divergência de valores entre a pressão de estagnação e a absoluta.

3.3 Número de Reynolds e coeficientes de descarga

Calculamos a viscosidade do fluido ao passar pela garganta através da Equação 13 (Sutherland):

$$\mu = \mu_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_{ref} + S}{T + S} \quad (13)$$

Sabemos que a viscosidade é uma função da temperatura, ou seja, $\mu = \mu(T)$. Deste modo, adotamos a temperatura de referência $T_{ref} = 273,15K$ que corresponde à viscosidade de referência $\mu_{ref}(273,15) = 1,72 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$; a Equação 11 resulta na temperatura local (T) de 250K. A temperatura de Sutherland (S) é considerada constante (110,4K).

Deste modo, $\mu(250) = 1,6 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$. Tendo as informações a respeito da densidade, viscosidade, diâmetro da garganta e velocidade de saída do bocal podemos calcular o número de Reynolds para aquele local através da Equação 14::

$$Re_d = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (14)$$

Como o projeto exige que diferentes pressões sejam experimentadas, diferentes valores de Reynolds foram obtidos e estão dispostos na Tabela 6:

Tabela 6: Número de Reynolds para o bocal de 1 mm.

P_0	Re_d
1	2,83E+04
2	4,29E+04
3	5,75E+04
4	7,21E+04

Como os dados calculados se tratam de valores teóricos, é necessário ajustá-los ao cenário experimental. Tal correção é feita com o uso do coeficiente de descarga (Cd') que é a razão entre a vazão mássica teórica e a experimental. O cálculo é feito pela Equação 15 fornecida pela norma:

$$Cd' = a - bRe_{nt}^{-n} \quad (15)$$

Para bocais de Venturi toroidais e bem acabados, a norma estabelece os seguintes valores para os coeficientes:

Tabela 7: Coeficientes para cálculo de Cd' .

a	0,9985
b	3,412
n	0,5

Deste modo, para diferentes pressões aplicadas teremos os coeficientes de descarga mostrados na Tabela 8:

Tabela 8: Coeficientes de descarga de acordo com a norma ISO 9300:2005.

P_0	Cd'
1	0,978
2	0,979
3	0,982
4	0,984

3.4 Backpressure máximo

Para que exista a garantia de que o escoamento se mantenha no regime sônico foi necessário o cálculo para a máxima pressão permitida a juzante do bocal conforme apresentado na teoria. A norma sugere o uso da Equação 16 para tal cálculo:

$$\left(\frac{P_b}{P_0}\right)_{max} = 0,8 \left[\left(\frac{P_b}{P_0}\right) - r_* \right] + r_* \quad (16)$$

Onde r_* é dado por:

$$r_* = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (17)$$

Sendo a razão $\left(\frac{P_b}{P_0}\right)$ obtida a partir da Equação 1, a Tabela 9 dispõe os valores obtidos:

Tabela 9: Pressão máxima a juzante do bocal.

P_0	$P_{b\,máx}$
1	0,60
2	2,05
3	4,34
4	7,48

Capítulo 4

Instrumentação

4.1 Construção do bocal de Venturi

A modelagem do bocal foi feita seguindo-se o padrão sugerido pela norma ISO 9300:2005. A usinagem se deu através de um processo de furação seguido de erosão eletrônica devido às pequenas dimensões envolvidas. O material escolhido foi o aço

inoxidável (INOX 304) com acabamento espelhado devido à necessidade de baixa rugosidade na superfície (evita o aparecimento de grandes camadas limites no escoamento do ar). A razão pela escolha do aço se dá pela sua alta resistência a oxidação e sua facilidade de usinagem. A Figura 3 ilustra as dimensões do bocal em função do diâmetro da garganta:

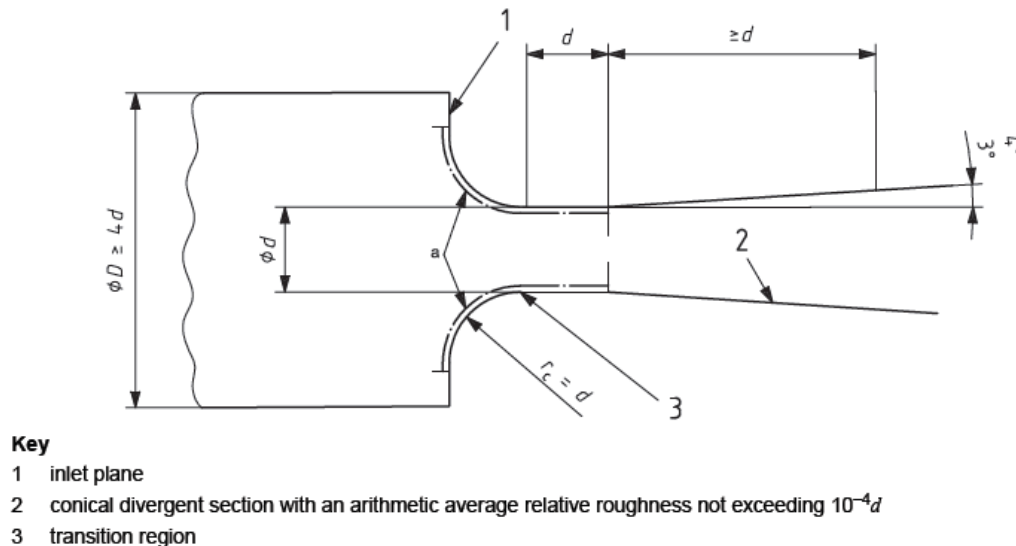


Figura 4: Dimensões do bocal de acordo com a norma ISO 9300:2005.

4.2 Instrumentos e procedimento experimental

O experimento envolveu alguns instrumentos imprescindíveis para a tomada de dados e são mostrados na Figura 4. Primeiramente, foi necessário o uso de três compressores (70 pcm) de ar para que houvesse escoamento e uma série de válvulas instaladas na linha do laboratório para controle de vazão.

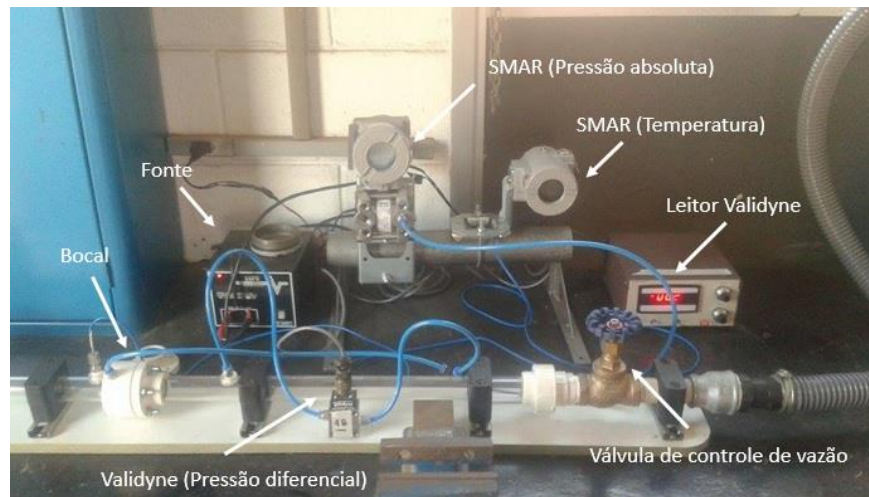


Figura 5: Bancada experimental.

Tanto para a tomada da pressão absoluta quanto para a temperatura na tubulação utilizou-se um SMAR (Figura 5); ao mesmo tempo foi utilizado um Validyne (Figura 6) para medição da pressão diferencial entre as regiões a montante e a juzante do bocal.



Figura 6: Medidor de pressão diferencial Validyne.



Figura 7: Medidor de pressão e temperatura SMAR.

A leitura da vazão volumétrica de ar foi feita com um tambor rotativo (Ritter® 50L) como mostra a Figura 7:



Figura 8: Tambor rotativo.

A norma também exige que o diâmetro da seção de entrada, D , seja pelo menos quatro vezes o diâmetro da garganta (d). Os instrumentos foram instalados de acordo com a norma em questão e suas posições são mostradas na Figura 8:

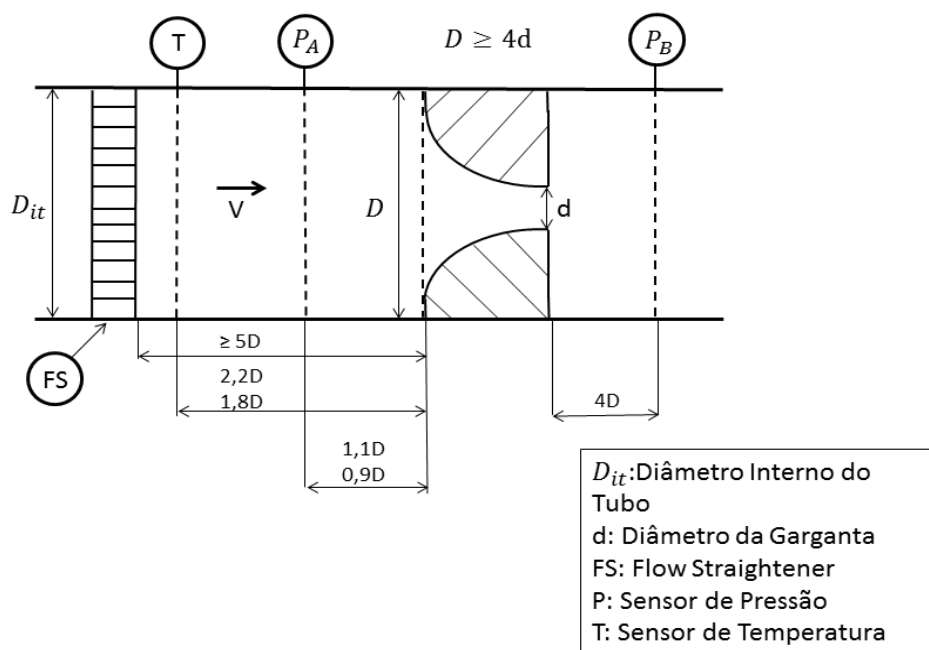


Figura 9: Posicionamento dos instrumentos conforme a norma ISO 9300:2005.

Ao iniciar os compressores e abrir as válvulas de controle damos início ao escoamento do ar. O experimento consistiu em tomar o tempo que um determinado volume

levava para escoar através do bocal. O bocal de 1 mm tem uma pequena vazão e, deste modo, contabilizou-se o tempo que 25L de ar levavam para escoar.

.Capítulo 5

Resultados e discussão

5.1 Bocal com garganta de 1 mm de diâmetro

Após a coleta de dados na linha de escoamento do laboratório, os mesmos foram processados em planilhas de Excel com o intuito de compará-los com os valores obtidos dos cálculos teóricos. O principal critério de comparação foi o coeficiente de descarga que classifica a precisão do bocal.

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos ao aplicarmos pressões manométricas na linha de 1,05, 2,20, 3,20 e 4,20 bar, respectivamente:

Tabela 10: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=1,05$ bar.

<i>CEPAGRI: Temperatura amb: 23,9°C; Pressão ambiente:0,928 atm / Cd'=0,978</i>						
P_{man}	P_{abs}	T	Tempo	P_b/P_0	m^*	Cd
1,05	1,99	298,18	89,83	0,51	1,84E-04	0,518
1,05	1,99	297,28	66,66	0,47	2,48E-04	0,698
1,05	1,99	297,88	57,80	0,44	2,86E-04	0,805
1,05	1,99	297,78	52,60	0,40	3,15E-04	0,885
1,05	1,99	297,98	51,99	0,34	3,19E-04	0,895
1,05	1,99	298,08	49,52	0,32	3,34E-04	0,940
1,05	1,99	298,28	48,48	0,25	3,42E-04	0,960
1,05	1,99	298,18	48,16	0,22	3,44E-04	0,966
1,05	1,99	298,18	48,07	0,16	3,44E-04	0,968
1,05	1,99	298,18	47,69	0,07	3,47E-04	0,976
1,05	1,99	298,18	47,91	0,10	3,46E-04	0,971

Tabela 11: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=2,20$ bar.

CEPAGRI: Temperatura amb.: 22,7°C; Pressão amb.: 0,926 atm / Cd'=0,979						
P_{man}	P_{abs}	T	Tempo	P_b/P_0	m^*	Cd
2,20	3,13	298,88	92,50	0,67	2,96E-04	0,515
2,20	3,13	298,78	64,08	0,60	4,27E-04	0,744
2,20	3,13	298,58	58,37	0,55	4,69E-04	0,818
2,20	3,13	298,38	55,26	0,50	4,96E-04	0,864
2,20	3,13	298,38	54,31	0,48	5,05E-04	0,879
2,20	3,13	298,28	53,40	0,46	5,13E-04	0,894
2,20	3,13	298,18	52,22	0,43	5,25E-04	0,914
2,20	3,13	297,98	51,74	0,40	5,30E-04	0,923
2,20	3,13	297,98	51,88	0,39	5,28E-04	0,921
2,20	3,13	298,18	51,56	0,34	5,32E-04	0,922
2,20	3,13	297,98	51,72	0,21	5,30E-04	0,926

Tabela 12: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=3,20$ bar.

CEPAGRI: Temperatura amb.: 25,1°C; Pressão amb.: 0,930 atm / Cd'=0,982						
P_{man}	P_{abs}	T	Tempo	P_b/P_0	m^*	Cd
3,20	4,14	298,88	50,56	0,69	5,55E-04	0,730
3,20	4,14	298,78	41,58	0,59	6,75E-04	0,889
3,20	4,14	298,58	38,69	0,52	7,25E-04	0,955
3,20	4,14	298,38	37,39	0,45	7,50E-04	0,989
3,20	4,14	298,38	37,53	0,39	7,48E-04	0,985
3,20	4,14	298,28	37,44	0,30	7,50E-04	0,987
3,20	4,14	298,18	37,45	0,21	7,53E-04	0,992
3,20	4,14	297,98	37,54	0,14	7,50E-04	0,988
3,20	4,14	297,98	37,33	0,05	7,54E-04	0,994

Tabela 13: Vazão mássica experimental e coeficiente de descarga para $P_{man}=4,20$ bar.

CEPAGRI: Temperatura amb.: 25,1°C; Pressão amb.: 0,930 atm / $Cd'=0,984$						
P_{man}	P_{abs}	T	Tempo	P_b/P_0	m^*	Cd
4,20	5,14	300,68	45,60	0,76	5,99E-04	0,635
4,20	5,14	301,08	35,85	0,69	7,60E-04	0,807
4,20	5,14	301,68	31,37	0,62	8,67E-04	0,920
4,20	5,14	301,98	29,88	0,56	9,10E-04	0,965
4,20	5,14	302,08	29,24	0,49	9,29E-04	0,986
4,20	5,14	302,28	29,35	0,41	9,25E-04	0,982
4,20	5,14	302,38	29,23	0,33	9,29E-04	0,985
4,20	5,14	302,58	29,28	0,22	9,27E-04	0,983
4,20	5,14	302,68	29,43	0,11	9,21E-04	0,978
4,20	5,14	302,68	29,32	0,02	9,25E-04	0,981

Os dados apresentados nas tabelas acima são mostrados graficamente na Figura 9:

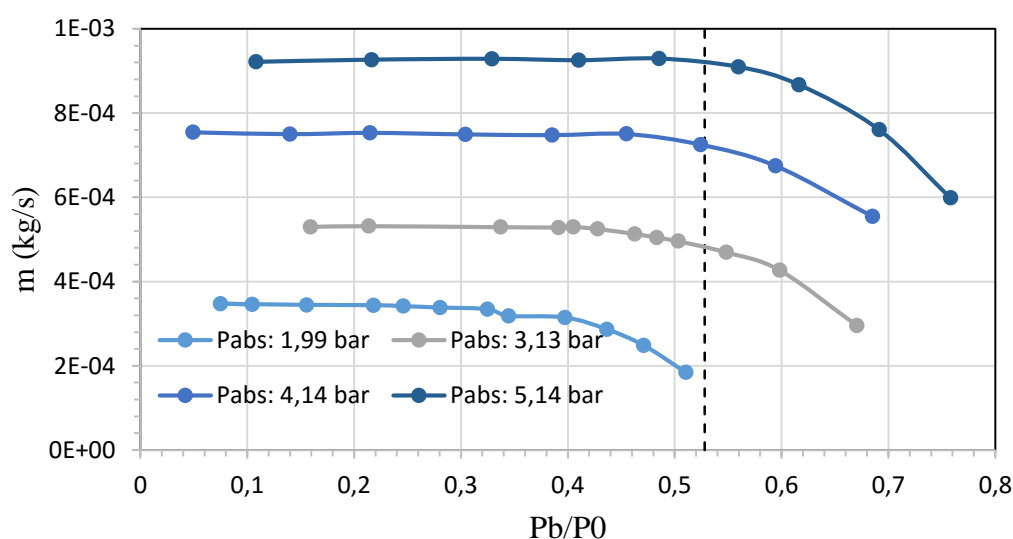


Figura 10: Curvas experimentais obtidas do bocal sônico.

Ao analisarmos a Figura 9, podemos notar que a vazão mássica começa a se comportar de maneira constante a partir da região de $\frac{P_b}{P_0} \cong 0,4$. A única curva que se mostra divergente é para $P_{abs} = 1,99$ bar. Entretanto esse comportamento se deve ao baixo número de pontos coletados uma vez que o controle de vazão pelas válvulas foi dificultado pela alta sensibilidade da vazão a qualquer variação nas válvulas; caso conseguíssemos uma maior série de dados a curva provavelmente seguiria o padrão desenvolvido pelas outras conforme

sua continuidade sugere. A Figura 10 mostra as curvas de vazão quando corrigidas com os coeficientes de descarga obtidos:

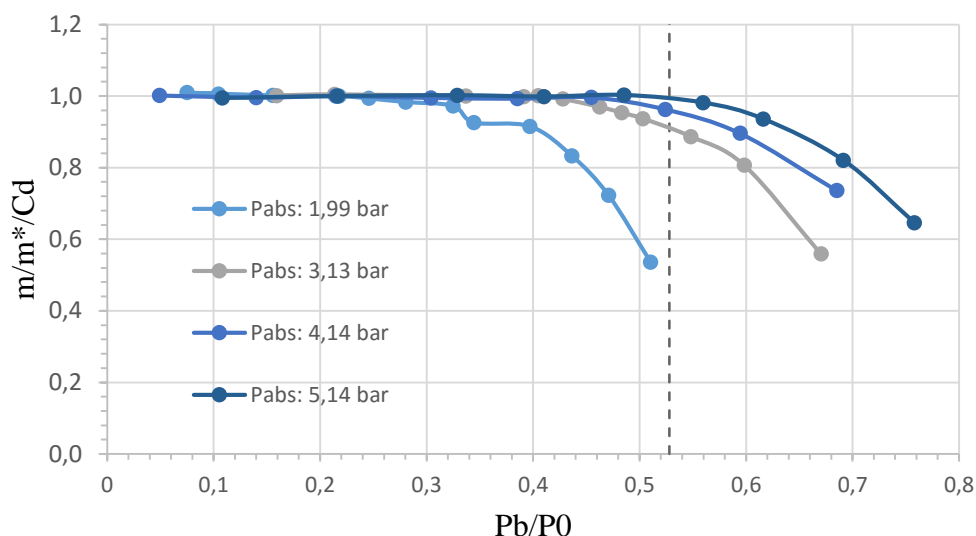


Figura 11: Curvas experimentais obtidas de pelo bocal sônico e corrigidas pelo coeficientes de descarga.

Observa-se na Figura 10 que as curvas de P_{abs} , quando em regime sônico, tendem à unidade mostrando que o bocal comporta como esperado. A Figura 11 mostra a velocidade do escoamento (JG) em relação à razão de pressões P_b/P_0 , evidenciando a queda de velocidade conforme as pressões tendem a se igualar.

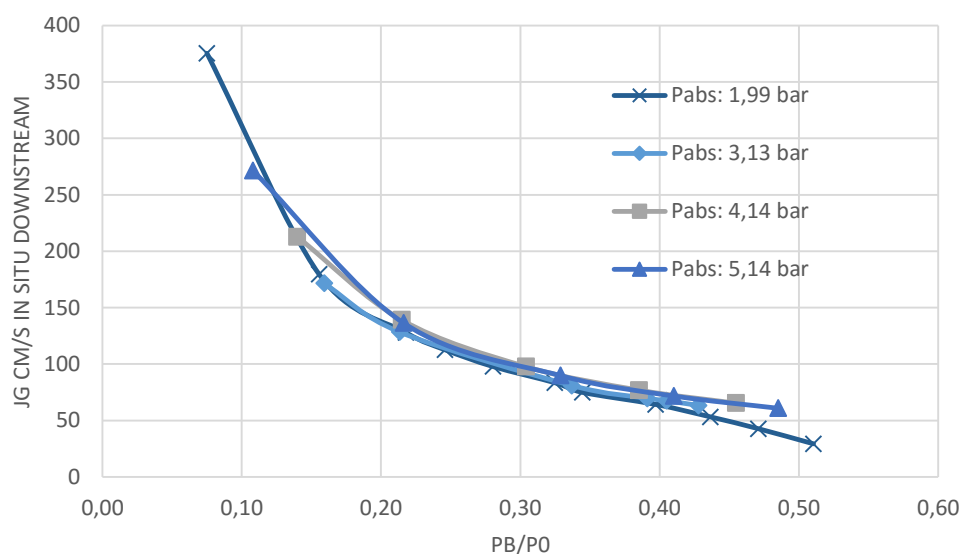


Figura 12: Velocidade do escoamento de ar em relação à razão de pressões P_b/P_0 .

A Figura 12 mostra a linearidade da vazão mássica (em regime sônico) em função do aumento de P_0 , o que já era esperado como sugere a Equação 5:

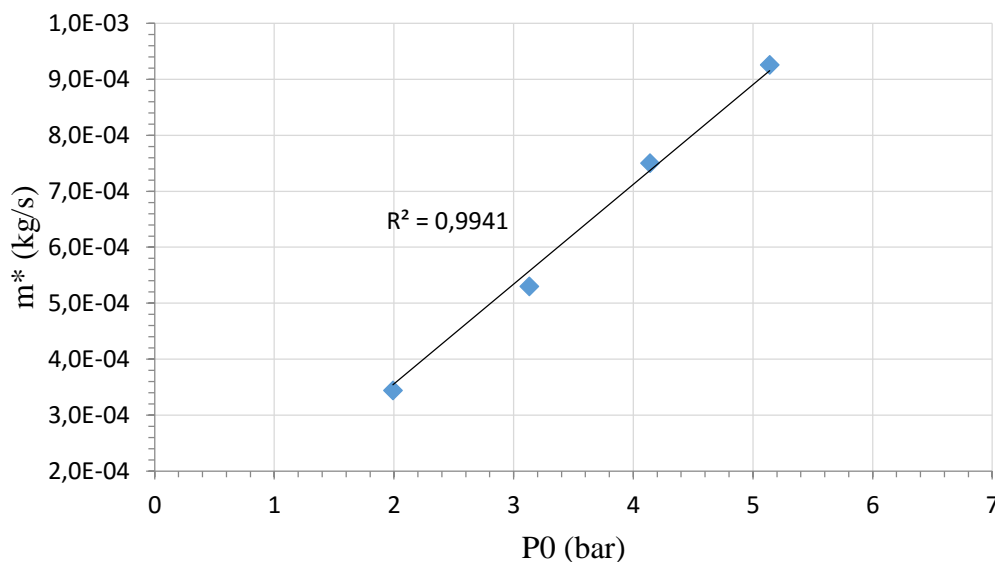


Figura 1: Linearidade da vazão mássica em função de P_0 .

O desvio dos valores da vazão mássica em relação aos valores teóricos pode se dar, principalmente, pela qualidade da usinagem do bocal. As pequenas dimensões envolvidas dificultam o acabamento da usinagem já que se torna custoso. A Figura 13 mostra a foto do furo de saída do bocal (seção cônica) tirada com o auxílio de um microscópio do Laboratório de Metalurgia Física e Solidificação (Profº. Dr. Rubens Caram/FEM). Através da análise da imagem de acordo com a escala estima-se que $D = 1,46 \text{ mm}$.

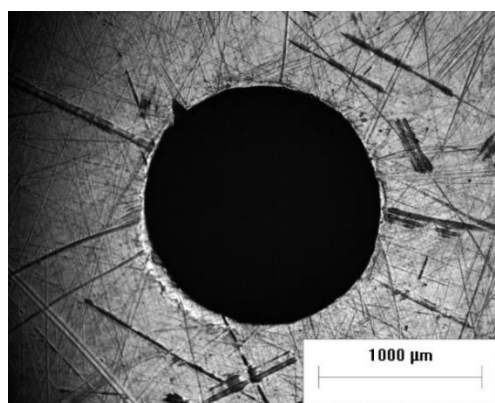


Figura 2: Furo de saída do bocal sônico (seção divergente).

A Figura 14 mostra a geometria aproximada do bocal, a qual permite calcular a dimensão real do furo da garganta, que é essencial para determinar a vazão mássica crítica que passa pelo mesmo.

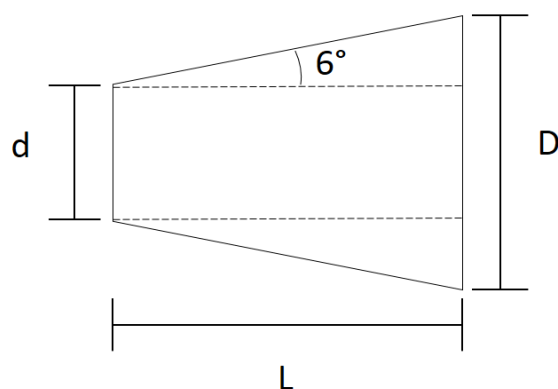


Figura 14: Seção cônica do bocal.

Através de geometria básica, e sabendo-se que $L = 1,79 \text{ mm}$ obteve-se $d = 1,07 \text{ mm}$. Entretanto, esse valor varia já que não é possível afirmar que o diâmetro seja radialmente isométrico devido à assimetria resultante do processo de usinagem.

5.2 Bocal com garganta de 0,6 mm de diâmetro

Após analisar e discutir os resultados, verificamos que os valores da vazão mássica engasgada se encontrava acima do necessário para as experiências que seriam feitas posteriormente por outros alunos. Além disso, constatamos que o formato toroidal da porção de entrada do bocal influencia pouco na variação da vazão devido às pequenas dimensões do mesmo.

Desta forma, decidimos produzir um bocal de 0,6 mm de diâmetro de garganta que atenderia de forma mais eficaz as necessidades do laboratório. E, para reduzir os custos de manufatura e agilizar o processo, decidimos por um novo desenho do bocal que é ilustrado na Figura 15:

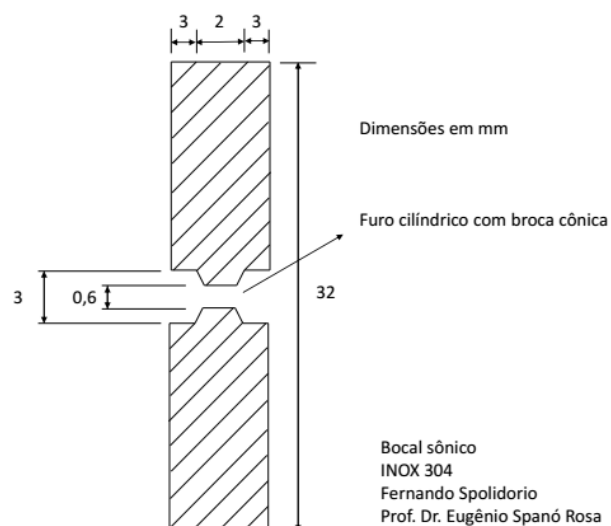


Figura 15: Novo bocal de 0,6 mm de diâmetro de garganta.

Após usinado, o bocal foi submetido ao mesmo processo de calibração mencionado anteriormente e os resultados são mostrados na Figura 16:

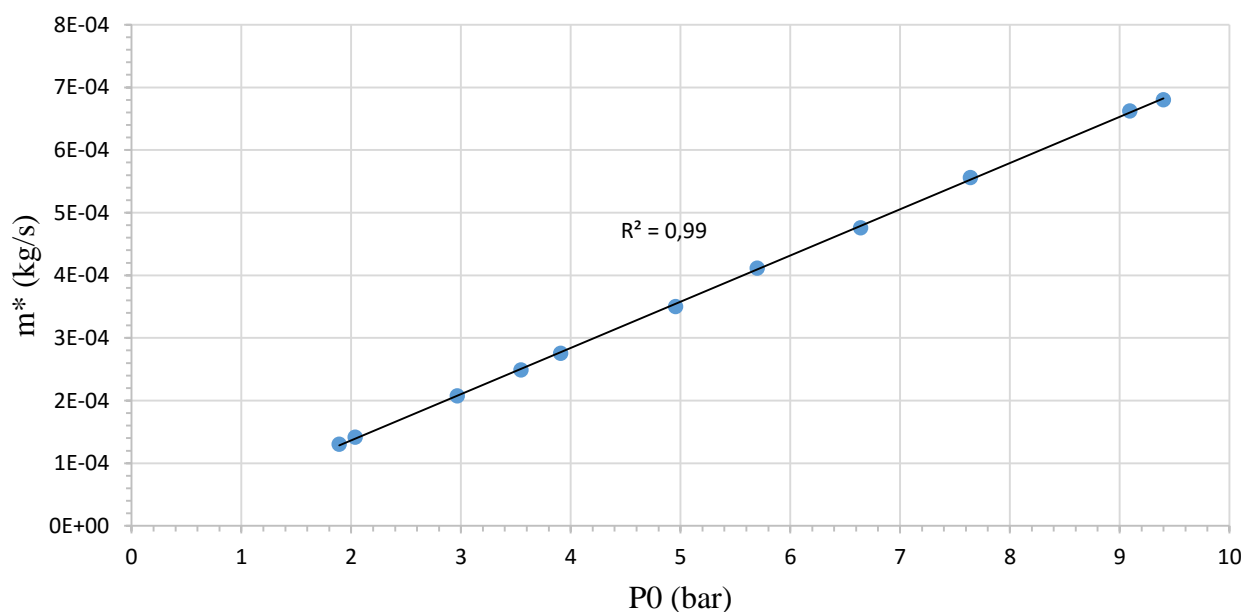


Figura 16: Reta de calibração do bocal de 0,6 mm.

Uma rápida análise visual do gráfico confirma o comportamento linear da vazão mássica engasgada com a pressão como sugere a Equação 5 apesar da geometria não-toroidal como a norma estabelece. Isso indica que o bocal pode ser usado com boas garantias de precisão na medição.

Capítulo 6

Calibração do bocal

6.1 Metodologia de calibração

As instruções a seguir mostram a metodologia necessária para se calibrar o bocal para a obtenção de resultados confiáveis. A Figura 15 exibe a linha laboratorial e todos os instrumentos acoplados à mesma:

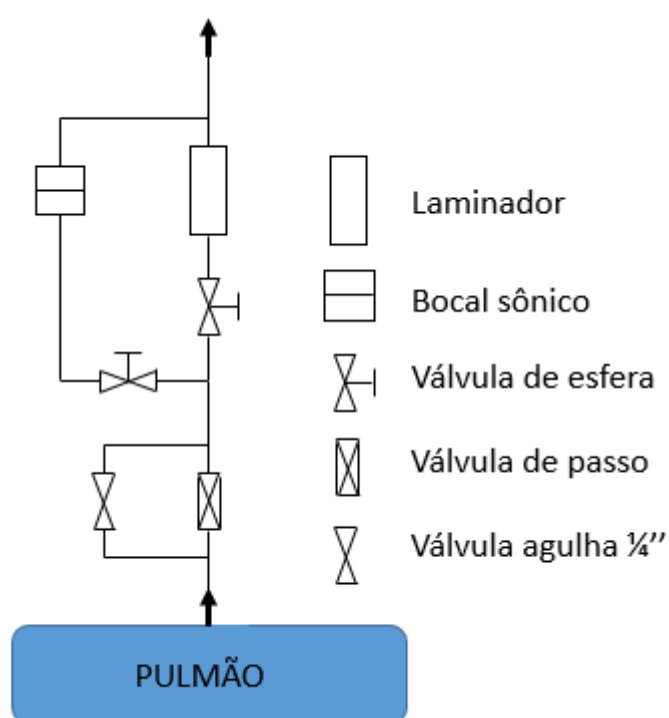


Figura 17: Válvulas da linha experimental.

Primeiramente, devemos abrir as válvulas esfera e de passo, ambas a montante do bocal. A válvula de passo totalmente aberta fará com que o bocal fique sujeito à pressão imposta pelos compressores da linha. Ao começarmos a fechá-la, perceberemos uma queda na pressão sobre o bocal, entretanto, a válvula não possui passo tão preciso quanto necessário para o experimento, por isso ajustes finos na pressão deverão ser feitos através da válvula agulha 1/4".

Como a backpressure (pressão a juzante do bocal), P_b , que é marcada no tambor rotativo, pode ser tomada como a atmosférica (aproximadamente) e a razão de pressão deve ser abaixo de 0,50 (aproximadamente), devemos aplicar pressões de estagnação pelo menos duas vezes maior que a pressão atmosférica, caso contrário, a condição sônica não será estabelecida.

Em seguida calcula-se a vazão mássica para a pressão de estagnação ajustada. Isso é feito com o auxílio do tambor rotativo. Fixamos um volume de gás (10-50L) que devemos escoar através da linha e cronometramos o tempo que o volume leva para escoar.

Sabemos que a vazão mássica é dada pela quantidade de massa de gás que escoa em um determinado intervalo de tempo:

$$\dot{m} = \frac{m [kg]}{\Delta t [s]} \quad (18)$$

Para que possamos determinar a massa contida em tal volume de gás, devemos multiplicar seu valor pela densidade do gás sob as condições de temperatura e pressão do ambiente. A densidade pode ser obtida através da equação dos gases perfeitos:

$$\rho = \frac{(P_{atm} + P_{tambor})}{RT_{tambor}} \quad (19)$$

É extremamente necessário respeitarmos a condição citada anteriormente ($P_0 = 2P_{atm}$) pois garantirá que o escoamento esteja em velocidade sônico ao passar pelo bocal que, por sua vez, garante que a vazão esteja engasgada. Ao identificarmos a vazão mássica engasgada, podemos associá-la ao P_0 aplicado de forma a obter um par ordenado (P_0, \dot{m}). Este procedimento deve ser repetido para algumas pressões de modo a formar uma reta e possibilitar obter os coeficientes de calibração.

6.2 Equação da calibração.

Após finalizados os experimentos do bocal sob diferentes pressões de estagnação, teremos vazões mássicas engasgadas \dot{m} bem definidas para cada P_0 , ou seja, teremos vários pares ordenados (P_0, \dot{m}) que formarão a reta da função já mencionada. A Figura 5 ilustra o resultado:

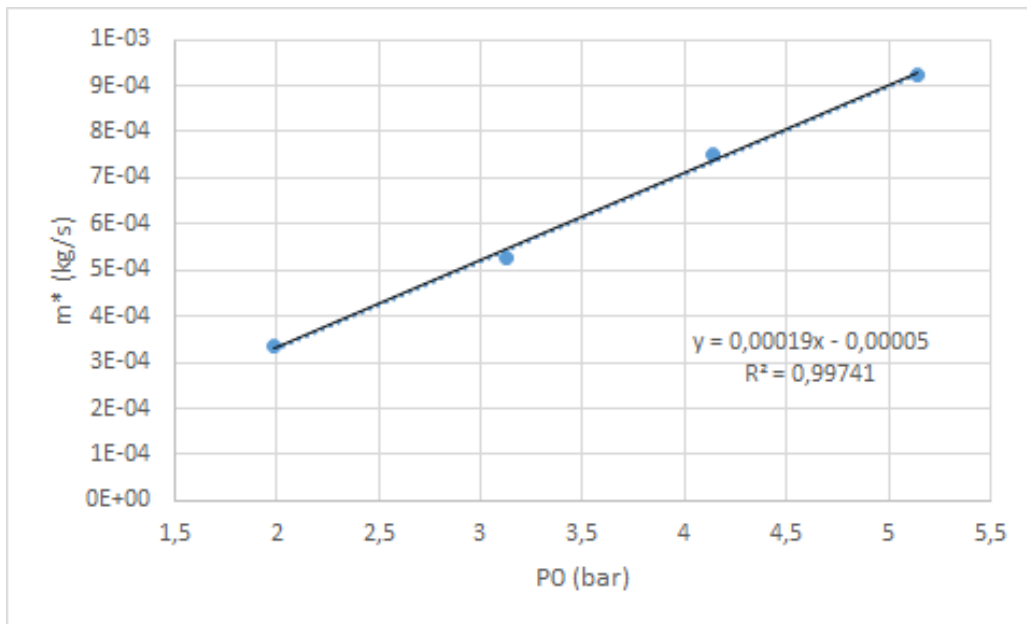


Figura 18: Linearidade entre a vazão mássica e a pressão de estagnação.

Ou seja, temos que para um bocal sônico com diâmetro de garganta de 1 mm, os coeficientes da função $f(P_0) = \dot{m}$ são:

$$a = 1,9E - 04$$

$$b = -5E - 05$$

6.3 Programa supervisorio.

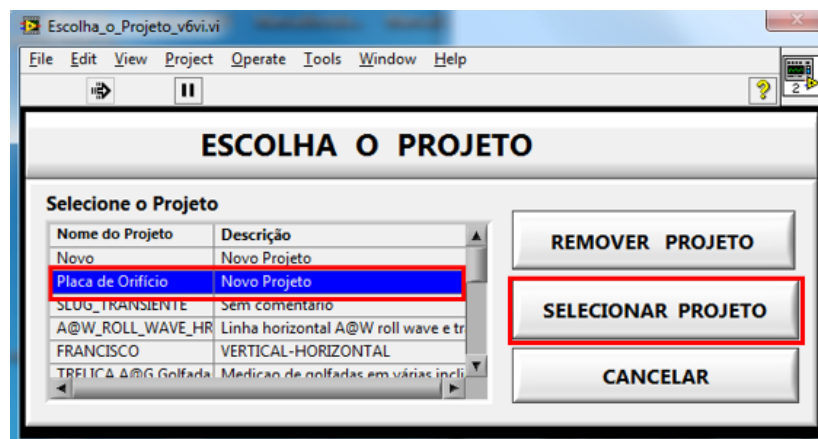
A instrumentação (sensor de pressão) instalada na linha é responsável pela leitura da pressão de estagnação que servirá de input no programa supervisorio da linha de escoamento e que, através da equação de calibração, resultará no valor da vazão mássica.

A seguir segue um manual simplificado de uso do programa supervisorio.

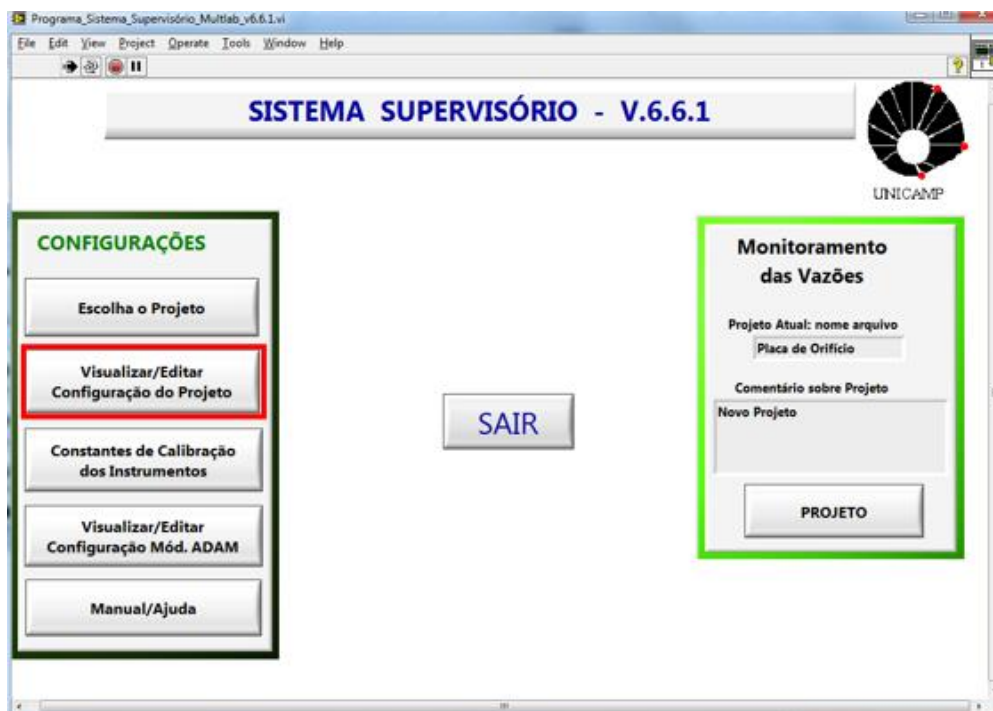
Primeiramente devemos abrir o programa supervisorio: Multilab_v6.6.1 e escolher o projeto:



Então, devemos escolher o projeto “Placa de Orifício”:



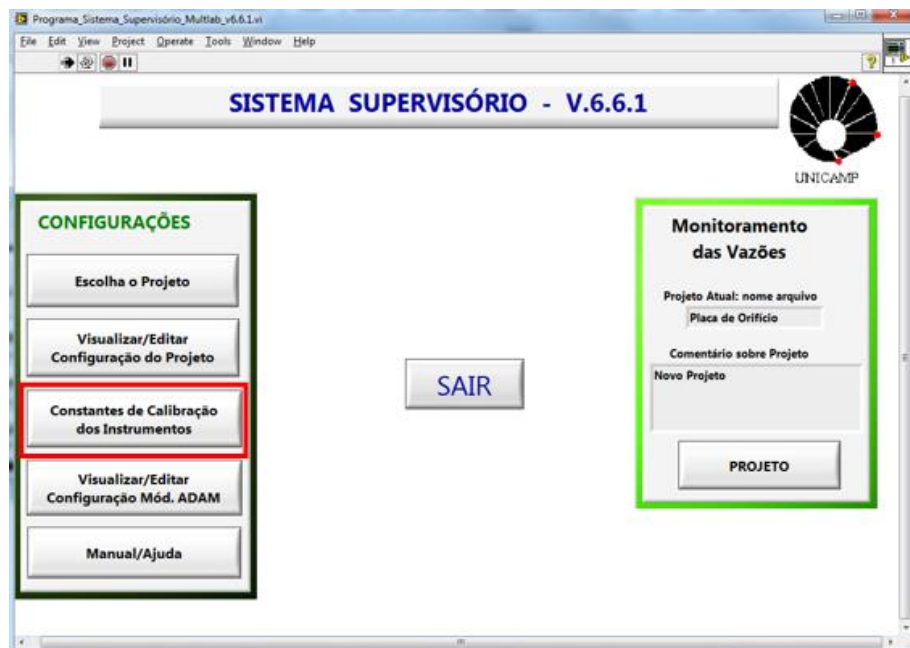
Então, clicando em “Visualizar/Editar Configuração de Projeto”, poderemos formatar constantes como a pressão atmosférica e a constante dos gases ideais.



CONFIGURAÇÃO DO PROJETO

Nome do Projeto Placa de Orifício		Comentário Novo Projeto	
Medidor de Vazão do Líquido Coriolis Metroval		Pressão Atmosférica [mBar] 935.00	
Medidor de Vazão do Gás Bocal Sônico		Viscosidade do Líquido [cP] 1.00	
Bomba Bomba Centrífuga Pequena		Constante do Gás Ideal [J/k] 287.00	
Diâmetro Interno da Tubulação da seção de testes [mm] 26.00		Densidade Líquido [kg/m3] 998.00	
Tipo projeto <input type="radio"/> SLUG <input type="radio"/> GLI <input type="radio"/> Treliça Inc <input checked="" type="radio"/> Horizontal	PID_LIQ	PID_Vazão	Mi do gás @300K [N.s/m2] 1.980E-5
	P: 0.00	P: 0.00	
	I: 0.00	I: 0.00	
	D: 0.00	D: 0.00	
		SALVAR	SAIR

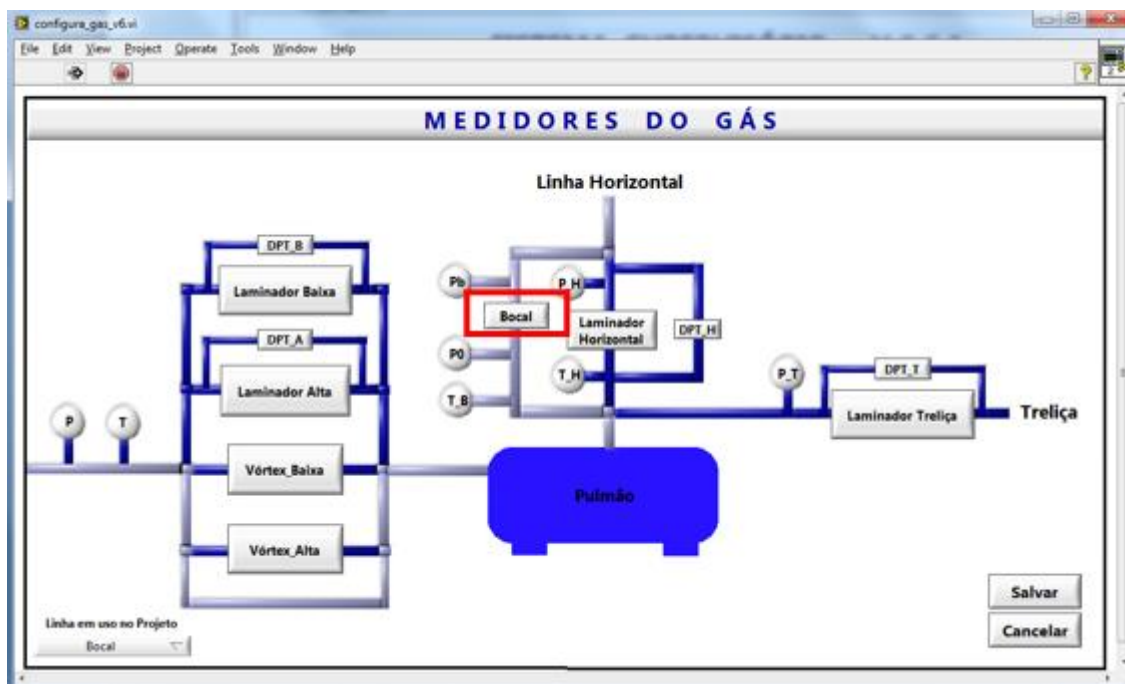
Depois, em “Constantes de Calibração dos Instrumentos”, poderemos editar os coeficientes do bocal em uso, de acordo com o diâmetro de sua garganta. Também poderemos editar informações como a razão dos calores específicos (k).



No caso do bocal, teremos gás escoando por ele, portanto devemos escolher “Gás”.



Em seguida, o programa supervisorio mostrará um mapa de toda sua instrumentação, devemos escolher o “Bocal”:



E, em seguida, aparecerá o painel de controle dos coeficientes e de k:

Feito isso, o bocal estará pronto para ser usado ao ligarmos os compressores e abirmos as válvulas de controle.

Capítulo 7

Conclusão

Para que pudéssemos concluir a respeito da confiabilidade e precisão das medidas de vazão do bocal de Venturi os principais critérios foram a comparação do C_d e C_d' e a razão das pressões para que a condição sônica fosse atingida.

O bocal de garganta de 1 mm apresenta resultados muito satisfatórios dentro da faixa sônica ($P_b/P_0 < 0,4$) que se aproximam consideravelmente dos valores esperados. Valores ainda melhores podem ser esperados caso haja um melhor processo de usinagem e acabamento do bocal.

Deste modo, conclui-se que o bocal pode ser utilizado para medição de vazão mássica no laboratório de escoamentos bifásicos já que seu comportamento é confiável.

Referências bibliográficas

EUROPEAN STANDARD. **EN ISO 9300**: Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles. Bruxelas, 2005.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD Philip J. **Introduction to Fluid Mechanics**. John Wiley & Sons, 2004. cap 12. p. 617-698.

CFD Online. Disponível em:

<www.cfd-online.com> Acesso em 28 de setembro de 2014.