

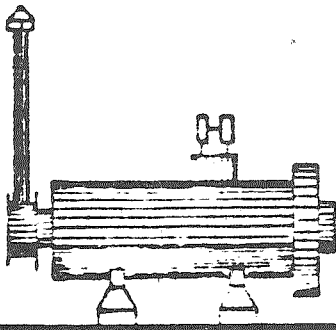


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Queimadores a gás com ar induzido Teoria e projeto

ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS

SÃO CARLOS
2021



LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

QUEIMADORES A GÁS COM AR INDUZIDO

TEORIA E PROJETO

ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS

APOSTILA
S237q

SÃO CARLOS, JANEIRO DE 1990

Publicação 004/90

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS - Nos termos da Lei que resguarda os Direitos Autorais, é proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho, de qualquer forma ou por qualquer meio - eletrônico ou mecânico, inclusive através de processos xerográficos, de fotocópia e de gravação - sem permissão, por escrito, do(s) autor(es).

APRESENTAÇÃO

Esta apostila foi elaborada para se constituir num guia teórico e prático do projeto de queimadores a ar induzido.

Todo o conteúdo, sofreu forte influência do livro: LES BRÛLEURS INDUSTRIELS A GAZ de Pierre Hostalier.

Apresentam-se a teoria e o dimensionamento do sistema misturador gás-ar induzido. São apresentados ábacos e tabelas para auxílio do projeto de queimadores a gás tais como: gás de coqueria, gás natural, gás propano e gás butano.

No apênde-se é apresentado detalhe de um queimador projetado seguindo as indicações teóricas aqui contidas.

ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS

INDICE

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - DÉBITO DO ORIFÍCIO INJETOR	2
3 - REGIME SÔNICO	3
4 - DÉBITO A PRESSÃO MUITO BAIXA	4
5 - DÉBITO A BAIXA PRESSÃO	5
6 - DÉBITO A ALTA PRESSÃO	6
7 - CORREÇÃO DE TEMPERATURA	7
8 - COEFICIENTE DE DESCARGA	8
9 - ÁBACO DE CÁLCULO DO DÉBITO	9
10 - SISTEMAS DE MISTURA	14
11 - HIPÓTESES APLICADAS AOS MISTURADORES A INDUÇÃO	14
12 - MISTURADORES À INDUÇÃO ATMOSFÉRICA	15
13 - ARRASTE DO AR NOS MISTURADORES A INDUÇÃO ATMOSFÉRICA ...	16
14 - SUBSTITUIÇÃO DO GÁS	18
15 - GENERALIDADES SOBRE QUEIMADORES	21
16 - CÁLCULO DO VOLUME DA CÂMARA DE COMBUSTÃO	23
ANEXO 1	26

PARTE 1 - INJETOR DE GÁS

1 - INTRODUÇÃO

Um fluido se escoa através de um orifício pela ação de uma diferença de pressão entre a montante e a jusante deste orifício. Geralmente, a velocidade do jato é uma função da pressão:

$$V = f(P_1 - P_2) \quad (1.1)$$

O débito volumétrico é dado pelo produto da velocidade pela área do jato na secção menor do orifício de injeção. Geralmente, adota-se a área transversal do orifício corrigida por um coeficiente de débito, devido a contração do jato, que é determinado experimentalmente. Este coeficiente de débito é inferior ou igual a unidade, estando frequentemente entre $C = 0,6$ e $0,95$.

$$q_v = V.S.C \quad (1.2)$$

O débito em massa é calculado introduzindo-se a massa específica do fluido na temperatura do escoamento:

$$q_m = V.S.C.\rho \quad (1.3)$$

Frequentemente, usa-se o débito volumétrico corrigido para condições definidas de pressão e temperatura, que são ditas "condições normais".

As condições normais para gás são consideradas, na Europa, como:

- temperatura: 0°C .
- pressão absoluta: pressão atmosférica normal
1,013 bar (760 mmHg).
- gás seco.

O débito volumétrico calculado a t_1 é corrigido a t_0 de referência pela fórmula

$$q_{V_0} = q_V \cdot (\rho_1/\rho_0) \quad (1.4)$$

ρ_0 e ρ_1 são as massas específicas (Kg/m^3) do gás a t_0 e t_1 respectivamente.

2 - DÉBITO DO ORIFÍCIO INJETOR (curva experimental)

Considerando um tubo condutor de gás e uma pressão absoluta P_1 , injetando através de um orifício em um espaço a pressão absoluta P_2 constante, por exemplo à pressão atmosférica. Variando-se a pressão P_1 a velocidade de saída do gás também variará de tal forma que pode-se traçar um gráfico com o seguinte aspecto:

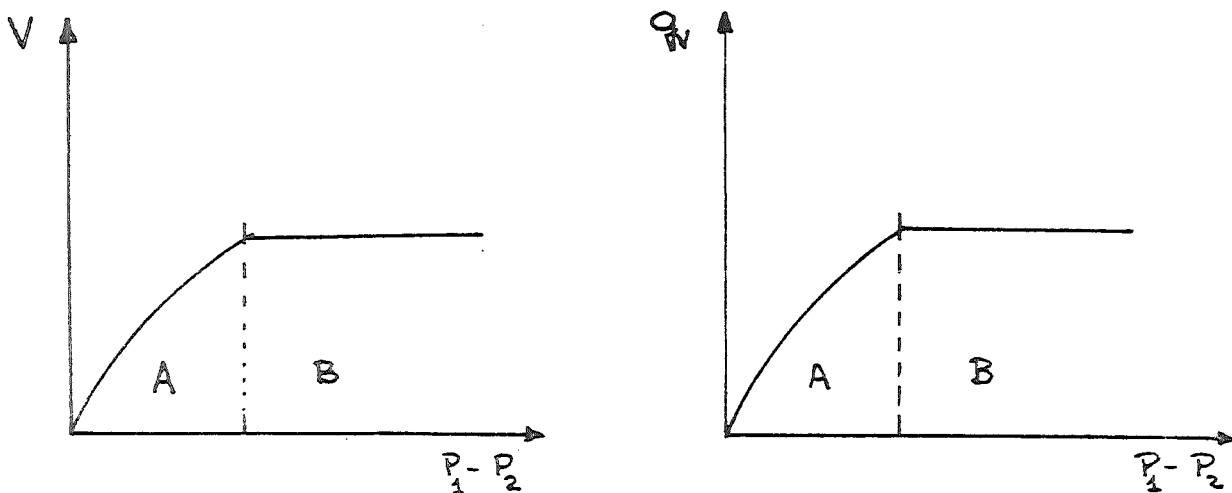


Fig.1.1 - Velocidade do jato e débito volumétrico em função da pressão de injeção.

Até um certo valor de P_1/P_2 , o comportamento da curva é parabólico. Assim, teremos:

$$V = K \sqrt{P_1 - P_2} \quad (1.5)$$

$$q_{V_0} = K' (P_1 - P_2) \quad (1.6)$$

Além do valor crítico de P_1/P_2 , a velocidade permanece constante qualquer que seja o valor de P_1 . O débito volumétrico, se é calculado à P_1 , é também constante.

Porém, a massa de gás que escoar depende da massa

específica do gás ρ_1 , que aumenta proporcionalmente à P_1 . O débito de massa, assim como o débito volumétrico corrigido à pressão de referência P_0 , será por conseguinte proporcional à pressão P_1 .

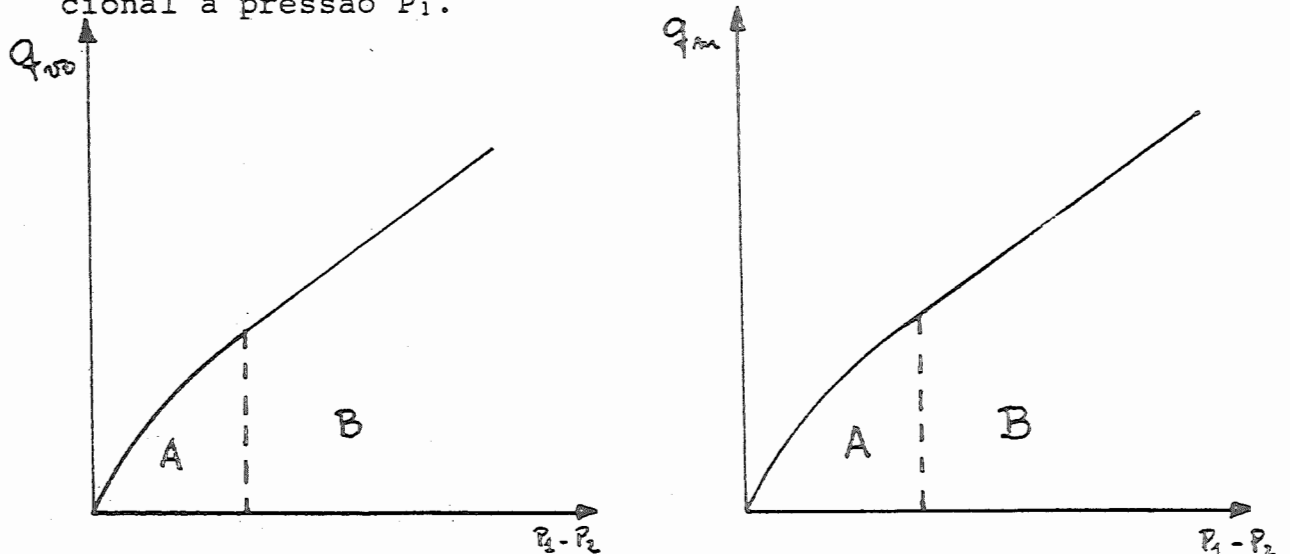


Fig.1.2 - Débito de massa e volumétrico corrigido.

Dentro da parte A, o regime dentro do jato na saída do injetor é subsônico e dentro da parte B, ele é sônico.

3 - REGIME SÔNICO

O regime sônico dentro de um jato é alcançado quando a pressão P_1 a montante do orifício alcança o valor:

$$P_1 = P_2 \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1.7)$$

sendo $k = C_p/C_v$

A tabela 1.1 dá um resumo das características de diversos gases. Destaque-se o valor crítico da Pressão a montante.

TABELA 1.1

REGIME SÔNICO

GÁS	MASSA ESPECÍFICA a 0°C; 1,013bar ρ_0 (Kg/Nm ³)	K	PRESSÃO CRÍTICA A MONTANTE PARA $P_2 = P_0 = 1,013\text{bar}$		DÉBITO UNITÁRIO, A 0°C Com C=1	
			ABSOLUTA P_1 (bar)	EFETIVA P_1 (bar)	Mássico (Kg/h.mm ²)	Volumétrico (Nm ³ /h.mm ²)
Coqueria	0,666	1,33	1,872	0,859	1,271	1,909
Natural	0,829	1,31	1,865	0,852	1,285	1,55
Ar seco	1,293	1,404	1,922	0,909	1,690	1,307
Propano	1,99	1,13	1,75	0,737	1,769	0,889
Butano	2,68	1,10	1,740	0,727	2,023	0,755

4 - DÉBITO A PRESSÃO MUITO BAIXA

A fórmula a seguir é muito difundida para cálculo de queimadores à indução atmosférica de baixa pressão. Ela supõe que o gás seja incompressível e dá um ligeiro erro por excesso com relação à fórmula completa, mas este é desprezível. A 500 mm H₂O (50 mbar aproximadamente), o erro para o débito é inferior a 0,5% por excesso. O limite de emprego é o valor crítico de P_1 onde o erro alcança 5%.

$$q_{V_0} = 0,182 \text{ CD}^2 \sqrt{\frac{h}{\delta(273 + t)}} \quad (1.8)$$

onde:

q_{V_0} = débito volumétrico corrigido a 0°C e 1,013 bar, (Nm³/h).

C = coeficiente de débito do injetor (0,8 salvo indicação mais precisa).

D = diâmetro do injetor (em mm)

h = altura da coluna d'água entre o montante e a jusante do injetor. Para misturador a indução atmosférica, é a pressão efetiva do gás exprimida em altura de água em mm H₂O ou Kgf/m² (1 mm H₂O = 1 Kgf/m²)

t = temperatura do gás imediatamente a montante do injetor. ($^{\circ}\text{C}$).

δ = densidade relativa do gás ao ar (ρ_0 gás/ ρ_0 ar).

5 - DÉBITO A BAIXA PRESSÃO

O débito de um injetor a baixa pressão é dado por:

- SISTEMA INTERNACIONAL

$$q_{V_0} = 3600 \cdot C \cdot S \cdot P_2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{P_0 \cdot \rho_0} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}$$

(1.9)

onde: q_{V_0} = débito volumétrico a 0°C de um injetor de gás (Nm³/h ou 3600 Nm³/s).

P_1 = pressão absoluta do gás a montante do injetor (Pascal).

P_2 = pressão absoluta do gás a jusante (Pascal).

P_0 = pressão atmosférica normal ($1,013 \times 10^5$ Pascal).

ρ_0 = massa específica do gás a P_0 e 0°C (Kg/Nm³).

S = secção do injetor (m²).

C = coeficiente de descarga.

- SISTEMA MÉTRICO

$$q_{V_0} = 3600 \cdot C \cdot S \cdot H_2 \sqrt{\frac{2g}{k-1} \cdot \frac{1}{H_0 \rho_0} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}$$

(1.10)

sendo: H_0, H_1, H_2 pressões absolutas em Kgf/m^2 ou $\text{mm H}_2\text{O}$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

6 - DÉBITO A ALTA PRESSÃO

- SISTEMA INTERNACIONAL:

$$q_{V_0} = 3600 \cdot C \cdot S \cdot P_1 \sqrt{\frac{k}{P_0 \cdot \rho_0} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

(1.11)

- SISTEMA MÉTRICO

$$q_{V_0} = 3600 \cdot C \cdot S \cdot H_1 \sqrt{\frac{g \cdot k}{H_0 \cdot \rho_0} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

(1.12)

A fórmula do débito a alta pressão, se é fixado a pressão de referência e por conseguinte ρ_0 e k , para um injetor a 0°C de secção igual a unidade (1 mm^2) com um coeficiente de débito $C = 1$ fica:

$$q_{V_0} = k P_1 \quad , \quad \text{Nm}^3/\text{h} \cdot \text{mm}^2 \quad (1.13)$$

$$q_{V_0} = k' H_1 \quad , \quad \text{Nm}^3/\text{h} \cdot \text{mm}^2 \quad (1.14)$$

sendo P_1 em bar e H_1 em Kgf/cm^2 .

Os valores de k e k' são dados dentro da tabela a seguir.

TABELA 1.2

DÉBITO DE GASES USUAIS EM ALTA PRESSÃO

GÁS	COMPOSIÇÃO PERCENTUAL	PCS (Th/Nm ³)	MASSA ESPECÍFICA a 0°C e 1,013 bar (Kg/Nm ³)	FÓRMULA CONDENSADA APLICÁVEL A PARTIR DA PRESSÃO CRÍTICA q_{v_0} EM Nm ³ /h.mm ² .	
				SISTEMA MÉTRICO H ₁ PRESSÃO ABSOLUTA EM Kgf/cm ²	SISTEMA SI P ₁ PRESSÃO ABS. em bar
COQUERIA	H ₂ =50, CO=9 CH ₄ =25, N ₂ =10	4,7	0,556	$q_{v_0} = 1,00 H_1$	$q_{v_0} = 1,02 P_1$
NATURAL	CH ₄ = 94,6 C ₂ H ₆ = 3,2	9,85	0,750	$q_{v_0} = 0,86 H_1$	$q_{v_0} = 0,875 P_1$
AR SECO	N ₂ = 79, O ₂ = 21	-	1,293	$q_{v_0} = 0,67 H_1$	$q_{v_0} = 0,68 P_1$
PROPANO	C ₃ H ₈ = 70 C ₃ H ₆ = 30	23,1	1,99	$q_{v_0} = 0,50 H_1$	$q_{v_0} = 0,507 P_1$
BUTANO	C ₄ H ₁₀ ≅ 100	30,0	2,68	$q_{v_0} = 0,43 H_1$	$q_{v_0} = 0,435 P_1$

7 - CORREÇÃO DE TEMPERATURA

As fórmulas dadas anteriormente (salvo a fórmula simplificada para pressões muito baixas do parágrafo 4), são corretas para temperatura do gás a montante de 0°C. Para outras temperaturas é feita a correção da seguinte maneira:

$$q_{v_0} = q_v(\text{calculada}) \times \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (1.15)$$

$$T_0 = 273 \text{ K} (0^\circ\text{C})$$

$$T_1 = \text{temperatura do gás } ^\circ\text{K} (T_1 = t_1 + 273).$$

Em geral, o gás está acima de 0°C . O fator de correção é portanto inferior a unidade.

TABELA 1.3

CORREÇÃO DE TEMPERATURA

t_1 °C	$\sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$	t_1 °C	$\sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$	t_1 °C	$\sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$
0	1	20	0,965	40	0,934
5	0,993	25	0,957	45	0,927
10	0,982	30	0,949	50	0,910
15	0,974	35	0,942	-	

8 - COEFICIENTE DE DESCARGA

A seguir temos quatro modelos de injetores com indicação aproximada de seu coeficiente de descarga:

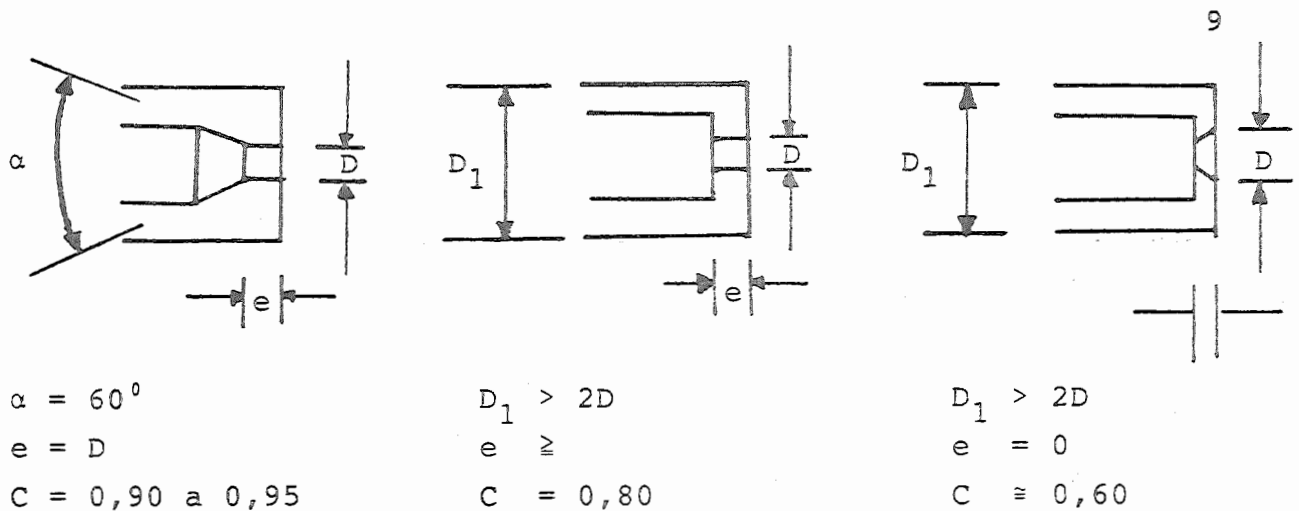


Fig.1.3 - Coeficiente de descarga.

9 - ÁBACO DE CÁLCULO DO DÉBITO

É apresentado aqui três ábacos para as três gamas de pressão. São dados, para os gases usuais, o débito volumétrico unitário por milímetro quadrado de secção do injetor, a 0°C com um coeficiente de descarga igual a unidade.

a) GRÁFICO PARA PRESSÕES MUITO BAIXA

A fig.1.4 dá as curvas de débito para pressões entre 0 e 500 mm H₂O. Os débitos são calculados com a fórmula simplificada.

b) GRÁFICO PARA BAIXA PRESSÃO

A fig.1.5 dá as curvas de débito para pressões entre 50 e 1000 mbar (500 a 10000 mm H₂O).

Este gráfico é relativo a queimadores a indução atmosférica ou, mais propriamente para aqueles onde a pressão a jusante do injetor P_2 é igual a pressão atmosférica de referência P_0 .

Na abcissa, tem-se a pressão efetiva $P = (P_1 - P_2)$ em mbar.

(1 mbar = 1,02 g/cm² = 10,2 mm H₂O).

c) GRÁFICO PARA ALTA PRESSÃO

A fig.1.6 dá as curvas de débito para pressões superiores a pressão crítica. O débito é proporcional a pressão absoluta a montante.

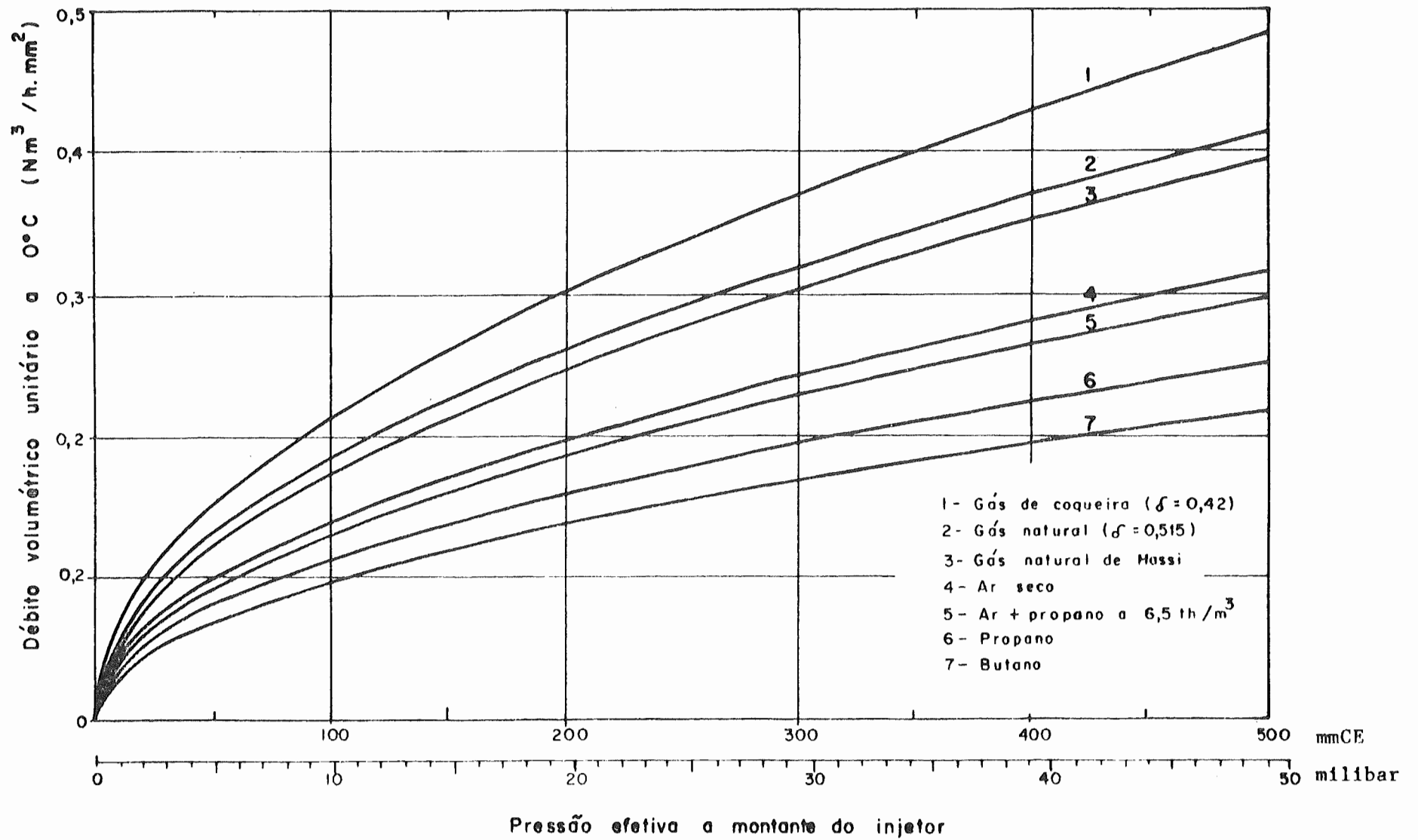


Fig.1.4 - Cálculo do injetor, para pressões muito baixas.

P_1 até 500 mmH₂O ; $P_2 = P_0 = 1013$ mbar ; $C=1$; $T=0^0$ C

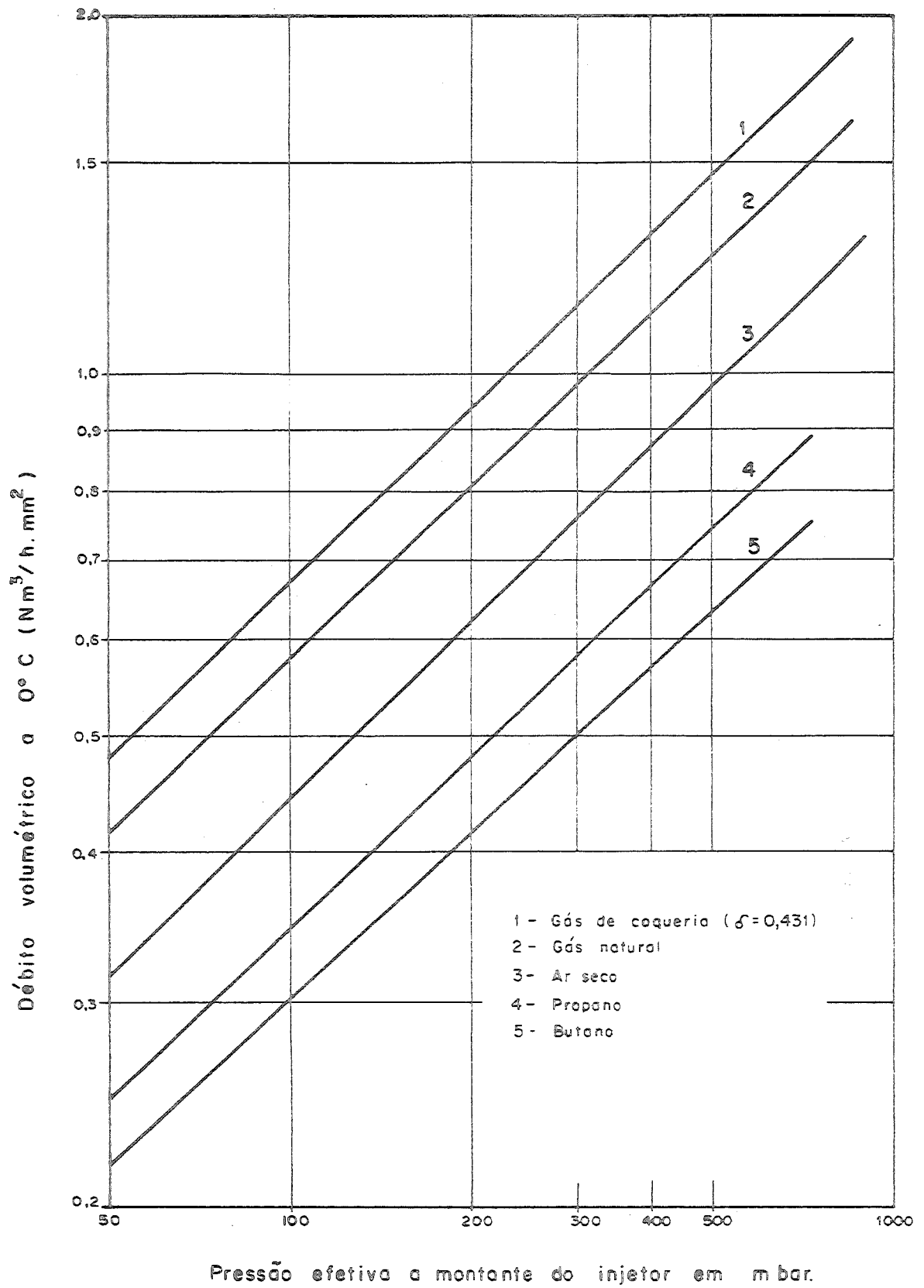


Fig.1.5 - Cálculo do injetor, para baixa pressão de 50 mbar à P crítico

$$P_2 = P_0 = 1013 \text{ mbar}; C=1; T=0^\circ\text{C}$$

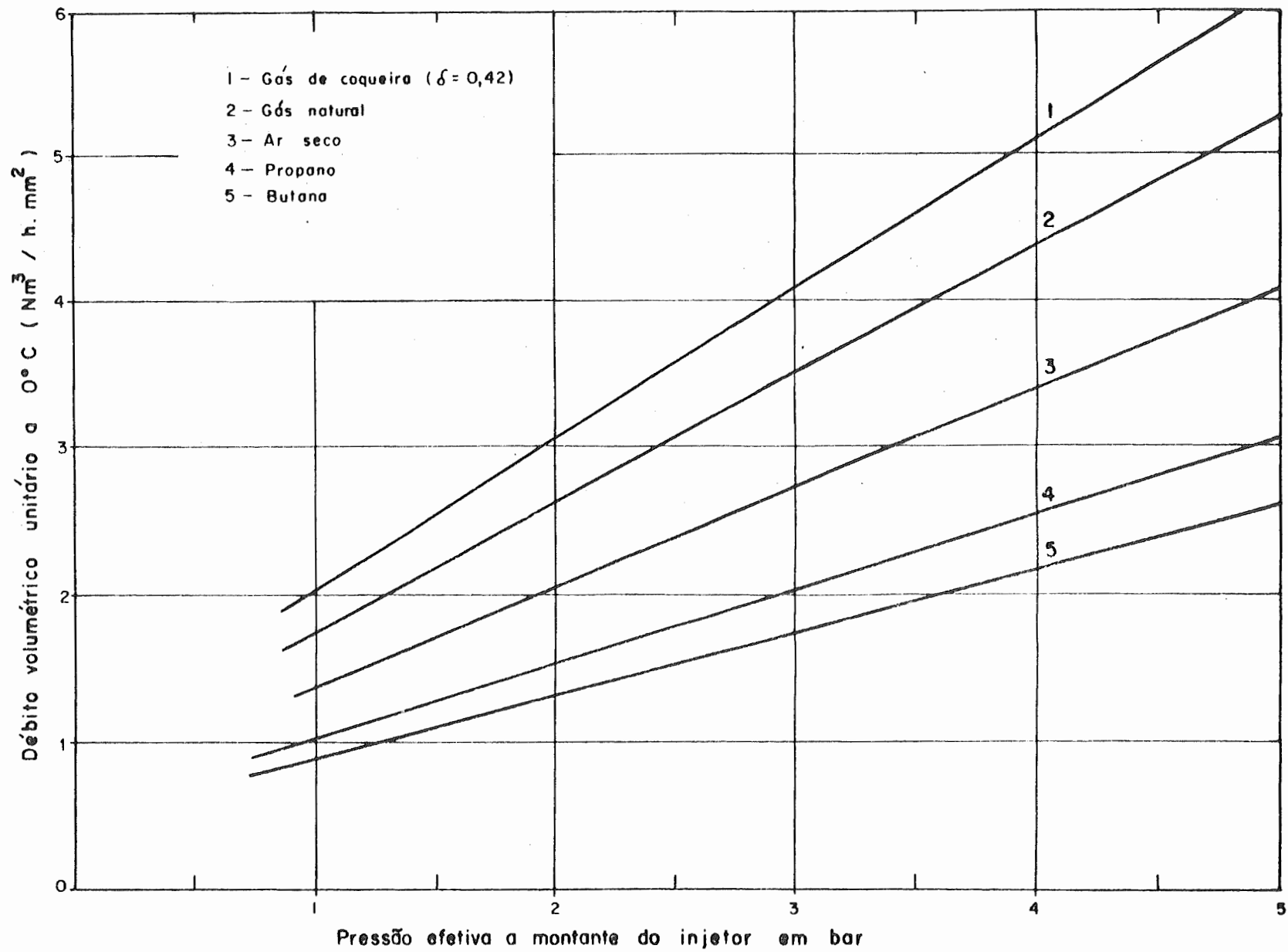


Fig.1.6 - Cálculo do injetor, para alta pressão
 $P_2 = P_0 = 1,013 \text{ bar}$; $C=1$; $T=0^\circ\text{C}$

Porém, como é mais usual, a abcissa tem-se a pressão efetiva P_1 em bar.

Exemplo de utilização DOS ábacos

- Dados:

- Pressão do gás Natural: 200 mm H₂O
- Pressão ambiente: 20 mbar
- Débito desejado: 5 Nm³/h
- Coeficiente de débito: 0,8 aproximadamente
- Temperatura do injetor: 20^oC.

SOLUÇÃO:

- Entrando na curva 2 do ábaco 1 com 200 mm H₂O, tira-se o 0,26 Nm³/h.mm².
- o débito real unitário é:

$$q_{V_0} = q_{V_0_u} \times C \times 5 \times \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

$$q_{V_0} = 0,26 \times 0,8 \times 5 \times \sqrt{\frac{273}{(20+273)}}$$

$$S = q_{V_0} / 0,20 \quad \therefore \quad S = 5 / 0,20$$

$$S = 25 \text{ mm}^2$$



$$d_i = 5,64 \text{ mm}$$

PARTE 2 - MISTURADOR A INDUÇÃO

10 - SISTEMAS DE MISTURA

A função do misturador é fornecer na saída do queimador uma mistura de ar e gás, onde nós fixamos a vazão, a pressão e a relação ar/gás.

Existem vários sistemas de mistura, porém o mais utilizado é o misturador à indução, o qual consiste de um dispositivo que aproveita a energia de um fluido para aspirar um outro fluido.

Pode-se destacar os seguintes casos de misturadores à indução:

- o gás à pressão da rede, ou comprimido, é o fluido indutor que aspira o ar ambiente: misturadores à indução atmosférica,
- o ar comprimido aspira o gás que está parcial ou totalmente expandido à pressão atmosférica: misturadores à ar indutor e gás expandido,
- o ar e o gás estão ambos sob pressão; o mais comum é o caso do ar indutor.

11 - HIPÓTESES APLICADAS AOS MISTURADORES A INDUÇÃO

O teorema da quantidade de movimento pode ser aplicado ao arraste de um fluido por outro. Um misturador à indução pode então ser calculado como um ejetor. Note-se entretanto, que o fluido indutor e o fluido induzido são ambos compressíveis e com valores diferentes para a relação $K = c_p/c_v$ e para as densidades.

O cálculo do diâmetro do injetor do fluido indutor é simples e preciso e foi estudado anteriormente.

O cálculo teórico dos outros elementos do misturador é mais complexo e nós formularemos algumas hipóteses simplificadoras que não são totalmente válidas na prática:

- velocidade homogêneas do gás e do ar nas sec-

ções retas dos orifícios de admissão e velocidade homogênea da mistura na secção reta da garganta,

- homogeneidade perfeita da mistura ar-gás dentro do difusor à partir da secção da garganta,

- e mais frequentemente, ausência de atrito, portanto escoamento sem perda de carga. De fato, existe sempre uma perda de carga dentro do misturador e as vezes é interessante atribuir um valor significativo à esta perda de carga em relação as flutuações de pressão dentro do espaço de combustão no queimador.

- ausência de trocas térmicas entre a mistura e o misturador, isto é, escoamento adiabático.

12 - MISTURADORES À INDUÇÃO ATMOSFÉRICA

Um misturador à indução atmosférica apresenta-se sob a forma esquematizada na figura 2.1.

O misturador tem a forma de um venturi, isto é, compreende uma secção convergente que age como uma câmara de mistura, seguido de uma secção divergente agindo como difusor.

O fluido indutor é admitido sob a forma de um jato central, com a mistura se efetuando na secção convergente, e supõe-se estar misturada ao atingir a garganta do venturi. O difusor permite que toda ou parte da energia cinética da mistura na garganta transforme-se em energia potencial. A velocidade diminui e a pressão aumenta no difusor.

Uma leve conicidade aumenta o atrito sobre as paredes enquanto que uma conicidade mais acentuada provoca o descolamento gerador de turbulência. Existe então, um valor ótimo de ângulo para o difusor que conduz à perda de carga nula ou mínima. Na prática, adota-se o valor de 12 graus para este ângulo, valor que corresponde ao alargamento de um jato livre.

Podemos também utilizar uma câmara de mistura cilíndrica ao invés de cônica assim como um tronco cilíndrico na garganta. Estas disposições aumentam a obstrução do misturador, permitindo, por outro lado, que o regime de

escoamento estabilize-se, o que favorece a "resistência" do misturador ao retôrno de chama ao injetor.

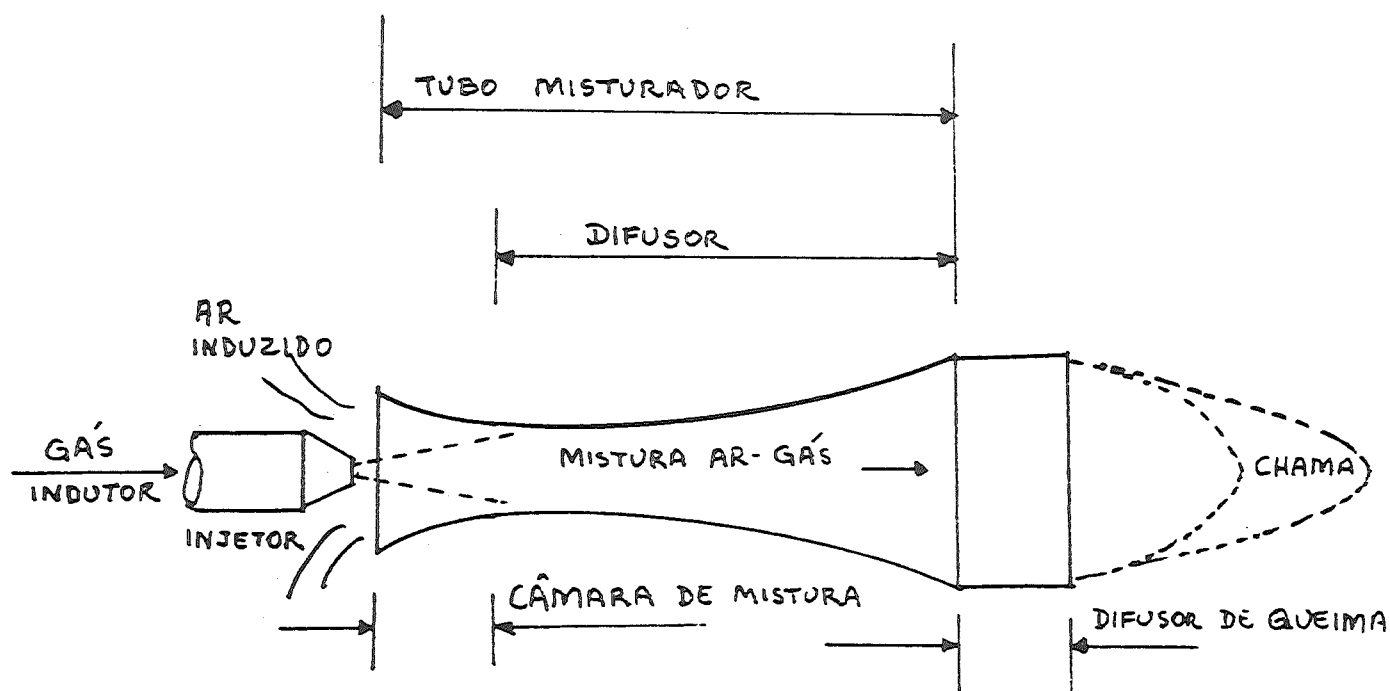


Fig.2.1- Misturador à indução atmosférica

13 - ARRASTE DO AR NOS MISTURADORES A INDUÇÃO ATMOSFÉRICA

Aqui é importante definir dois termos:

RELAÇÃO AR/GÁS é a razão m^3 de ar por m^3 de gás dentro da mistura primária ou pré-mistura

$$R = \frac{m^3 \text{ de ar}}{m^3 \text{ de gás}}$$

FATOR DE AR PRIMÁRIO é a razão m^3 de ar (da pré-mistura) por m^3 de ar teórico.

$$M = \frac{m^3 \text{ de ar (da pré-mistura)}}{m^3 \text{ de ar (teórico)}}$$

Um fator de ar primário de 0,7 significa que 70% do ar de combustão foi arrastado como ar-primário e os 30% restante é o ar secundário introduzido por difusão da

chama na atmosfera.

Para queimadores usados em atmosfera não confinada (chama livre) o fator de ar primário deve ser de 0,6 e para queimador que trabalhará em atmosfera confinada o fator de ar primário deve ser 1.

O diâmetro do injetor é fixado em função da vazão e da pressão do gás disponível. Em seguida é calculado o diâmetro da garganta.

Observa-se que para um mesmo fator de ar, será necessário uma relação ar/gás diferente para o gás GLP, natural, propano e etc.

Em um queimador à indução atmosférica, o arraste de ar depende da relação das secções da garganta do misturador e do injetor e, numa certa proporção, do valor da secção de saída.

Para os misturadores à gás de baixa pressão alimentando queimadores de chama livre e de secção de saída suficientemente grande para que sua influência sobre o arraste de ar possa ser desprezada, é válida a seguinte relação:

$$\frac{\text{secção de saída}}{\text{secção da garganta}} \geq 1,5$$

Podemos usar a fórmula simplificada seguinte, que dá a relação ar/gás:

$$R = \omega \cdot \frac{D_c}{D_i} \sqrt{\delta} \quad (2.1)$$

R : relação ar/gás (m³ de ar prim./m³ de gás),

D_c : diâmetro da garganta,

D_i : diâmetro de injetor,

ω : coeficiente de vazão do misturador (aproximadamente 0,8 para os casos usuais),

δ : densidade do gás em relação ao ar

A fórmula anterior só é válida se o ar e o gás

estiverem à mesma temperatura. De fato, se os dois fluidos estiverem à temperaturas diferentes, a densidade relativa não é mais conservada, o que nos leva a fazer a seguinte correção, aplicando a lei dos gases perfeitos (expansão proporcional à temperatura absoluta:

$$R = R_0 \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_g}} \quad (2.2)$$

R : relação ar/gás real,

R_0 : relação ar/gás calculada pela fórmula precedente para uma mesma temperatura de ar induzido e de gás indutor,

T_a : temperatura absoluta do ar em $^{\circ}K$ (fluido induzido),

T_g : temperatura absoluta do gás em $^{\circ}K$ (fluido indutor).

14 - SUBSTITUIÇÃO DO GÁS

Para um determinado queimador, que se deseja manter a vazão calorífica constante, o injetor é mantido e a relação seguinte é válida.

$$M = K \frac{\sqrt{P_1}}{\sqrt{W}} \quad (2.3)$$

onde:

M = fator de ar primário,

P_1 = pressão efetiva à montante do injetor,

W = índice de Wobbe do gás ($W = PCS/\sqrt{\delta}$),

K = fator que depende do misturador e das unidades escolhidas.

Observa-se na fórmula anterior que se o fator de ar primário é mantido, na substituição de um gás, a pressão a montante do injetor deve ser alterada.

Se partirmos de uma pressão P_1 com um gás de índice de Wobbe W_1 e posteriormente passarmos para um gás de índice de Wobbe W_2 , será necessário utilizar o gás a uma pressão P_1' , tal que:

$$P_1' = P_1 \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 \quad (2.4)$$

A título de ilustração consideremos, um gás de nafta com pressão 10 mbar e índice de Wobbe = 26,6 MJ/Nm³ a ser substituído por gás natural com $W = 45,2$ MJ/Nm³. A pressão de injeção do gás natural deverá ser:

$$P_1' = 10 \left(\frac{45,2}{26,6} \right)^2$$

$$P_1' = 28,87 \text{ mbar} = 288,7 \text{ mmca}$$

Se a pressão de fornecimento do gás natural for inferior a 28,87 mbar o arraste de ar será diminuído e será necessário modificar o misturador.

Nos Estados Unidos, a A.G.A (American Gás Association) usa uma fórmula empírica para os queimadores a injeção atmosférica dando o fator de ar primário.

$$M = K \frac{\sqrt[4]{P_1}}{\sqrt{W}} \cdot \frac{\sqrt[4]{S_s \times S_g}}{\sqrt{Q}} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_s}} \quad (2.5)$$

onde:

- M = fator de ar primário
- K = constante que depende da unidade escolhida
- P_1 = pressão efetiva do gás a montante do injetor
- W = índice de Wobbe do gás considerado
- S_s = secção de saída
- S_g = secção da garganta
- Q = potência calorífica do queimador = $\dot{m}g \cdot PCI$
- T_0 = temperatura absoluta nas condições normais
- T_s = temperatura absoluta na saída do queimador

A experiência mostra que para queimadores doméstico a indução atmosférica, o fator de ar primário passa por um valor máximo em função da razão D_g/D_i . Estes valores são, para os gases usuais:

- 9 para o gás natural.
- 14 para o propano comercial.
- 16 para o butano comercial.

A figura seguinte mostra as principais dimensões de um misturador a indução atmosférica:

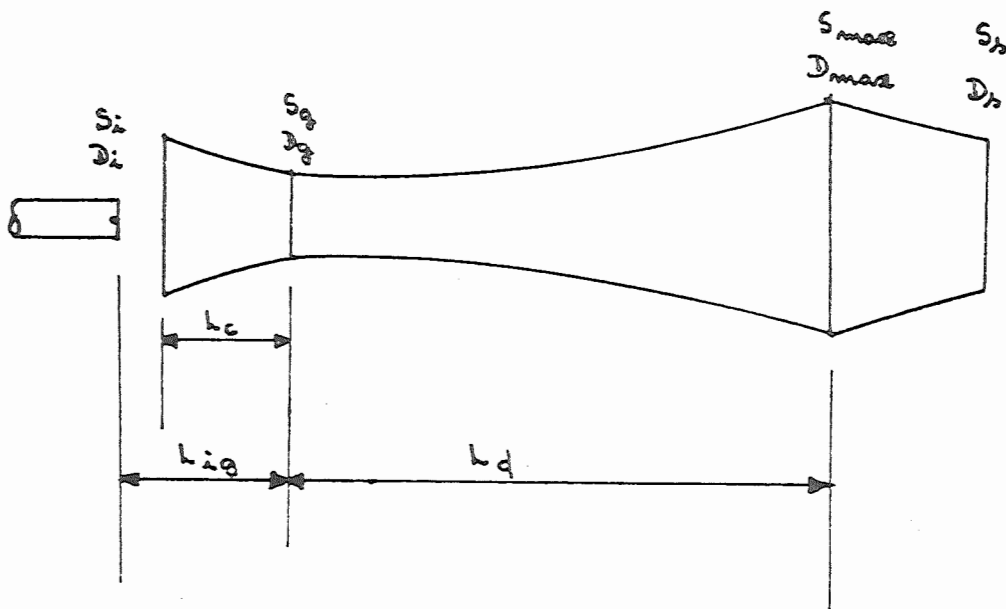


Fig. 2.2 - Dimensões de um misturador

- comprimento do convergente: $L_c = 2,5 \cdot D_g$
 - comprimento do difusor: $L_d = 9 D_c$ (6 à 12 D_g)
 - secção do orifício de saída: $S_s = 1,7$ à $2,2 S_g$
 - diâmetro do difusor: $D_{max} = 1,7 D_g$
- O ângulo no vértice do convergente pode ser bastante grande: 20° a 30° , visto que não há risco de descolamento de chama nessa zona.

- A distância do injetor a garganta do venturi influi no arraste do ar. O valor máximo é obtido por: $L_{ig} = 2,2 D_g + 15$, sendo L_{ig} e D_g em mm.
- A secção de saída é determinada para obter uma boa estabilidade. Assim o valor limite para a potência específica são: $0,8 \text{ th/h.cm}^2$ para o butano, o propano e o gás natural e $1,3 \text{ th/h.cm}^2$ para o gás de carvão. Porém, os dispositivos de estabilização utilizados atualmente permitem obter valores bem maior.

A pressão da mistura é proporcional a pressão do gás indutor a montante do injetor, porém varia também com a razão ar-gás.

As figuras 2.3 e 2.4 dão os valores da razão Pressão da mistura/Pressão do gás indutor para misturadores à indução atmosférica em função do fator de ar primário e da razão de secção de saída/secção da garganta 1,7 e 2,2.

15 - GENERALIDADES SOBRE QUEIMADORES

COMPRIMENTO DA CHAMA DE DIFUSÃO PURA

O comprimento da chama dos queimadores de chama branca (que funcionam em regime laminar . $R < 3000$), é proporcional ao débito volumétrico do gás e ao seu coeficiente de difusão dentro do ar.

$$L = KQ \quad (2.6)$$

com L = comprimento da chama, mm.

Q = potência do queimador mth/h, com relação ao PCS.

K = coeficiente experimental relativo a cada gás e inversamente proporcional ao coeficiente de difusão. K depende também da distância entre os orifícios de saída.

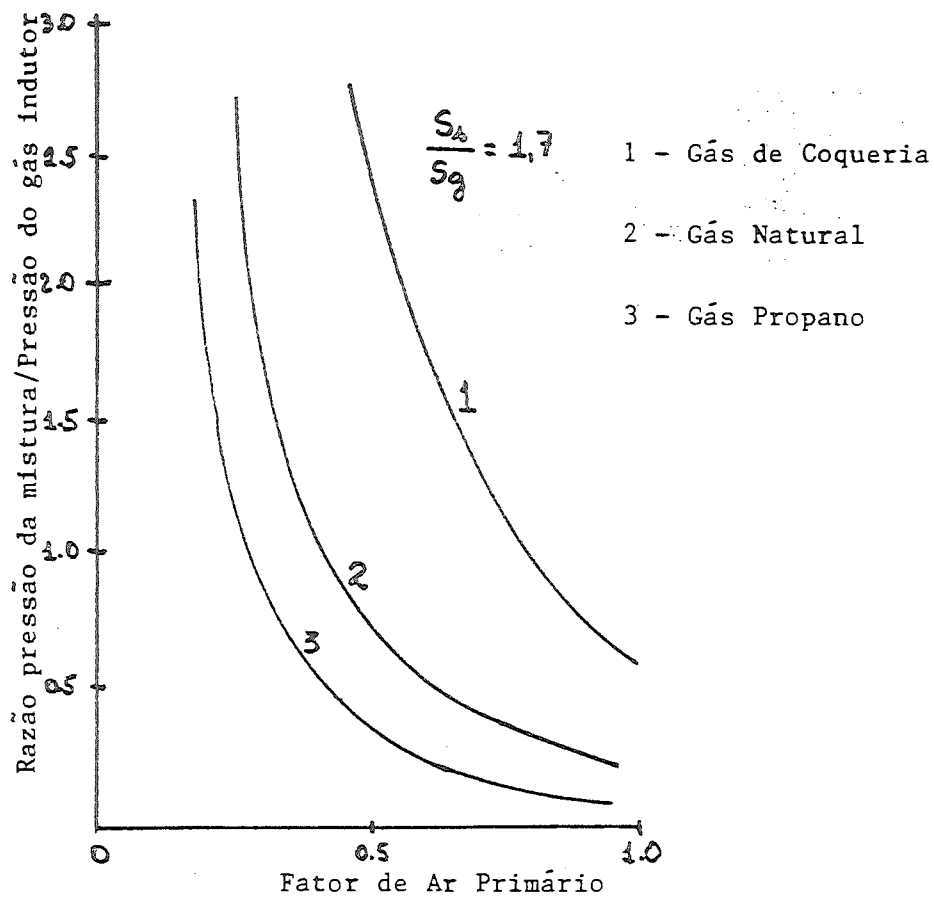


Fig.2.3 - Pressão da Mistura/Pressão de Injeção

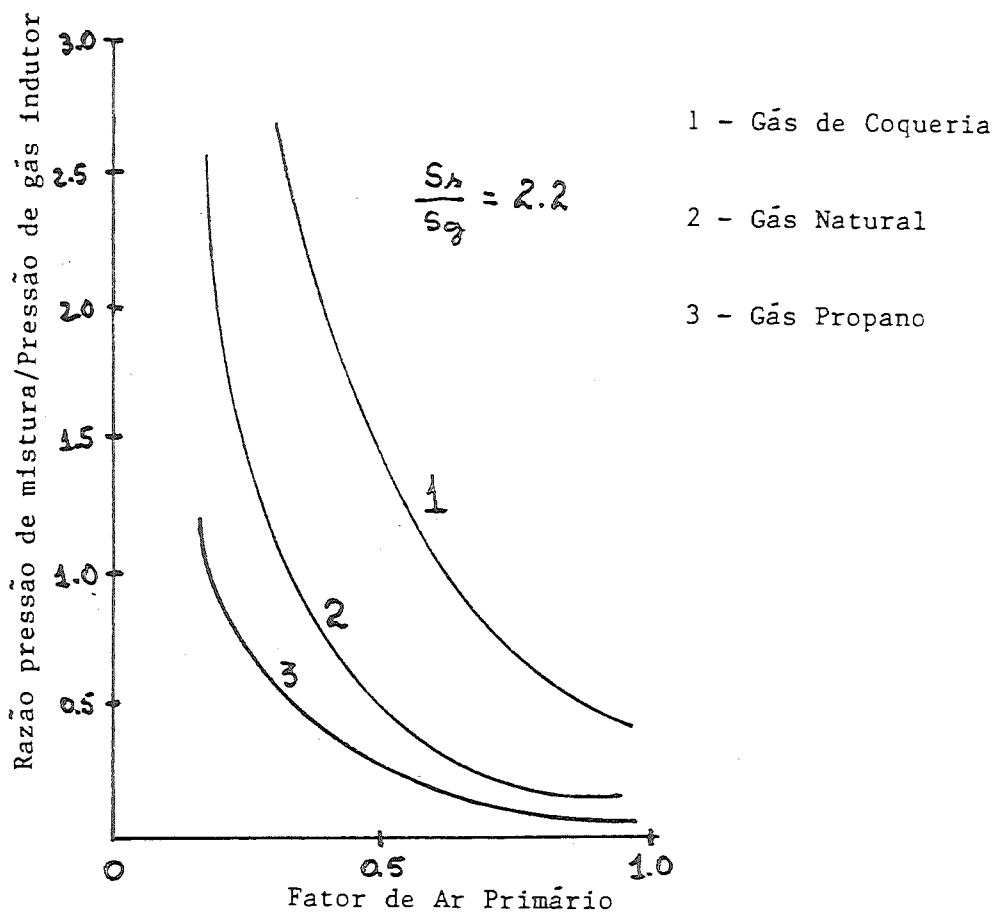


Fig.2.4 - Pressão da Mistura/Pressão de Injeção

TABELA 2.1

VALOR DE K PARA DIFERENTES ESPAÇOS E ENTRE FUROS EXPRESSO EM mm.

GÁS	DISTÂNCIA e			
	3	5	10	15
DE CARVÃO	2,1	1,5	0,75	0,5
NATURAL	2,4	1,7	0,85	0,6
GLP	2,0	1,3	0,75	0,6

O comprimento da chama dos queimadores de difusão pura em regime turbulento ($R > 10000$) é dado pela fórmula:

$$L = \frac{5,3 D}{a} \sqrt{\frac{F \cdot T_c}{T_s}} \cdot a + \frac{1-a}{\delta} \quad (2.7)$$

onde L = comprimento da chama

D = diâmetro do orifício de saída (L e D na mesma unidade)

F = poder de queima úmida da mistura estequiométrica

a = razão em massa gás/mistura para a composição estequiométrica

δ = densidade do gás com relação ao ar ambiente

T_c = temperatura absoluta teórica de combustão em $^{\circ}K$

T_s = temperatura absoluta do gás no orifício de saída $^{\circ}K$.

16 - CÁLCULO DO VOLUME DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

O volume necessário é dado por:

$$V = \frac{Q}{Q_v} \quad (2.8)$$

onde V = volume da câmara em m³

Q = potência calorífica do queimador, th/h

Q_v = carga volumétrica dentro da câmara, (ou taxa de combustão) em th/m³.h

Q = $\dot{m}g \cdot PCS$

th = 1000 Kcal

A carga volumétrica nominal (Q_{v0}) é calculada a partir do débito térmico do queimador.

$$Q_{v_0} = \frac{Q_0 \text{ (PCI do gás)} \times \dot{m}g \text{ (débito de gás)}}{V \text{ (volume da câmara)}}$$

TABELA 2.2

CARGA VOLUMÉTRICA NOMINAL DENTRO DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO

TIPO DE QUEIMADOR	K	Carga Volumétrica (th/h.m ³) para diversos valores de Q _τ /Q ₀				
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Queimador metálico de baixa turbulência	3 à	3750	2500	1580	1035	625
	4	5000	4340	2100	1380	835
Queimador metálico de forte turbulência	5 à	6250	4170	2630	1725	1040
	6	7500	5000	3160	2070	1250
Queimador de pré-mistura	8 à	10000	8670	4210	2760	1670
	10	12500	8350	5260	3450	2080

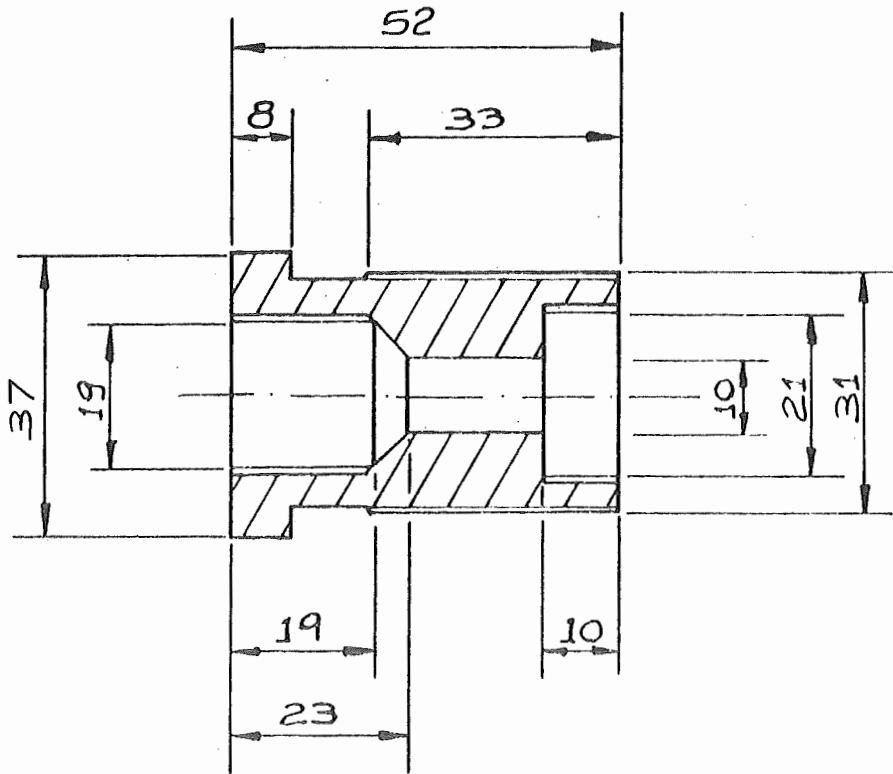
onde Q_τ = quantidade de calor efetivamente liberado no instante τ, representa o calor sensível do gás dentro da chama no instante τ. Q_τ = cpΔT,

$$cp = 0,307 \text{ mth/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

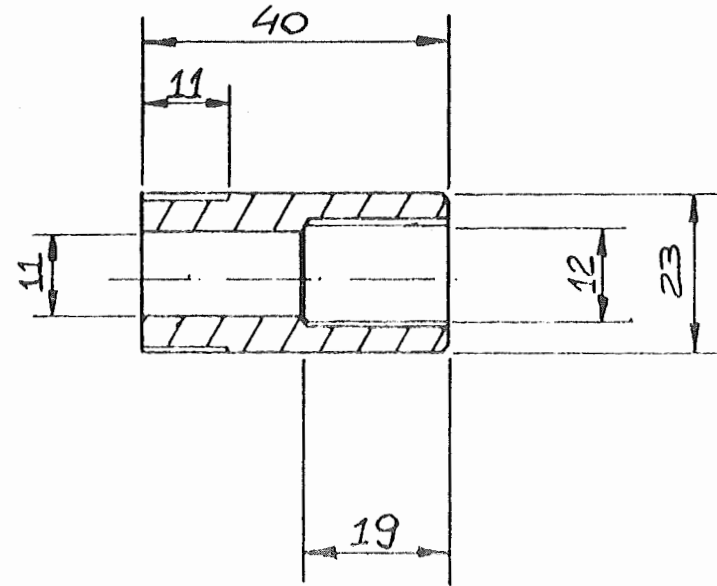
Q_0 = quantidade de calor total capaz de ser liberada
pela combustão, PCI (mth/Nm³)

A N E X O 1

Conjunto de desenhos do projeto de um queimador para gás Natural. O projeto foi desenvolvido para uso tanto de ar induzido como de ar sob pressão. A peça Nº 1 é o dispositivo de introdução de gás e de aproximação do injetor a garganta do misturador. A peça Nº 2 é o porta injetor de gás que permite a substituição do mesmo, adequando a seu diâmetro a diversas situações de uso e de qualidade do gás. A peça Nº 3 é a câmara de ar primário que ao ser montada na entrada da peça Nº 5 (Misturador) permite, por aproximação ou afastamento, a regulagem do ar primário. A peça Nº 5 é o misturador de gás e ar primário e a peça Nº 4 é o difusor de chama que vai conectado a peça Nº 5 através de um niple de 25 milímetros.

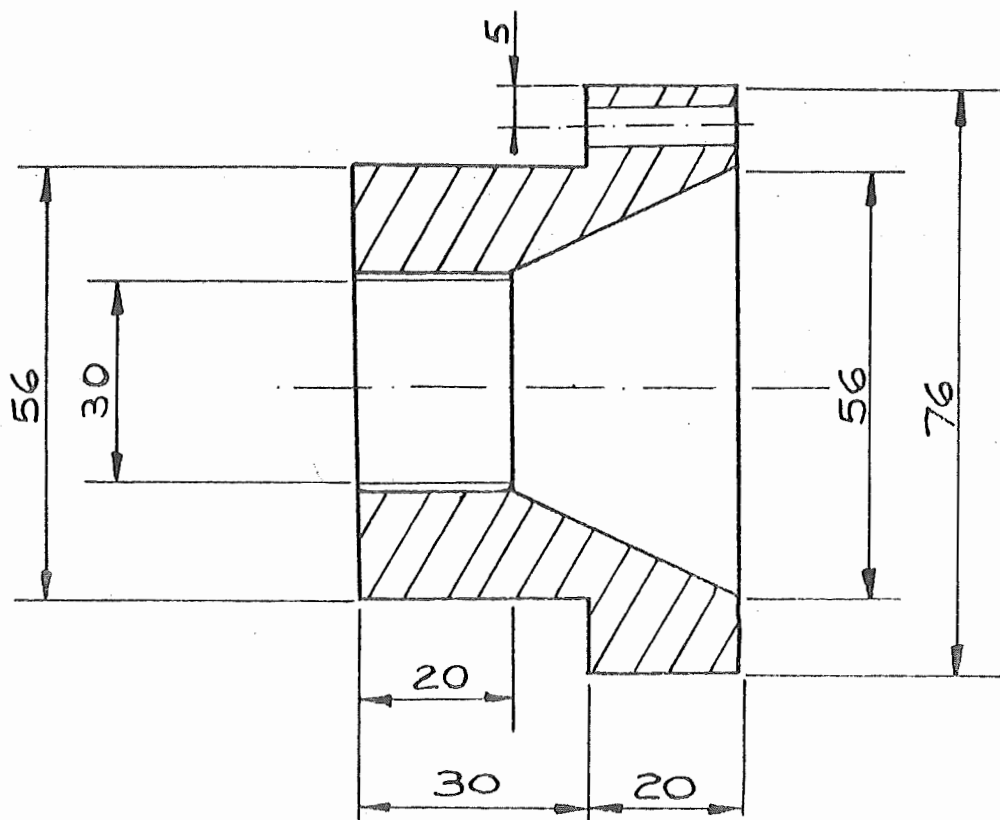


PEÇA Nº 1

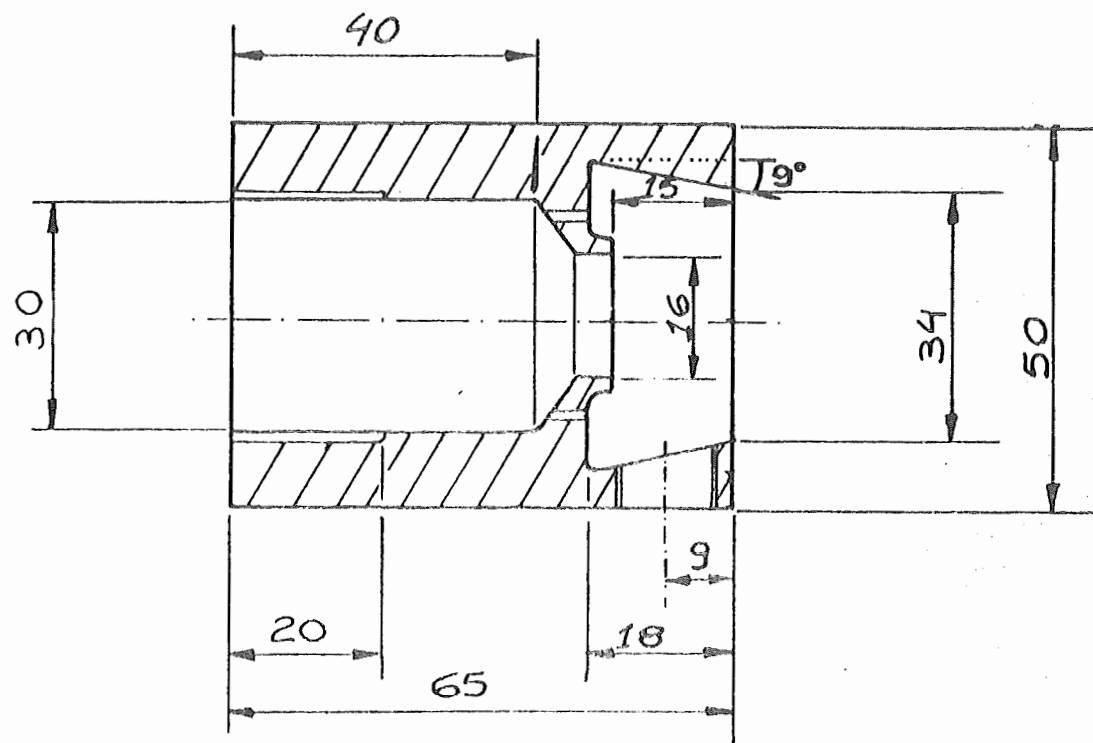


PEÇA Nº 2

LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA					
NOME DA PEÇA: DISPOSITIVO DE APROXIMAÇÃO			NOME DA PEÇA: PORTA INJETOR		
OBS: PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA.	DATA: 13 DEZ 89	ESCALA 1/1	OBS:	DATA: 13 DEZ 89	ESCALA 1/1
	FOLHA Nº			FOLHA Nº	

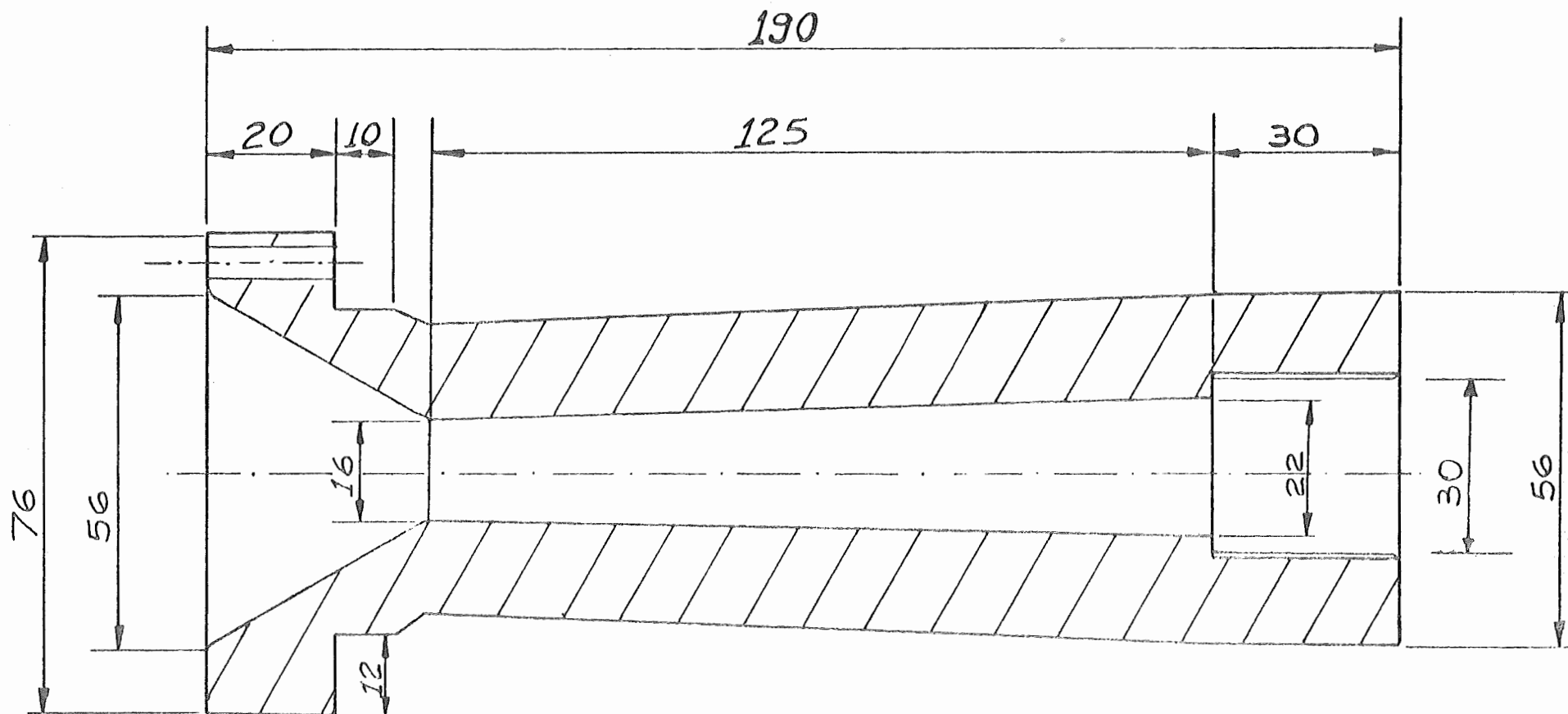


PEÇA Nº 3



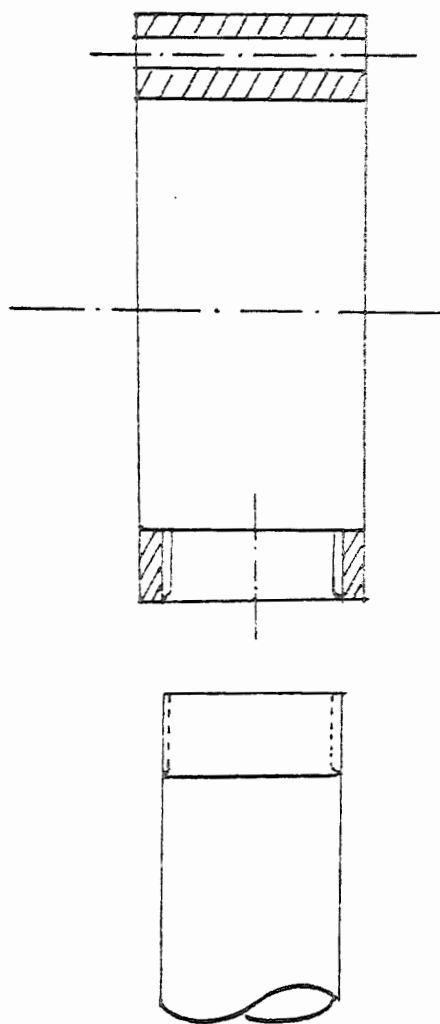
PEÇA Nº 4

LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA					
NOME DA PEÇA: CÂMARA DE AR PRIMÁRIO			NOME DA PEÇA: DIFUSOR DE QUEIMA		
OBS: PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA	DATA: 12 dez 89	ESCALA 1 : 1	OBS: MATERIAL DA PEÇA 1: ALUMÍ- NIO	DATA 12 dez 89	ESCALA 1 : 1
	FOLHA Nº			FOLHA Nº	



PEÇA Nº 5

LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA		
TÍTULO: MISTURADOR		
OBS: PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA	DATA: 12 DEZ 89	ESCALA: 1:1
	FOLHA Nº:	



PEÇA Nº 6

LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA	
TÍTULO: ADAPTADOR PARA QUEIMADOR COM AR SOB PRESSÃO	
PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA	DATA: DEZEMBRO 89
	ESCALA: 1:1

B I B L I O G R A F I A

- 1 - ALIX, A. et ROGIER, J. - La stabilisation des flammes de diffusion de gaz naturel de tupe industriel en eonlement axial. Revue Generale du Thermigne n° 126, Juin 1972, 557-575.
- 2 - BOGOLIUBOV, I.S. - Design procedure for spraytype gās burners. Indian Institute of Technology, April 1966, 238-240.
- 3 - HOSTALIER, P.; - Les Brûleurs Industriels a gās. Ed. Eyrolles Paris, 1970.
- 4 - HOVSENIUS, P.G. - Design of the flame ports of gas burners for flame stability. Journal of the Institute of fuel, January 1970, 17-20.
- 5 - JAEGLÉ, J.; MORILLON, R. et MARAVAL, L. - Nombres sans, dimensions pour le calcul de l'écoulement d'un fluide compressible. Revue Generale du Thermigne n° 21, janeiro 1972, 19-50.
- 6 - JATARINOV, V. - The Aerodynamic Basis for Gās Burner Design. Steel Processing V. 37(4), April 1951, 189-191.