

ANÁLISE DE UM PROJETO DE PRESSURIZAÇÃO DE CAIXA DE ESCADA DE SEGURANÇA

1. DADOS: Edifício de 13 andares
Tipo: Residencial
Local: São Paulo
Pressurização: 1 Estágio

2. CÁLCULOS:

Utilizando a simbologia definida no Smacpaper de 07/99 a respeito do assunto tem-se:

2.1 Cálculo das Vazões.

2.1.1 Considerando PCF abertas:

Número de PCFs abertas: 2 (de acordo com a tabela 3 da IT).

Área das PCFs: 1,652 m² (conforme tabela 2 da IT).

Velocidade: 1,0 m/s (conforme item 3.7.5, sub-item c da IT).

$Q = 2 * 1,652 * 1,0 = 3,304 \text{ m}^3/\text{s}$ referidos à condição padrão.

2.1.2 Considerando PCF fechadas:

Número de PCFs: 12 dando acesso ao espaço pressurizado.

01 permitindo a saída do espaço pressurizado.

De acordo com a tabela 2 da IT, tem-se:

$A_{\text{frestas}} = 12 * 0,048 + 1 * 0,075 = 0,651 \text{ m}^2$.

De acordo com o item 3.7.1 da IT:

$Q = 0,827 * 0,651 * 50^{1/2} = 3,806 \text{ m}^3/\text{s}$ (maior do que $Q_{\text{portas abertas}}$).

2.1.3 Vazão total incluindo os adicionais considerados no item 3.7.4 da IT, relativos a vazamentos não identificados aplicados ao projeto em causa e a seguranças:

De acordo com sub-item a:

$Q_{\text{Adic}} = 35\% \quad Q_{\text{Adic}} = 35\% * 3,806 = 1,3321 \text{ m}^3/\text{s}$

De acordo com sub-item b:

$Q = 1,25 * (3,806 + 1,3321) = 6,422 \text{ m}^3/\text{s}$

Conforme item 3.7.7 da IT, $\Delta Q_{Adic} = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ a fim de compensar o risco da PCF do “piso de descarga” (de pessoas) ou de outro piso.

$\therefore Q_T = 6,422 + 1,0 = 7,422 \text{ m}^3/\text{s}$ satisfazendo portanto a vazão total mínima de $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$ estipulada no sub-item 6 do item 3.7.1 da IT.

Como a vazão volumétrica se refere às condições padrões do ar, a vazão mássica total se calcula conforme abaixo:

$$\dot{m}_T = \rho_{pad} * Q_T = 1,204 * 7,422 = 8,936 \text{ kg/s}$$

2.2 Cálculo dos Δp e resistências correspondentes.

2.2.1 Associados às resistências de aspiração do ar externo.

Conforme item 3.2.1 do SmacPaper de 07/99.

$$R = \frac{C}{2 * S^2 * \rho}$$

Adotando portanto $\rho_{verão}$ as resistências aumentam bem como a vazão volumétrica a ser circulada pelo ventilador.

$$\rho = f(\text{TBS}; \text{TBU}; \text{ALTITUDE})$$

Para São Paulo (ABNT):
 TBS = 31°C
 TBU = 24°C
 ALT = 731 m

Utilizando as equações da Psicrometria ρ fica explicitado e igual a $1,034 \text{ kg/m}^3$.

Extraindo do projeto o trecho de captação do ar, obtém-se o croqui abaixo:

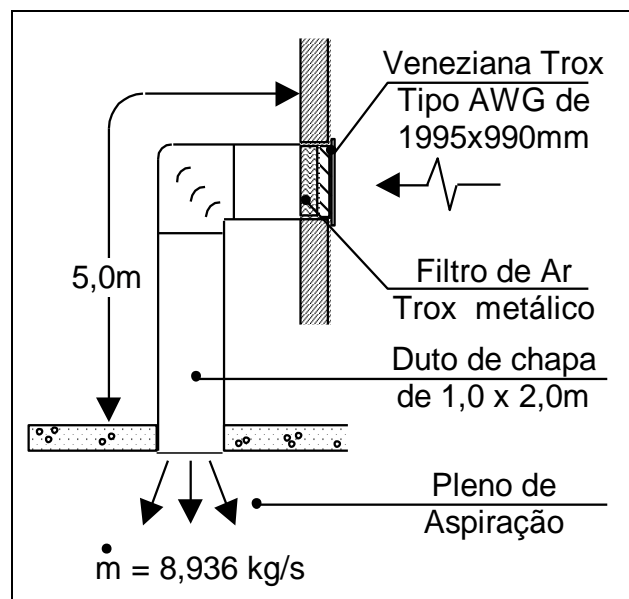


Figura 1



- Resistências em série:
- veneziana
 - filtro
 - joelhos com veios
 - expansão para o pleno de aspiração
 - resistência distribuída.

- veneziana (que inclui a contração na entrada):

$$\Delta p = f(V)$$

$$G_{FACE} = \frac{8,936}{(1,995 * 0,990)} = 4,524 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\therefore V = \frac{G}{\rho} = \frac{4,524}{1,034} = 4,3756 \text{ m/s}$$

para 4,3756 m/s, $\Delta p = 6 \text{ mmca} = 58,86 \text{ Pa}$

O catálogo supõe ar padrão a $1,204 \text{ kg/m}^3$.

$$\therefore \Delta p = 58,86 * \frac{1,034}{1,204} = 50,55 \text{ Pa}$$

- filtro:

$$\Delta p \text{ conforme TROX} = 6,0 \text{ mmca} \quad \therefore \Delta p = \frac{6 * 9,81 * 1,034}{1,204} = 50,55 \text{ Pa}$$

- joelho com veios:

$c \cong 0,24$ (conforme Manual da Smacna)

$$\Delta p = c * p_d$$

$$p_d = \frac{G^2}{2\rho} \quad G = \frac{8,936}{(2,0 * 1,0)} = 4,468 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$e \quad \Delta p = 0,24 * \frac{4,468^2}{2 * 1,034} = 2,316 \text{ Pa}$$

- expansão para o pleno de aspiração:

$\Delta p = c * p_d$ com $c = 1$ (conforme Manual da Smacna)

$$\therefore \Delta p = 1 * p_d = 1 * \frac{4,468^2}{2 * 1,034} = 9,65 \text{ Pa}$$

- Δp distribuída no comprimento do duto:

$$\Delta p = \frac{f * L}{D_h} * p_d$$

$$D_h = \text{diâmetro hidráulico} = \frac{4 * S}{P_m} = \frac{4 * (1,0 * 2,0)}{2 * (1,0 + 2,0)} = 1,33 \text{ m}$$

$$p_d = \frac{4,468^2}{2 * 1,034} = 9,65 \text{ Pa}$$



$$L = 5,0 \text{ m}$$

$$f = f(\text{NRe})$$

$$\text{NRe} = \frac{G * D_h}{\mu}$$

$$\mu = \rho * v$$

$$v = 15,06 \text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s} \text{ (adotado pela Smacna para o ar)}$$

$$\therefore \mu = 1,034 * 15,06 \text{E-}06 = 15,57 \text{E-}06 \text{ Pas}$$

$$\therefore \text{NRe} = \frac{4,468 * 1,33}{15,57 \text{E-}06} = 381659$$

$$f = 0,11 * \left(\frac{\varepsilon}{D_h} + \frac{68}{\text{NRe}} \right)^{0,25} \text{ (Equação de Altshul)}$$

$$\varepsilon = 0,00015 \text{ m (chapa galvanizada)}$$

$$\therefore f = 0,11 * \left(\frac{0,00015}{1,33} + \frac{68}{381659} \right)^{0,25} = 0,01436$$

$$\therefore \Delta p = \frac{0,01436 * 5,0}{1,33} * 9,65 = 0,52 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_T = \sum \Delta p_i = 50,55 + 50,55 + 2,32 + 9,65 + 0,52 = 113,59 \text{ Pa}$$

$$R_{\text{asp}} = \frac{\Delta p_T}{\frac{\bullet}{m_T^2}} = \frac{113,59}{8,936^2} = 1,4225 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

2.2.2 Resistência correspondente às frestas das PCFs e às de vazamentos não localizados, no interior do espaço pressurizado:

$$R_f = \frac{\overline{\Delta p}}{\frac{\bullet}{m_T^2}}$$

$$\overline{\Delta p} = 50 \text{ Pa (conforme Tabela 1 do item 3.6 da IT).}$$

$$\therefore R_f = \frac{50}{8,936^2} = 0,6261 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

2.2.3 Resistência de “escape”:

Adotando 10 Pa (inclusive para dimensionamento de aberturas de escape especiais) para condução final do ar ao exterior do edifício, tem-se:

$$R_{\text{esc}} = \frac{10}{8,936^2} = 0,1252 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

2.2.4 Resistência associada ao sistema de insuflação:

a) Δp associado ao duto de insuflação de alvenaria de secção constante no interior da caixa de escada para distribuição do ar pelos andares.

O croqui abaixo extraído do projeto em causa, ilustra o duto de distribuição supra referido:

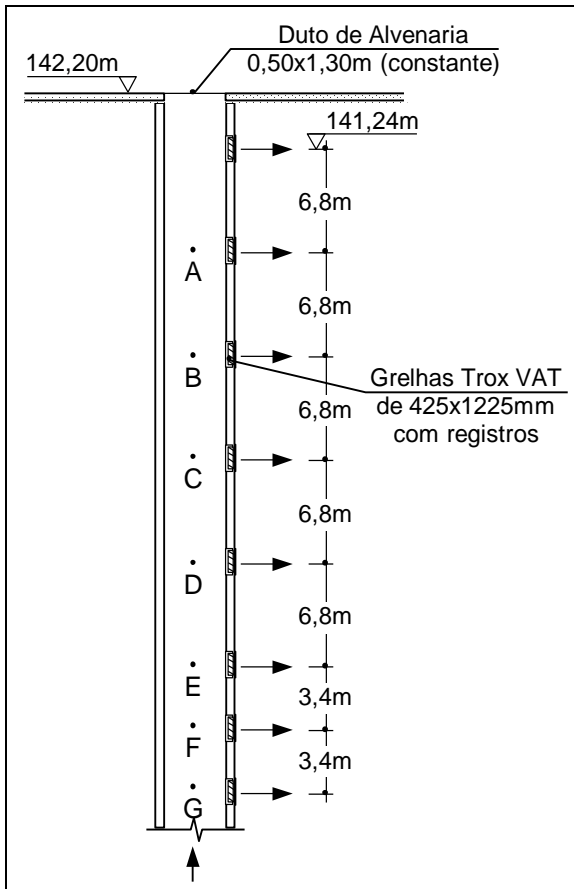


Figura 2

Dados complementares:

$$\varepsilon_{\text{alvenaria}} = 0,003\text{m}$$

(conforme Tabela 6.1 do livro "Refrigeração e Ar Condicionado" de Wilbert F. Stoecker)

$$S_{\text{efetiva}} \text{ da grelha: } 0,27 \text{ m}^2.$$

Coefficientes de derivações: extraídos de Idelcik – "Memento des Pertes de Charge".

O "croquis" ao lado corresponde ao esquema adiante em arranjo série-paralela, onde as maiores resistências se associam às derivações a 90° especialmente nos primeiros trechos da distribuição (nós G e F), sendo que, de uma forma geral, a aplicação dos coeficientes do Idelsik ao caso, conduz, para uma derivação genérica correspondente a um nó P às considerações abaixo, onde $N = n^{\circ}$ de derivações de mesma vazão mássica:

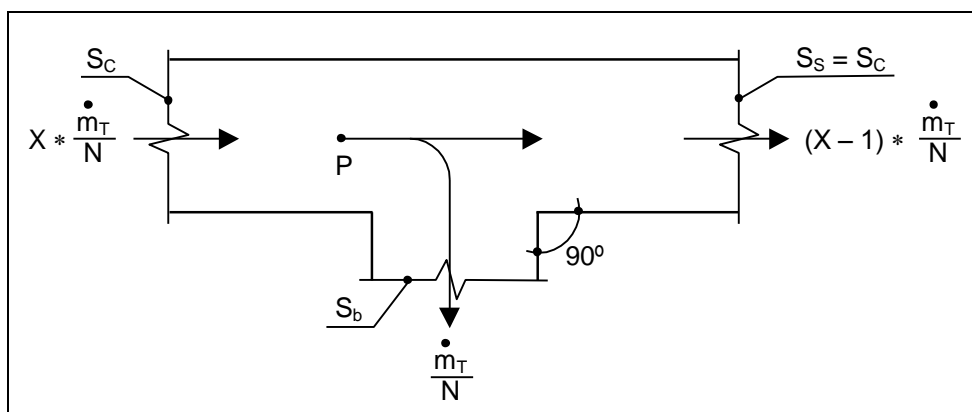


Figura 3

$$c_b \text{ (coeficiente de "branch")} = f\left(\frac{V_b}{V_c}\right)_{90^\circ} = f\left(\frac{G_b}{G_c}\right)_{90^\circ}$$

$$c_s \text{ (coeficiente de "straight")} = f\left(\frac{V_s}{V_c}\right)_{90^\circ} = f\left(\frac{G_s}{G_c}\right)_{90^\circ}$$

$$\frac{G_b}{G_c} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_b}{\left(X * \frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_c} = \frac{S_c * 1}{S_b * X}$$

$$\frac{G_s}{G_c} = \frac{\left((X-1) * \frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_c}{\left(X * \frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_c} = \frac{X-1}{X}$$

com X variando de 1 a N.

Na derivação terminal, tem-se:

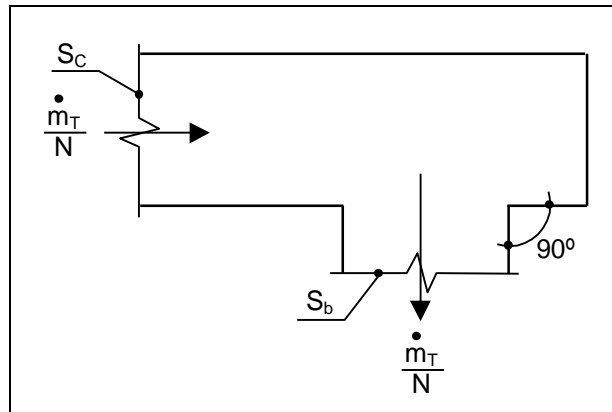


Figura 4

$$\frac{G_b}{G_c} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_b}{\left(\frac{\dot{m}_T}{N}\right) / S_c} = \frac{S_c}{S_b}$$

$$\frac{G_s}{G_c} = \frac{0}{G_c} = 0$$

Das considerações acima fica constatada a independência dos coeficientes de resistência da vazão \dot{m}_T e conseqüentemente propagada à resistência fluido-dinâmica resultante e equivalente ao duto da distribuição, de acordo com o conceito expresso no item 3.2.1 do Smacpaper de 07/99 (nº 67).

Esquema equivalente:

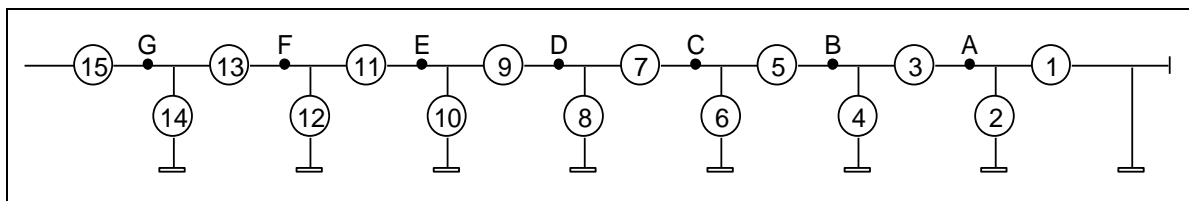


Figura 5

A determinação da pressão total no nó G partindo da ambiente para o ventilador corresponde a uma parcela de Δp da rede de insuflação em relação à pressão ambiente (caixa de escada).

As perdas consideradas por simulação se referem a perdas distribuídas nos trechos, nas derivações (“branch” e “straight”), na derivação terminal e nas grelhas de insuflação, em paralelo.

Os cálculos são feitos em planilhas eletrônicas, transcritas adiante e as perdas nas grelhas e na derivação terminal, são calculados separadamente como segue:

- Δp nas grelhas em paralelo:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_T}{8} = \frac{8,936}{8} = 1,117 \text{ kg/s}$$

$$\therefore Q_{\text{grelha}} = \frac{1,117}{1,034} = 1,080 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{ef}} = \frac{1,080}{0,27} = 4 \text{ m/s}$$

Na tabela da Trox para grelha VAT-DG, tem-se:

Para 4 m/s $\rightarrow \Delta p = 1,2 \text{ mmca} = 11,77 \text{ Pa}$

Como o catálogo supõe a vazão volumétrica nas condições padrões,

$$\Delta p = \frac{11,77 * 1,034}{1,204} = 10,11 \text{ Pa}$$

- $\Delta P_{\text{deriv. terminal}}$ (trecho 1):

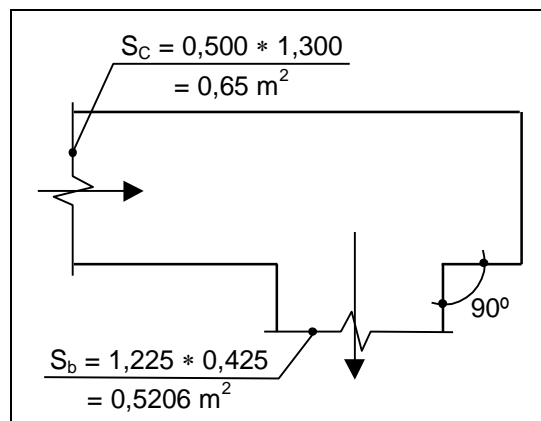


Figura 6

$$G_c = \frac{1,117}{0,65} = 1,718 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$G_b = \frac{1,117}{0,5206} = 2,145 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\left. \begin{array}{l} G_b = 2,145 \\ G_c = 1,718 \end{array} \right\} C_b = 1,65 \text{ (Idelcik)}$$

$$G_s = 0 \rightarrow C_s = 1,0$$



$$p_{dc} = \frac{G_c^2}{2 * \rho} = \frac{1,718^2}{(2 * 1,034)} = 1,427 \text{ Pa}$$

$$\therefore \Delta p_{Term} = (1,65 + 1,0) * 1,427 = 3,78 \text{ Pa}$$

• Cálculo das perdas distribuídas” nos trechos.

Evidenciado na planilha abaixo:

Rugosidade: 0,003 m			Visc. Din.: 1,5572E-05			Densidade: 1,034 kg/m ³		
Trecho	H M	W m	Pm M	D _h m	S m ²	m kg/s	G kg/m ² s	NRe
1	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	1,117	1,72	79702
2	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
3	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	2,234	3,44	159404
4	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
5	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	3,351	5,16	239106
6	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
7	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	4,468	6,87	318808
8	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
9	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	5,585	8,59	398510
10	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
11	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	6,702	10,31	478212
12	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
13	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	7,819	12,03	557914
14	0,43	1,23	3,30	0,63	0,52	1,117	2,15	86948
15	0,50	1,30	3,60	0,72	0,65	8,936	13,75	637616

ṁ _T : 8,936 kg/s				
Trecho	f	L m	p _d Pa	Δp Pa
1	0,029261	6,80	1,43	0,39
2	0,030005	0,10	2,23	0,01
3	0,028617	6,80	5,71	1,54
4	0,030005	0,10	2,23	0,01
5	0,028392	6,80	12,85	3,44
6	0,030005	0,10	2,23	0,01
7	0,028278	6,80	22,85	6,08
8	0,030005	0,10	2,23	0,01
9	0,028208	6,80	35,70	9,48
10	0,030005	0,10	2,23	0,01
11	0,028162	3,40	51,41	6,82
12	0,030005	0,10	2,23	0,01
13	0,028128	3,40	69,97	9,27
14	0,030005	0,10	2,23	0,01
15	0,028103		91,39	0,00

• Cálculo das perdas nas derivações para as grelhas.

\dot{m}_T : 8,936 kg/s							
Trecho	\dot{m}_b (kg/s)	\dot{m}_s (kg/s)	\dot{m}_c (kg/s)	Gc (kg/m ² s)	Gb (kg/m ² s)	Gs (kg/m ² s)	Gb/Gc
1		1,1170	2,2340	3,4370		1,7185	
2	1,1170		2,2340	3,4370	2,1455		0,62
3		2,2340	3,3510	5,1554		3,4370	
4	1,1170		3,3510	5,1554	2,1455		0,42
5		3,3510	4,4680	6,8739		5,1554	
6	1,1170		4,4680	6,8739	2,1455		0,31
7		4,4680	5,5851	8,5924		6,8739	
8	1,1170		5,5851	8,5924	2,1455		0,25
9		5,5851	6,7021	10,3109		8,5924	
10	1,1170		6,7021	10,3109	2,1455		0,21
11		6,7021	7,8191	12,0293		10,3109	
12	1,1170		7,8191	12,0293	2,1455		0,18
13		7,8191	8,9361	13,7478		12,0293	
14	1,1170		8,9361	13,7478	2,1455		0,16
15		8,9361				13,7478	

\dot{m}_T : 8,936 kg/s						
Trecho	G _s /G _c	c _b	c _s	P _{dc} (Pa)	Δp _b (Pa)	Δp _s (Pa)
1	0,50		0,25	5,71		1,43
2		1,16		5,71	6,62	
3	0,67		0,09	12,85		1,16
4		1,07		12,85	13,75	
5	0,75		0,07	22,85		1,60
6		1,03		22,85	23,54	
7	0,80		0,04	35,70		1,43
8		1,01		35,70	36,06	
9	0,83		0,03	51,41		1,54
10		1,01		51,41	51,92	
11	0,86		0,02	69,97		1,40
12		1,01		69,97	70,53	
13	0,88		0,02	91,39		1,83
14		1,01		91,39	91,94	
15						

• Cálculo das perdas totais nos trechos.

Trecho	P_d Pa	$\Delta P_{distrib.}$ Pa	$\Delta P_{Deriv.}$ Pa	ΔP_{grelha} Pa	$\Delta P_{Terminal}$ Pa	ΔP_{Total} Pa
1	1,43	0,39	1,43	10,11	3,78	15,71
2	2,23	0,01	6,62	10,11		16,74
3	5,71	1,54	1,16			2,70
4	2,23	0,01	13,75	10,11		23,87
5	12,85	3,44	1,60			5,04
6	2,23	0,01	23,54	10,11		33,66
7	22,85	6,08	1,43			7,51
8	2,23	0,01	36,06	10,11		46,18
9	35,70	9,48	1,54			11,02
10	2,23	0,01	51,92	10,11		62,04
11	51,41	6,82	1,40			8,22
12	2,23	0,01	70,53	10,11		80,65
13	69,97	9,27	1,83			11,09
14	2,23	0,01	91,94	10,11		102,06
15	91,39	0,00	0,00			0,00

Determinação dos níveis de pressão total nos “nós”:

A planilha abaixo determina os níveis em cada nó por comparação entre os 2 caminhos associados a cada um, acumulando com o nível máximo correspondente ao nó anterior (em negrito).

A planilha permite também explicitar os Δp de balanceamento em cada derivação, que deverão ser consumidos pelos registros de cada grelha respectiva.

Nós:	A	B	C	D	E	F	G
Caminhos							
A-1	15,71						
A-2	16,74						
B-3		19,44					
B-4		23,87					
C-5			28,91				
C-6			33,66				
D-7				41,17			
D-8				46,18			
E-9					57,20		
E-10					62,04		
F-11						70,26	
F-12						80,65	
G-13							91,74
G-14							102,06
$D_{pBAL.}$	1,03	4,43	4,75	5,01	4,84	10,39	10,32

b) Cálculo do restante da rede de insuflação.

A partir do ponto G em direção ao ventilador até a descarga do mesmo, como segue, de acordo com o “croquis” abaixo extraído do projeto em causa:

O restante da rede de insuflação até a descarga do ventilador acha-se abaixo “croquisado”.

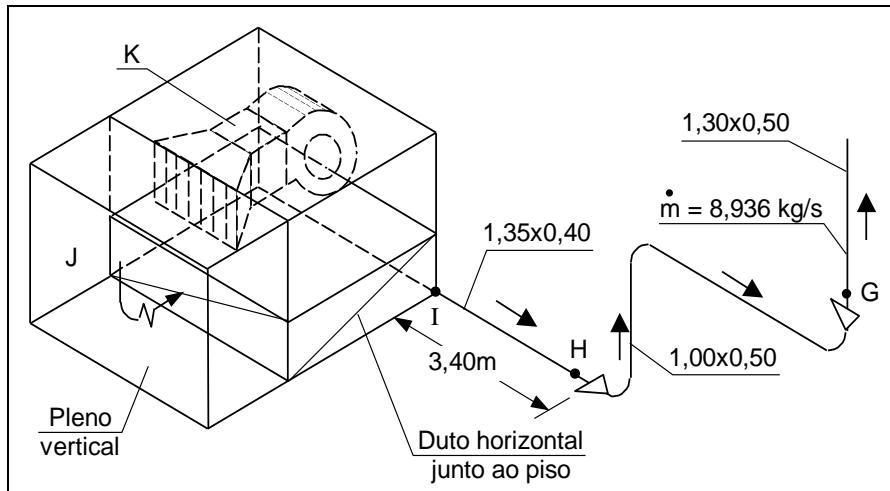


Figura 7

Δp_{G-H} :

$$L = 9,0\text{m} \quad D_h = \frac{4 * 1,0 * 0,50}{2 * (1,0 + 0,50)} = 0,666\text{m}$$

$$\text{perda distribuída:} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu = 15,06\text{E} - 06 * 1,034 = 15,57\text{E} - 06 \\ \varepsilon = 0,00015(\text{chapa}) \end{array} \right.$$

$$G = \frac{8,936}{1,0 * 0,50} = 17,87\text{ kg/s}$$

$$NRe = \frac{G * D_h}{\mu} = \frac{17,87 * 0,666}{15,57\text{E} - 06} = 764467$$

$$f = 0,11 * \left(\frac{0,00015}{0,666} + \frac{68}{764467} \right)^{0,25} = 0,0146$$

$$p_d = \frac{G^2}{2 * \rho} = \frac{17,87^2}{(2 * 1,034)} = 154,42\text{ Pa}$$

$$\Delta p = \frac{f * L}{D_h} * p_d = \frac{0,0146 * 9,0}{0,666} * 154,42 = 30,46\text{ Pa}$$

- Δp referente a 3 joelhos com veios:

$$\Delta p = 3 * 0,24 * 154,42 = 111,18\text{ Pa}$$

- Expansão abrupta de 1,0*0,50 a 1,30*0,50.

$$c = \left(1 - \frac{1,0}{1,3} \right)^2 = 0,053$$

$$\Delta p = 0,053 * 154,42 = 8,22 \text{ Pa}$$

- Contração abrupta de 1,35 * 0,40 para 1,0 * 0,50.

$$c = 0,04 \text{ (ASHRAE)}$$

$$\Delta p = 0,04 * 154,42 = 6,17 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{G-H} = 30,46 + 111,18 + 8,22 + 6,17 = 156,03 \text{ Pa}$$

Trecho H-I:

- Δp distribuída:

$$L = 3,40$$

$$S = 1,35 * 0,40$$

$$G = \frac{8,936}{(1,35 * 0,40)} = 16,55 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$p_d = \frac{16,55^2}{(2 * 1,034)} = 132,45 \text{ Pa}$$

$$D_h = \frac{4 * 1,35 * 0,40}{2 * (1,35 + 0,40)} = 0,617 \text{ Pa}$$

$$NRe = \frac{G * D_h}{\mu} = \frac{16,55 * 0,617}{15,57E - 06} = 655834$$

$$f = 0,11 * \left(\frac{0,00015}{0,617} + \frac{68}{655834} \right)^{0,25} = 0,01501$$

$$\therefore \Delta p = 0,01501 * \frac{3,40}{0,617} * 132,45 = 10,95 \text{ Pa}$$

$$\therefore \Delta p_{H-I} = 10,95 \text{ Pa}$$

Trecho I-J:

- Contração do pleno vertical de descarga para o duto.

$$c = 0,50 \text{ (Smacna)}$$

$$G = \frac{8,936}{(2,45 * 0,40)} = 9,12 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$p_d = \frac{G^2}{2 * \rho} = \frac{9,12^2}{(2 * 1,034)} = 40,22 \text{ Pa}$$

$$\therefore \Delta p = 0,50 * 40,22 = 20,11 \text{ Pa}$$

- Δp distribuída:

$$L = 3,15 \text{ m}$$

$$D_h = \frac{4 * (2,45 * 0,40)}{2 * (2,45 + 0,40)} = 0,688 \text{ m}$$

$$NRe = \frac{G * D_h}{\mu} = \frac{9,12 * 0,688}{15,57E - 06} = 402826$$

$$f = 0,11 * \left(\frac{0,00015}{0,688} + \frac{68}{402826} \right)^{0,25} = 0,0154$$

$$\Delta p = \frac{0,0154 * 3,15}{0,688} * 40,22 = 2,84 \text{ Pa}$$

- Δp joelho irregular com veios:

$$c = 0,24 + c_{\text{contabrupta}} \text{ (incidentes sobre respectivas pressões dinâmicas)}$$

$$c_{\text{contabrupta}}(\text{ASHRAE}) = f \left(\frac{1,35}{2,45} \right) = f(0,55) = 0,18$$

$$p_{d_{\text{entrada na curva}}} = 40,22 \text{ Pa}$$

$$p_{d_{\text{saída}}} = p_{d_{H-I}} = 132,45 \text{ Pa}$$

$$\therefore \Delta p = 0,24 * 40,22 + 0,18 * 132,45 = 33,49 \text{ Pa}$$

$$\therefore \Delta p_{I-J} = 20,11 + 2,84 + 33,49 = 56,44 \text{ Pa}$$

Trecho J-K:

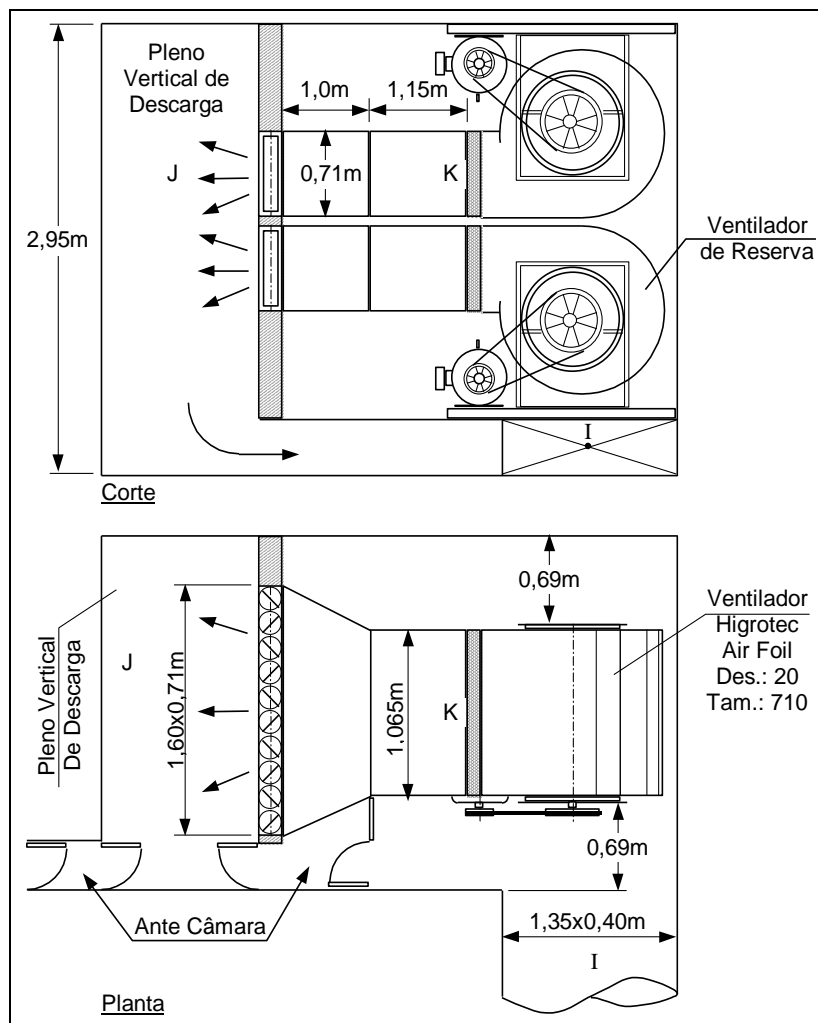


Figura 8

- Expansão no pleno vertical:

$$c = (1 + 0,07) = 1,07 \text{ sendo } 0,07 \text{ o correspondente ao damper } 100\% \text{ aberto (TROX)}$$

$$G = \frac{8,936}{1,60 * 0,71} = 7,866 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\therefore p_d = \frac{G^2}{2 * \rho} = \frac{7,866^2}{(2 * 1,034)} = 29,92 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 1,07 * 29,92 = 32,01 \text{ Pa}$$

- Δp distribuída:

$$L = 2,15 \text{ m} \quad \text{duto: } 0,71 * \left(\frac{1,065 + 1,60}{2} \right) = 0,71 * 1,332$$

$$G = \frac{8,936}{(0,71 * 1,332)} = 9,45 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\therefore p_d = \frac{G^2}{2 * \rho} = \frac{9,45}{(2 * 1,034)} = 43,17 \text{ Pa}$$

$$D_h = \frac{4 * 0,71 * 1,332}{2 * (0,71 + 1,332)} = 0,926 \text{ m}$$

$$NRe = \frac{G * D_h}{\mu} = \frac{9,45 * 0,926}{15,57E - 06} = 562186$$

$$f = 0,11 * \left(\frac{0,00015}{0,926} + \frac{68}{562186} \right)^{0,25} = 0,01426$$

$$\therefore \Delta p = \frac{0,01426 * 2,15}{0,926} * 43,17 = 1,43 \text{ Pa}$$

- Expansão gradual:

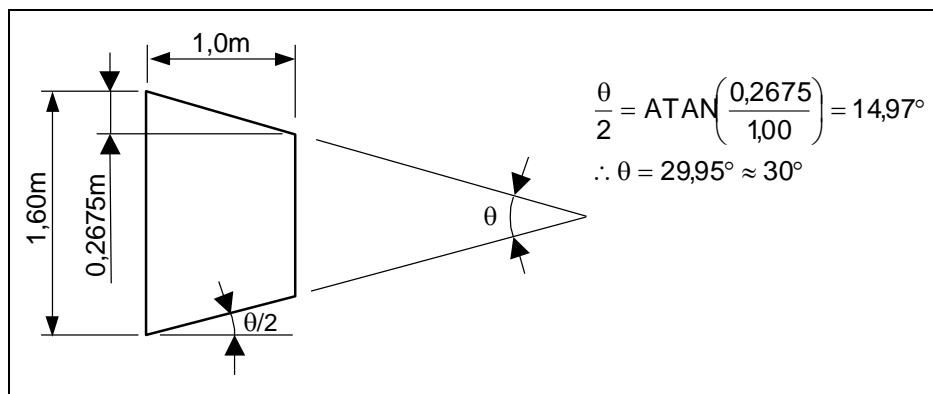


Figura 9

$$c = 0,59 \text{ (ASHRAE)}$$

$$\Delta p = c * \frac{(G_1 - G_2)^2}{2 * \rho}$$

$$G_1 = \frac{8,936}{(0,71 * 1,065)} = 11,81 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$G_2 = \frac{8,936}{(0,71 * 1,60)} = 7,866 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\therefore \Delta p = 0,59 * \frac{(11,81 - 7,866)^2}{(2 * 1,034)} = 4,44 \text{ Pa}$$

- Efeito do sistema na descarga (Smacna):

$$L_{ef} = 2,5 * D_{eq} \quad V_{std \text{ desc}} = \frac{G}{1,204} = \frac{11,81}{1,204} = 9,80 \text{ m/s}$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 * a * b}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,71 * 1,065}{\pi}} = 0,981$$

$$\therefore L_{ef} = 2,5 * 0,981 = 2,45 \text{ m}$$

$$\% L_{ef} = \frac{1,15}{2,45} = 0,47 \text{ (47\%)}$$

OBS.: O comprimento da expansão gradual não pode ser incluído no comprimento efetivo devido ao ângulo da mesma ser superior a 7° (conforme obs. no Manual da Smacna).

Para $L_{ef} = 47\% \rightarrow$ curva W

$$\left. \begin{array}{l} V_{std} = 9,80 \text{ m/s} \\ \text{curva W} \end{array} \right\} \Delta p_{ef, sistema} = 11,21 * 1,034 / 1,204 = 9,62 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{J-K} = 32,01 + 1,43 + 4,44 + 9,62 = 52,21 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{G-K} = \Delta p_{G-H} + \Delta p_{I-J} + \Delta p_{J-K} = 156,03 + 10,95 + 56,44 + 52,21 = 275,63 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{ins} = \Delta p_{duto \text{ alvenaria}} + \Delta p_{G-K}$$

$$\Delta p_{duto} = 102,06 \text{ Pa} \quad (\text{nível de pressão no ponto G em relação à } \underline{\text{caixa de escada}} \text{ conforme item 2.2.4 sub-item a).}$$

$$\therefore \Delta p_{ins} = 275,63 + 102,06 = 377,69 \text{ Pa}$$

$$\therefore R_i = \frac{377,69}{8,936^2} = 4,7298 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

2.3 Cálculo da pressão total do ventilador.

$$p_{T_v} = p_{T_{desc}} - p_{T_{asp}}$$

$$p_{T_{asp}} = p_{atmos} - (\Delta p_{asp} + \Delta p_{ef, sistema})$$

$$p_{atmos} = 0 \text{ (referência)}$$

$$\Delta p_{ef, sistema} = f\left(\frac{L}{D}\right) \text{ conforme Manual da Smacna}$$

$$\left. \begin{array}{l} L = 0,69 \\ D = 0,71 \end{array} \right\} \therefore \frac{L}{D} \cong 1 \text{ e } \Delta p_{ef, sist.} = 0$$



$$\Delta p_{asp} = 113,59 \text{ Pa (conforme item 2.2)}$$

$$\therefore p_{asp} = 0 - \Delta p_{asp} = -113,59 \text{ Pa}$$

$$p_{T_{desc}} = p_{atmosf} + \Delta p_{ins} + \Delta p_{caixa\ escada} + \Delta p_{esc.} = 0 + 377,69 + 50 + 10 = 437,69 \text{ Pa}$$

$$p_{T_v} = p_{T_{desc}} - p_{T_{asp}} \rightarrow 437,69 - (-113,59) = 551,28 \text{ Pa}$$

2.4 Pontos de operação real e de referência do ventilador.

2.4.1 Ponto de operação real:

$$\text{Vazão: } \frac{8,936}{1,034} = 8,642 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (31112 m}^3/\text{h)}$$

$$\text{Pressão total: } 551,28 \text{ Pa}$$

2.4.2 Ponto de operação de referência (catálogo):

$$\text{Vazão: } 8,642 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (31112 m}^3/\text{h)}$$

$$\text{Pressão total: } \frac{551,28 * 1,204}{1,034} = 641,91 \text{ Pa}$$

$$V_{desc} = \frac{31112/3600}{(0,71 * 1,065)} = 11,43 \text{ m/s}$$

$$\therefore p_{d_{desc}} = \frac{11,43^2 * 1,204}{2} = 78,63 \text{ Pa}$$

$$\therefore \text{Pressão estática: } 641,90 - 78,63 = 563,27 \text{ Pa}$$

As curvas do catálogo do fabricante se referem à pressões estáticas em mmca.

$$\therefore \text{Pressão estática} = \frac{563,27}{9,81} = 57,4 \text{ mmca}$$

Entrando nas curvas do ventilador com 31112 m³/h e 57,4 mmca obtêm-se os valores da rotação e eficiência estática abaixo:

$$N = 1180 \text{ rpm}$$

$$\eta_{est} = 72\%$$

$$\text{Como } p_{oT} = \frac{Q * p_v}{\eta}, \text{ tem-se}$$

$$\frac{Q * p_{sv}}{\eta_{est}} = \frac{Q * p_{T_v}}{\eta_T} \therefore \eta_T = \frac{\eta_{est} * p_{T_v}}{p_{sv}}$$

$$\eta_T = 72 * \frac{641,91}{563,27} = 82\%$$

2.4.3 Condições reais de operação do ventilador:

$$Q_{real} = Q_{ref} \therefore Q = 8,642 \text{ m}^3/\text{s} = 31112 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$N_{real} = N_{ref} \therefore N = 1180 \text{ rpm}$$

$$\eta_{T_{\text{real}}} = \eta_{T_{\text{ref}}} \therefore \eta_T = 82\%$$

$$p_{T_{v_{\text{real}}}} = 551,28 \text{ Pa}$$

$$p_{oT} = \frac{8,642 * 551,28}{0,82} = 5810 \text{ W} = 5,81 \text{ kW} = 7,89 \text{ CV}$$

motor acoplado: 10 CV

2.5 Interação entre ventilador e sistemas.

2.5.1 Curvas dos sistemas

As curvas dos sistemas em termos de vazões volumétricas na densidade de aspiração do ventilador e pressões totais correspondentes, acham-se expressas no Smacpaper nº 64 de Julho/99 abaixo reproduzidas:

a) Para PCF supostas fechadas:

$$p_{T_v} = [(R_{\text{esc}} + R_i + R_{\text{asp}}) * \rho_{\text{asp}}^2] * Q^2 + \overline{\Delta p}$$

$$R_{\text{esc}} = 0,1252 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ conforme item 2.2.3}$$

$$R_i = 4,7298 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ conforme item 2.2.4}$$

$$R_{\text{asp}} = 1,4225 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ conforme item 2.2.1}$$

$$\rho_{\text{asp}} = 1,034 \text{ kg/m}^3 \text{ conforme item 2.2.1}$$

$$\overline{\Delta p} = 50 \text{ Pa}$$

$$\therefore R_{\text{esc}} + R_i + R_{\text{asp}} = 6,2775 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore p_{T_v} = 6,2775 * 1,034^2 * Q^2 + 50$$

$$p_{T_v} = 6,7116 * Q^2 + 50$$

Substituindo Q pela vazão de operação, tem-se:

$$p_{T_v} = 6,7116 * 8,642^2 + 50 = 551,25 \text{ Pa} \text{ confirmando a pressão total de operação real determinada no item 2.4.1.}$$

$$\text{Para } Q \text{ em m}^3/\text{h}, p_{T_v} = 6,7116 * (Q/3600)^2 + 50 = 5,1787E - 07 * Q^2 + 50$$

b) Para PCF supostas abertas:

Conforme Smacpaper referido, a curva do sistema corresponde à expressão abaixo:

$$p_{T_v} = [(R_{\text{esc}} + R_i + R_{\text{asp}} + R_p) * \rho_{\text{asp}}^2] * Q^2$$

$$R_p = \frac{1}{a_p^2}$$

$$\text{com } a_p = \text{“abertura” fluido-dinâmica} = \frac{1}{\sqrt{R_p}}$$

$$a_p = a_{\text{PCF}} + a_{\text{f.n.i.}}$$

sendo $a_{\text{f.n.i.}}$ a abertura correspondente às frestas não indentificadas.

De acordo com o item 2.1.3, para $\Delta p = 50 \text{ Pa}$,

$$Q_{f.n.i.} = 25\% * 3,806 + 1,0 = 1,9515 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore \dot{m}_{f.n.i.} = 1,9515 * 1,204 = 2,349 \text{ kg/s} \text{ e portanto } R_{f.n.i.} = \frac{50}{2,349} = 9,0615 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ e}$$

$$a_{f.n.i.} = \frac{1}{\sqrt{9,0615}} = 0,3321 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$R_{PCF} = \frac{c}{2 * S^2 * \rho}$$

$S = 1,652 \text{ m}^2$ conforme tabela 2 da IT.

$c = 2,74$ (Idelcik)

$$\therefore R_{PCF} = \frac{2,74}{2 * 1,652^2 * 1,034} = 0,4854 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore a_{PCF} = \frac{1}{\sqrt{R_{PCF}}} = \frac{1}{\sqrt{0,4854}} = 1,4352 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

Na suposição de 2 portas abertas (conforme Tabela 3 da IT), tem-se:

$$a_{PCF} = 2 * 1,4352 = 2,8704 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\therefore a_p = a_{PCF} + a_{f.n.i.} = 2,8704 + 0,3321 = 3,2025$$

$$\therefore R_p = \frac{1}{a_p^2} = \frac{1}{3,2025^2} = 0,0975 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

As demais resistências foram calculadas anteriormente e, como não dependem de vazão e pressão, mantêm-se constantes, sendo:

$$R_{esc} = 0,1252 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_i = 4,7298 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{asp} = 1,4225 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\text{e } R = \sum R_i = (0,1252 + 4,7298 + 1,4225 + 0,0975) = 6,375 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

A equação do sistema nas mesmas condições expressas para PCF fechadas, resulta:

$$p_{T_v} = 6,375 * 1,034^2 * Q^2 = 6,8158 * Q^2$$

para Q em m^3/h

$$p_{T_v} = 6,8158 * \left(\frac{Q}{3600} \right)^2 = 5,2591 \text{E} - 07 * Q^2$$

Resumo:

Curva a) (PCF fechadas) para Q em m^3/h e p_{T_v} em Pa.

$$p_{T_v} = 5,1787 \text{E} - 07 * Q^2 + 50$$

Curva b) PCF abertas para Q em m^3/h e p_{T_v} em Pa.

$$p_{T_v} = 5,2591 \text{E} - 07 * Q^2$$

2.5.2 Curva do ventilador a 1180 rpm.

O levantamento da curva do ventilador para as condições reais em pressões totais em função das vazões volumétricas, obtêm-se conforme tabela abaixo, onde:

$$S_{desc} = 0,756m^2 \quad V_{desc} = \frac{Q/3600}{S_{desc}} \quad p_{d_{desc}} = \frac{V_{desc}^2}{2} * 1,204$$

$$p_{T_v} = p_{S_v} * 9,81 + p_{d_{desc}} \quad \eta_T = \eta_{S_T} * \frac{p_{v_T}}{p_{v_S}} \quad p_{T_{real}} = \frac{1,034}{1,204} * p_{T_{ref}}$$

Q (m ³ /h)	P _{est.}		η _{est} (%)	V _{desc.} (m/s)	p _{d_{desc.}} (Pa)	p _{T_{ref.}} (Pa)	p _{T_{real}} (Pa)	η _T (%)
	mmCA	Pa						
30000	63	618	76,0	11,02	73,14	691	593,5	84,99
31000	59	579	73,0	11,39	78,10	657	564,1	82,85
32000	52	510	68,7	11,75	83,22	593	509,5	79,90
33000	44	431	64,6	12,12	88,50	520	446,7	77,84
34000	36	353	61,2	12,49	93,95	447	383,9	77,48
35000	30	294	54,0	12,86	99,55	394	338,2	72,26

2.5.3 Curvas dos sistemas.

$$p_{T_{v(a)}} = 5,1787E-07 * Q^2 + 50 \text{ (PCF fechadas)}$$

$$p_{T_{v(b)}} = 5,2591E-07 * Q^2 \text{ (PCF abertas)}$$

Q (m ³ /h)	p _{T_{v(a)}} Pa	p _{T_{v(b)}} Pa
30000	516	473
31000	547	505
32000	580	538
33000	613	572
34000	648	607
35000	684	644

2.5.4 Pontos de operação (vide gráfico na figura 10 adiante).

O cruzamento da curva p_{T_a}(Q) com a curva do ventilador confirma o ponto de operação já explicitado do item 2.4.3.

O ponto de interseção do p_{T_b}(Q) com a curva do ventilador explicita o ponto de operação caracterizado por:

Vazão : 31650 m³/h (8,7916 m³/s)

Pressão Total : 520 Pa = 0,52 kPa

Eficiência Total : 80,7 %

$$\therefore POT_{Absorvida} = \frac{8,7916 * 0,52}{0,807} = 5,66 \text{ kW (7,69 CV)}$$

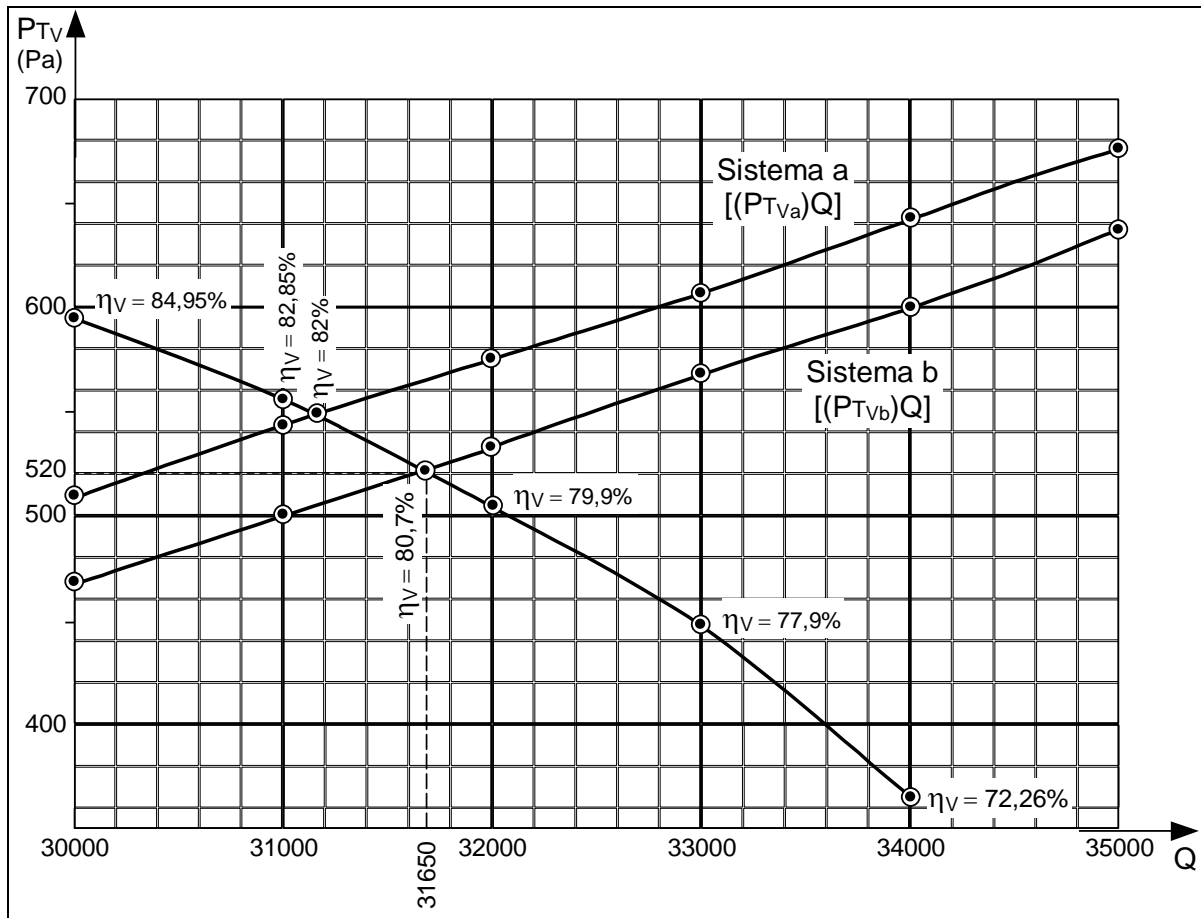


Figura 10

2.6 Determinação das vazões mássicas através das PCF abertas.

$$Q_b = 8,7916 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (conforme item 2.5.4)}$$

$$\therefore \dot{m}_b = 8,7916 * 1,034 = 9,0905 \text{ kg/s}$$

A vazão mássica sai pelas PCF e pelas frestas não identificadas.

Conforme item 2.5.1 b), $a_p = 3,2025 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kgs}^{-1}$ e a_{PCF} (para 2 portas) = $2,8704 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kgs}^{-1}$.

As vazões mássicas se distribuem na proporção das aberturas fluido-dinâmicas em paralelo.

$$\therefore \dot{m}_{PCF} = \frac{2,8704}{3,2025} * 9,0905 = 8,1478 \text{ kg/s}$$

$$\text{cabendo a cada porta } \frac{8,1478}{2} = 4,0739 \text{ kg/s}$$

$$\text{Área da PCF} = 1,652 \text{ m}^2$$

$$\therefore \frac{G}{PCF} = \frac{4,0739}{1,652} = 2,466 \text{ kg/s}$$

ou seja, o ventilador em equilíbrio com o sistema na condição b promove saída de

2,466 kg/s por cada PCF.

Em termos de vazão volumétrica em condições padrões do ar $V = \frac{2,466}{1,204} = 2,048 \text{ m/s}$, correspondendo ao dobro da velocidade mínima estabelecida na IT, de 1,0 m/s através das PCF abertas.

2.7 Determinação do Δp remanescente na caixa de escada com o sistema operando com as PCF abertas.

$$\Delta p = R * \dot{m}^2 = \frac{1}{a^2} * \dot{m}^2$$

$$\frac{a_{PCF}}{\text{porta}} = \frac{2,8704}{2} = 1,4352 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kgs}^{-1}$$

$$\dot{m} = 4,0739 \text{ kg/s} / \text{porta}$$

$$\therefore \Delta p = \frac{1}{(1,4352)^2} * (4,0739)^2 = 8,06 \text{ Pa}$$

2.8 Verificação das dimensões do “damper” de alívio.

Reportando-nos ao esquema elétrico equivalente da figura 1 do Smacpaper nº 67 de 07/99, tem-se:

$$\dot{m} = \dot{m}_f + \dot{m}_d$$

$Q_f = 3,806 \text{ m}^3/\text{s}$ conforme item 2.1.2, referidos ao ar padrão.

$$\therefore \dot{m}_f = 3,806 * 1,204 = 4,5824 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 8,936 \text{ kg/s (conforme item 2.1.3)}$$

$$\therefore \dot{m}_d = 8,936 - 4,5824 = 4,3535 \text{ Kg/s}$$

Para limitar a pressão na “caixa de escada” em 50 Pa tem-se:

$$R_d = \frac{50}{\dot{m}_d^2} = \frac{50}{4,3535^2} = 2,638 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

Supondo a abertura para o damper de alívio constituído por damper de sobrepressão TROX, tem-se os seguintes coeficientes de resistência em série:

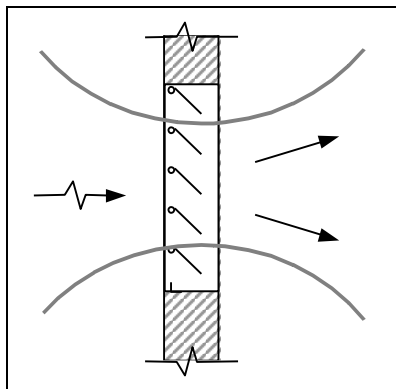


Figura 11



- passagem de pleno para pleno com $c = 2,74$ conforme Idelcik.
- C_{damper} de sobre-pressão ·

Conforme catálogo da TROX.

Para $V = 2 \text{ m/s}$ $\Delta p = 1,9 \text{ mmca}$ com $\rho = 1,204 \text{ Kg/m}^3$

$$1,9 \text{ mmca} = 1,9 * 9,81 = 18,64 \text{ Pa}$$

$$p_d = \frac{2^2 * 1,204}{2} = 2,408 \text{ Pa}$$

$$\therefore c = \frac{18,64}{2,408} = 7,74$$

$$\therefore \sum c_i = 2,74 + 7,74 = 10,48$$

$$R_d = \frac{c}{2 * S^2 * \rho} \quad \therefore S = \sqrt{\frac{c}{2 * R_d * \rho}}$$

$$R_d = 2,638 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore S = \sqrt{\frac{10,48}{2 * 2,638 * 1,034}} = 1,38 \text{ m}^2$$

$$G_{face} = \frac{\dot{m}_d}{S} = \frac{4,3535}{1,38} = 3,15 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad \text{que corresponde a } V_{padr\tilde{a}o} = \frac{3,15}{1,204} = 2,61 \text{ m/s}$$

Obs.: Operando por $\Delta p_{limite} = 60 \text{ Pa}$ a área se reduz conforme abaixo:

$$R_d = \frac{60}{4,3535^2} = 3,1657 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$e S = \sqrt{\frac{10,48}{2 * 3,1657 * 1,034}} = 1,2646 \text{ m}^2$$

$$G_{face} = \frac{\dot{m}_d}{S} = \frac{4,3535}{1,2646} = 3,44 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad \text{que corresponde a } V_{padr\tilde{a}o} = \frac{3,44}{1,204} = 2,85 \text{ m/s}$$

ooOoo



Referências:

- Programa Smacna de Educação Continuada em Tratamento de Ar
- Instrução Técnica IT – 010/33/99 do Corpo de Bombeiros.
- ASHRAE - Fundamentals.
- Smacna – HVAC Systems Duct Design
- Idelcik – “Memento des Pertes de Charge”
- TROX Teknik – Catálogos.
- Higtec – Catálogos.

Nota:

O assunto tratado neste SmacPaper e no anterior foi feito com a colaboração do tenente Carlos Cotta Rodrigues, coordenador da Comissão de Estudos do CB24 da ABNT, que prepara a Norma Brasileira sobre o tema, tendo sido também integrante da Sessão de Atividades Técnicas do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que elaborou a Instrução Técnica referida, juntamente com os representantes da ABRAVA e da SMACNA.



BRASIL



**SMACNA - Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association -
Chapter Brasil**

SMACNA - Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association - Chapter Brasil