

### PRESSURIZAÇÃO DE CAIXA DE ESCADA DE SEGURANÇA TIPO “SINGLE INJECTION”

#### 1. INTRODUÇÃO:

De acordo com texto contido na NPFA (“National Fire Protection Association” – NPFA 92A – Recommended Practice for Smoke Control Systems / 1988 Edition), o sistema tipo “single injection” corresponde à pressurização da caixa de escada em apenas um ponto.

Nessas condições, a caixa de escada (“stairtower”) é utilizada como “duto-plenum” dispensando o duto interno de distribuição do ar em pontos diversos em altura.

De acordo ainda com o mesmo texto, a NPFA adverte sobre a necessidade de uma análise total e cuidadosa para utilização deste tipo de sistema, mormente se a admissão de ar for pelo pavimento térreo, alertando sobre a possibilidade da porta corta-fogo deste pavimento ter sido deixada aberta, comprometendo a pressurização especificada para toda a caixa de escada.

A NPFA, no final do trecho do texto referido estende a análise criteriosa aludida também para os demais sistemas com duto distribuidor interno (que caracterizam os sistemas “multiple injection”), para caixas de escada com mais de 100 pés de altura.

É óbvio que o problema crítico se refere à “resistência fluido-dinâmica” associada ao escoamento vertical do ar pela caixa de escada e que se manifesta em série de um andar para outro na composição das resistências envolvidas no referido escoamento, ficando portanto na dependência da geometria da escada e das dimensões da caixa de escada que devem ser objetivo de análise específica em cada caso para decisões a respeito da concepção dos projetos.

O Smacpaper em causa procura analisar as condições de utilização deste sistema em um projeto de pressurização onde a geometria da escada se apresenta muito favorável ao escoamento vertical e a distribuição por duto extremamente difícil pelas dimensões disponíveis de secção transversal, como segue.

#### 2. DADOS GERAIS E DO PROJETO ARQUITETÔNICO.

2.1 Edifício de 20 andares em São Paulo, tipo residencial.

2.2 Pressurização de um estágio.

2.3 Geometria da escada:

Evidenciada no croqui abaixo (escada de 4 lances):

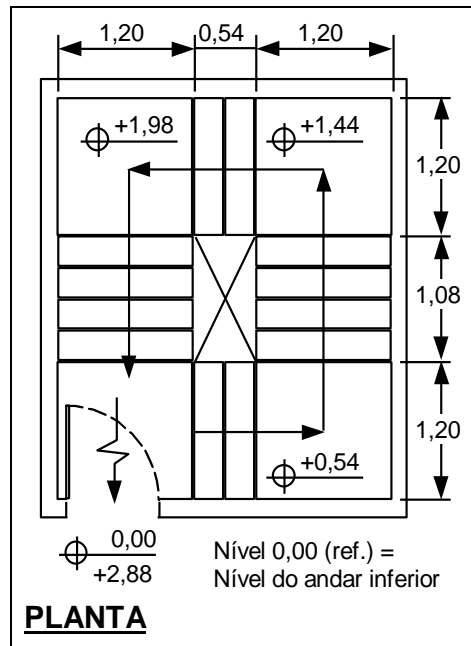


Figura 1

2.4 Casa de máquinas situada no sub-solo.

2.5 Interligação da casa de máquinas com a caixa de escada através de dutos metálicos.

2.6 Conforme acima com relação à interligação da tomada do ar exterior com o pleno de aspiração do ventilador no sub-solo.

### 3. PREMISSAS:

3.1 Portas corta-fogo admitidas fechadas por ação de molas, possibilitando aberturas intermitentes, permanentemente, especialmente no andar térreo por onde será insuflado o ar de pressurização.

3.2 Injeção no andar térreo a 90° ou 180° em relação à abertura da porta de saída.

3.3 Duto de insuflação suposto dimensionado com perda de pressão limitada a 300 Pa no trecho entre o ventilador e a conexão com a caixa de escada.

3.4 Sistema de aspiração, incluindo dutos, veneziana e filtro, suposto dimensionado de modo a limitar a 200Pa, a perda de pressão entre a tomada de ar exterior e o plenum de aspiração do ventilador.

3.5  $\Delta p$  correspondente ao escape das vazões para o exterior, através dos ambientes do prédio, igual a 10Pa.

3.6 Aplicação da IT do Corpo de Bombeiros para efeito de cálculos.

3.7 Consideradas desprezíveis as “perdas de pressão distribuídas” no escoamento vertical do ar na caixa de escada.



#### 4. DETERMINAÇÃO DA VAZÃO TOTAL:

##### 4.1 Para PCF's fechadas (frestas).

Portas de entrada (2° a 20° andar)

$$A = 0,048\text{m}^2 \text{ (conforme IT)}$$

$$Q_{\text{padrão}/\text{porta}} = 0,827 * 0,048 * 50^{1/2} = 0,2807\text{m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q = 19 * 0,2807 = 5,333 \text{ m}^3/\text{s}$$

Porta de saída

$$A = 0,075\text{m}^2 \text{ (conforme IT)}$$

$$Q_{\text{padrão}/\text{porta}} = 0,827 * 0,075 * 50^{1/2} = 0,4386\text{m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_{\text{básica p/PCF's fechadas}} = 5,333 + 0,4386 = 5,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

##### 4.2 Para 2 portas PCF's abertas (térreo e 20° andar).

$$A = 1,652\text{m}^2 \text{ (conforme IT)}$$

$$V = 1 \text{ m/s}$$

$$\therefore Q/\text{porta} = 1,652 \text{ m}^2$$

$$\text{e } Q_{\text{básica}} = 2 * 1,652 = 3,304 \text{ m}^3/\text{s}$$

##### 4.3 Determinação da vazão total para seleção do ventilador.

As vazões adicionais relativas a vazamentos e ao fator de segurança de 1,25 incidentes sobre a vazão básica de PCF's fechadas, acham-se abaixo explicitadas.

- adicional devido a vazamentos no duto de chapa de insuflação  
 $Q_1 = (0,15 * 5,77) * 1,25 = 1,08 \text{ m}^3/\text{s}$
- adicional devido a vazamentos não identificados na caixa de escada (de alvenaria):  
 $Q_2 = (0,35 * 5,77) * 1,25 = 2,52 \text{ m}^3/\text{s}$
- adicional previsto no item 3.77 da IT:  
 $Q_3 = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{PCF}_f}$

Aplicando o fator 1,25 (item 3.7.4b) da IT, tem-se:

$$Q_{\text{PCF}} = 1,25 * 5,77 = 7,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_T = \sum Q_i = 7,21 + 1,08 + 2,52 + 1,0 = 11,81 \text{ m}^3/\text{s}$$

As vazões por porta correspondem portanto a:

$$Q_{\text{PCF}_f} (\text{pav.térreo}) = 1,25 * 0,4386 = 0,548 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{PCF}/\text{porta}} (\text{demais pavimentos}) = 1,25 * 0,2807 = 0,3508 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 5. DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS FLUIDO-DINÂMICAS ENVOLVIDAS.

Descontando a vazão correspondente aos vazamentos admitidos nos dutos metálicos externos à caixa de escada e, de acordo com a Premissa 3.1 a vazão volumétrica (referida ao ar padrão) a ser circulada pela caixa de escada equivale a  $11,81 - 1,08 - 1,0 = 9,73 \text{ m}^3/\text{s}$ .

O desconto de  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  de adicional (item 3.7.7 da IT) na vazão ascendente do ar pela caixa de escada se justifica não só devido à premissa 3.1 (sobre as molas nas portas), mas também porque, no caso, o “piso de descarga” coincide com o piso térreo e o vazamento dar-se-ia antes do início do trajeto ascendente do 1º ao 20º piso.

As resistências envolvidas acham-se abaixo definidas:

### 5.1 $R_{PCF_f}$ (consideradas em paralelo por andar).

Resistência através das portas corta-fogo supostas fechadas (frestas).

- Para o andar térreo (considerado pavimento nº 1):

$$\dot{m}_1 = 0,548 * 1,204 = 0,66 \text{ kg/s}$$

$$R_{PCF_{f1}} = \frac{50}{0,66^2} = 114,78 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

- Para as  $R_{PCF_s}$  dos demais andares, tem-se:

$$\dot{m} = 0,3508 * 1,204 = 0,4223 \text{ kg/s}$$

$$e \ R_{PCF} / \text{porta} = \frac{50}{0,4223^2} = 280,36 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

### 5.2 Resistências $R_v$ correspondentes aos vazamentos não identificados na caixa de escada.

As resistências referidas são consideradas distribuídas por andar (em paralelo) e tem seu valor conforme abaixo expresso:

$$\dot{m} / \text{andar} = \frac{(1,204 * Q_2)}{20} = \frac{(1,204 * 2,52)}{20} = 0,1517 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$e \ R_v = \frac{50}{0,1517^2} = 2172 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

### 5.3 Resistência de insuflação ( $R_i$ ).

$$R_i = \frac{300}{\dot{m}_T^2}$$

$$\dot{m}_T = Q_T * 1,204 = 11,81 * 1,204 = 14,22 \text{ kg/s}$$

$$e \ R_i = 1,4837 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

### 5.4 Resistência na aspiração.

$$R_{asp} = \frac{200}{14,22^2} = 0,9892 \text{ kg}^{-2} \text{ s}^2$$

### 5.5 Resistência de escape ( $R_{esc}$ ).

$$R_{esc} = \frac{10}{14,22^2} = 4,9454E-02 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

### 5.6 Resistência $R_e$ correspondente ao trecho de escada entre andares.

Entre cada andar, considerando o espaço compreendido entre os níveis 0 e + 1,44 como “plenum” associado ao andar N e entre os níveis + 1,44 e + 2,88 como “plenum” associado ao andar N+1, as passagens de um a outro se verificam através de:

- Passagem direta pela abertura da própria escada do plenum N ao plenum N+1.
- Passagem através das aberturas laterais verticais que comunicam o pleno N com o plenum central.
- Passagem através das aberturas laterais verticais opostas às primeiras, do plenum central ao plenum N+1.

As passagens referidas em série e em paralelo estão evidenciadas no croqui abaixo:

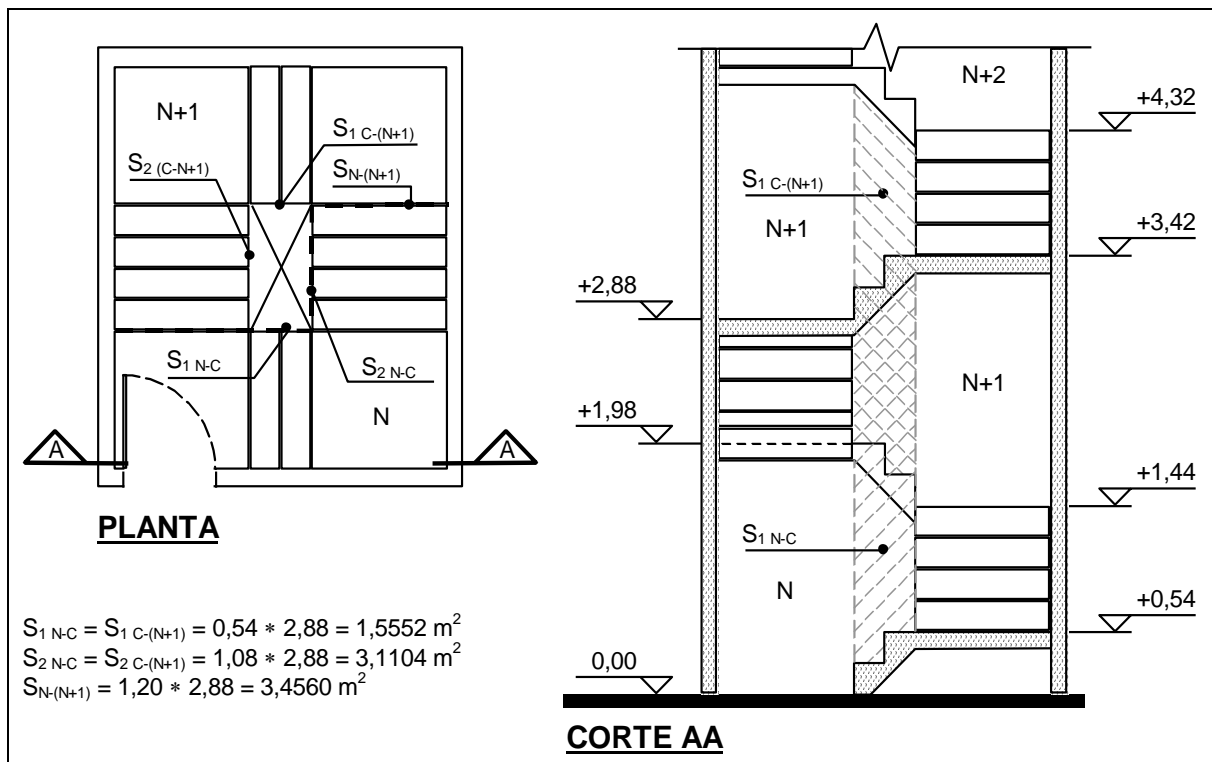


Figura 2

O esquema elétrico equivalente abaixo evidencia as resistências componentes cuja associação permite explicitar  $R_e$ :

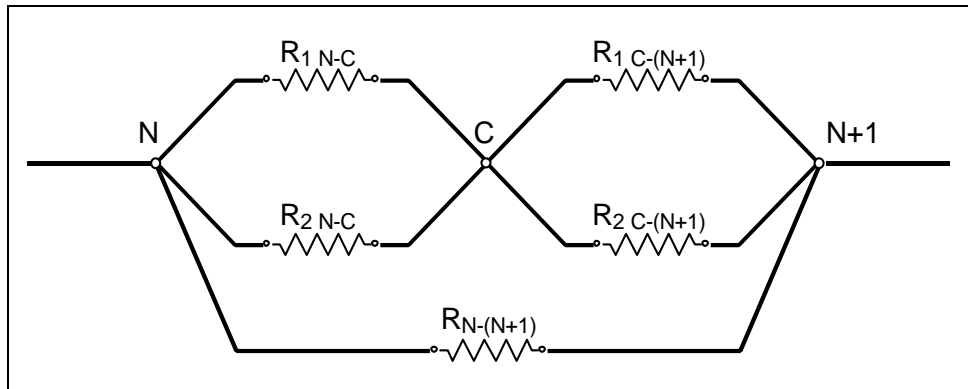


Figura 3

Em se tratando de passagens de “plenum a plenum” o coeficiente de resistência será de 2,74 (conforme Idelcik) e cada resistência se explicita por:

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

com  $\rho$  correspondente às condições da ABNT de verão em São Paulo que se calcula conforme abaixo:

$$V = f(31^\circ\text{C}, 24^\circ\text{C}, 731\text{m}) = 0,966 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\therefore \rho = 0,966^{-1} = 1,034 \text{ kg/m}^3$$

Portanto

$$R_{1N-C} = R_{1C-(N+1)} = \frac{2,74}{2 * 1,552^2 * 1,034} = 0,55 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{2N-C} = R_{2C-(N+1)} = \frac{2,74}{2 * 3,1104^2 * 1,034} = 0,137 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{N-(N+1)} = \frac{2,74}{2 * 3,45^2 * 1,034} = 0,111 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{N-C} = \frac{1}{a_{N-C}^2}$$

com  $a$  = abertura fluido-dinâmica.

$$a_{N-C} = a_{1(N-C)} + a_{2(N-C)} \text{ (associação em paralelo)}$$

$$a_{1(N-C)} = \frac{1}{\sqrt{R_{1(N-C)}}} = \frac{1}{\sqrt{0,55}} = 1,348 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_{2(N-C)} = \frac{1}{\sqrt{R_{2(N-C)}}} = \frac{1}{\sqrt{0,137}} = 2,702 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\therefore a_{N-C} = 1,348 + 2,702 = 4,05 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\therefore R_{N-C} = \frac{1}{4,05^2} = 6,097 \text{ E-02 Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{C-(N+1)} = R_{N-C} \therefore R_{N-C-(N+1)} = 2 * R_{N-C} \text{ (resistências em série)}$$

$$= 2 * 6,097E-02 = 0,1219 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{N-(N+1)} = 0,111 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore a_{N-(N+1)} = \frac{1}{\sqrt{0,111}} = 3,00 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$a_{N-C-(N+1)} = \frac{1}{\sqrt{0,1219}} = 2,864 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore a_e = a_{N-(N+1)} + a_{N-C-(N+1)} \text{ associação em paralelo}$$

$$\therefore a_e = 3 + 2,864 = 5,864 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$e R_e = \frac{1}{a_e^2} = \frac{1}{5,864^2} = 2,907E-02 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

## 6. VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA CAIXA DE ESCADA COMO “DUTO-PLENUM”.

### 6.1 Considerando as PCF's fechadas:

#### 6.1.1 Esquema elétrico equivalente:

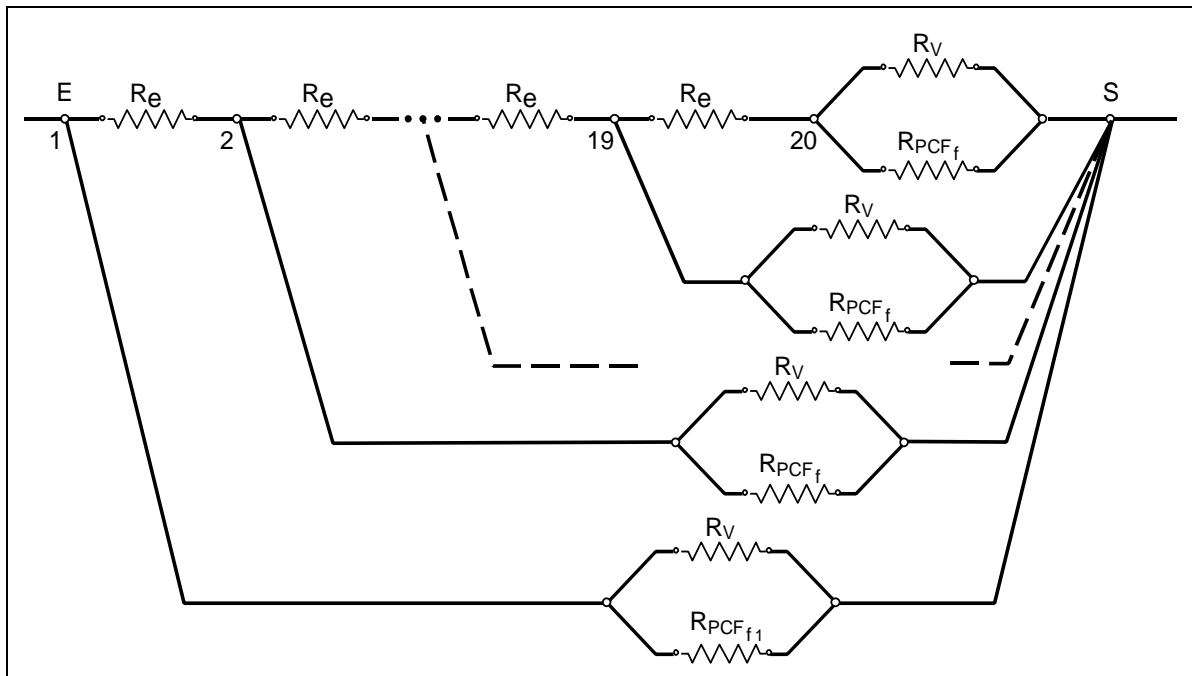


Figura 4

**E** = entrada na caixa de escada

**S** = saída da caixa de escada

### 6.1.2 Determinação de $R_{E-S}$ por composição em série e em paralelo das resistências componentes evidenciadas no esquema acima.

O cálculo foi feito em planilha eletrônica, adiante reproduzido, cujo algoritmo se compõe dos passos abaixo:

Com N variando de 19 a 1.

1º) Determinação de  $R_{N-S} = R_{eq(N+1)-S} + R_e$  associação de resistências em série

$R_{eq(20-S)} = R_{20-S}$  que se obtém por associação em paralelo de  $R_{PCF_f}$  com  $R_v$ .

2º) Determinação de  $a_{N-S} = \frac{1}{\sqrt{R_{N-S}}}$

3º) Determinação de  $a_{eq(N-S)}$

$a_{eq(N-S)} = a_{N-S} + a_v + a_{PCF_f}$  (resistências em paralelo).

4º) Determinação de  $R_{eq(N-S)} = \frac{1}{a_{eq(N-S)}^2}$  (para  $N > 1$ ).

5º) Determinação de  $R_{1-S} = R_{eq(2-S)} + R_e$ .

6º) Determinação de  $a_{eq(1-S)} = a_{(1-S)} + a_v + a_{PCF_{f1}}$ .

7º) Determinação de  $R_{E-S} = R_T = \frac{1}{a_{eq(1-S)}^2}$ .

As resistências e aberturas fluido-dinâmicas dos trechos já determinados acham-se abaixo reproduzidas:

$$R_{PCF_f} = 280,36 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_{PCF_{f1}} = 114,78 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_v = 2172 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$R_e = 2,907E-02 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$a_{PCF_{fchada}} = \frac{1}{\sqrt{R_{PCF_{fch.}}}} = \frac{1}{\sqrt{280,36}} = 5,9723E-02 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_{PCF_{fch.1}} = \frac{1}{\sqrt{R_{PCF_{fch.1}}}} = \frac{1}{\sqrt{114,78}} = 9,3339E-02 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_v = \frac{1}{\sqrt{R_v}} = \frac{1}{2172} = 0,02146 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

A determinação de  $a_{eq(20-S)}$  se obtém conforme abaixo:

$$a_{eq(20-S)} = a_{PCF_{fch.}} + a_v = 5,9723E-02 + 0,02146 = 0,081183 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\therefore R_{eq(20-S)} = \frac{1}{a_{eq(20-S)}^2} = \frac{1}{0,081183^2} = 151,72 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$



$R_e$	$R_{eq(20-S)}$	$a_v$	$a_{PCF_{fechada}}$	$a_{PCF_{fech.1}}$
0,0291	151,72	0,02146	0,05972	0,0933
N - S	$R_{N-S}$	$a_{N-S}$	$a_{eqv.(N-S)}$	$R_{eqv.(N-S)}$
20 - S	151,7200			151,7200
19 - S	151,7491	0,0812	0,1624	37,9348
18 - S	37,9639	0,1623	0,2435	16,8682
17 - S	16,8972	0,2433	0,3245	9,4993
16 - S	9,5284	0,3240	0,4051	6,0923
15 - S	6,1214	0,4042	0,4854	4,2449
14 - S	4,2740	0,4837	0,5649	3,1338
13 - S	3,1629	0,5623	0,6435	2,4151
12 - S	2,4442	0,6396	0,7208	1,9246
11 - S	1,9537	0,7154	0,7966	1,5758
10 - S	1,6049	0,7894	0,8706	1,3195
9 - S	1,3486	0,8611	0,9423	1,1262
8 - S	1,1553	0,9304	1,0116	0,9773
7 - S	1,0064	0,9968	1,0780	0,8605
6 - S	0,8896	1,0603	1,1414	0,7675
5 - S	0,7966	1,1204	1,2016	0,6926
4 - S	0,7217	1,1772	1,2583	0,6315
3 - S	0,6606	1,2303	1,3115	0,5814
2 - S	0,6104	1,2799	1,3611	0,5398
1 - S	0,5689	1,3259	1,4407	0,4818

### 6.1.3 Determinação de $\Delta p_{E-S}$ :

$R_{eq(1-S)} = R_T = R_{E-S} = 0,4818 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$  conforme planilha acima.

Conforme item 5, apoiado na premissa 3.1 a vazão mássica total a ser circulada pela caixa de escada acha-se abaixo explicitada:

$$\dot{m}_T = 9,73 * 1,204 = 11,715 \text{ kg/s}$$

$$\text{e } \Delta p_{E-S} = R_{ES} * \dot{m}^2 = 0,4818 * 11,715^2 = 66,12 \text{ Pa}$$

### 6.1.4 Determinação das vazões mássicas relativas nos trechos e de $\Delta p_{20}$ :

Nos circuitos em paralelo a vazão se distribui na proporção das aberturas fluido-dinâmicas, com  $\dot{m}_T = \dot{m}_{E-S}$ .

De acordo com o esquema elétrico

$$\dot{m}_{1-2} = \frac{a_{1-S}}{a_{eq(1-S)}} * \dot{m}_T \rightarrow \frac{\dot{m}_{1-2}}{\dot{m}_T} = \frac{a_{1-S}}{a_{eq(1-S)}}$$

$$\dot{m}_{2-3} = \frac{a_{2-S}}{a_{eq(2-S)}} * \dot{m}_{1-2} \rightarrow \frac{\dot{m}_{2-3}}{\dot{m}_T} = \frac{a_{2-S}}{a_{eq(2-S)}} * \frac{\dot{m}_{1-2}}{\dot{m}_T}$$

$$\dot{m}_{19-20} = \frac{a_{19-S}}{a_{eq(19-20)}} * \dot{m}_{18-19} \rightarrow \frac{\dot{m}_{19-20}}{\dot{m}_T} = \frac{a_{19-S}}{a_{eq(19-S)}} * \frac{\dot{m}_{18-19}}{\dot{m}_T}$$



Conforme planilha ( $a_{1-S} = 1,3259$  e  $a_{eq(1-S)} = 1,4407$ )

$$\therefore \frac{\dot{m}_{1-2}}{\dot{m}_T} = \frac{1,3259}{1,4407} = 0,9203$$

De uma forma geral

$$\frac{\dot{m}[N-(N+1)]}{\dot{m}_T} = \frac{a_{N-S}}{a_{eq(N-S)}} * \frac{\dot{m}[(N-1)-N]}{\dot{m}_T}$$

$$\therefore \dot{m}[N-(N+1)] = \lambda_N * \dot{m}_T$$

$$p_{T_{20}} - p_{T_S} = \Delta p_{20}$$

$$p_{T_{19}} - p_{T_{20}} = \lambda_{19}^2 * \dot{m}_T^2 * R_e$$

$$\vdots$$

$$p_{T_1} - p_{T_2} = \lambda_1^2 * \dot{m}_T^2 * R_e$$

$$p_{T_1} - p_{T_S} = \Delta p_{20} + \dot{m}_T^2 * \sum \lambda_i^2 * R_e$$

A planilha abaixo permite determinar os parâmetros acima, como segue:

$N-(N+1)$	$\frac{a_{N-S}}{a_{eq(N-S)}}$	$\frac{\dot{m} (N-1)-N}{\dot{m}_T}$	$\lambda_N = \frac{\dot{m} [N-(N+1)]}{\dot{m}_T}$	$\lambda_N^2$
1 - 2	0,92030		0,9203	0,8470
2 - 3	0,94035	0,9203	0,8654	0,7489
3 - 4	0,93810	0,8654	0,8118	0,6591
4 - 5	0,93548	0,8118	0,7595	0,5768
5 - 6	0,93244	0,7595	0,7082	0,5015
6 - 7	0,92888	0,7082	0,6578	0,4327
7 - 8	0,92469	0,6578	0,6082	0,3700
8 - 9	0,91974	0,6082	0,5594	0,3130
9 - 10	0,91385	0,5594	0,5112	0,2614
10 - 11	0,90675	0,5112	0,4636	0,2149
11 - 12	0,89809	0,4636	0,4163	0,1733
12 - 13	0,88737	0,4163	0,3694	0,1365
13 - 14	0,87384	0,3694	0,3228	0,1042
14 - 15	0,85629	0,3228	0,2764	0,0764
15 - 16	0,83274	0,2764	0,2302	0,0530
16 - 17	0,79962	0,2302	0,1841	0,0339
17 - 18	0,74979	0,1841	0,1380	0,0190
18 - 19	0,66657	0,1380	0,0920	0,0085
19 - 20	0,49998	0,0920	0,0460	0,0021
SOMA				<b>5,5320</b>

$$p_{T_1} - p_{T_S} = \Delta p_{E-S} = 66,12 \text{ Pa}$$

$$\dot{m} = 11,715 \text{ kg/s}$$

$$R_e = 0,02907$$

$$\sum \lambda_i^2 = 5,3321$$

$$\therefore \overline{\Delta p_{20}} = 66,12 - 11,715^2 * 5,5321 * 0,02907 = 44,05 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{20-1} = 66,12 - 44,05 = 22,07 \text{ Pa}$$

Torna-se necessário prever damper de alívio no pavimento térreo, de modo a manter os níveis de pressão dentro do intervalo acima, que atende as limitações estipuladas na IT, dentro das margens de tolerância.

### 6.1.5 Equação do sistema

O esquema elétrico equivalente completo, abaixo, permite determinar a equação do sistema como segue:

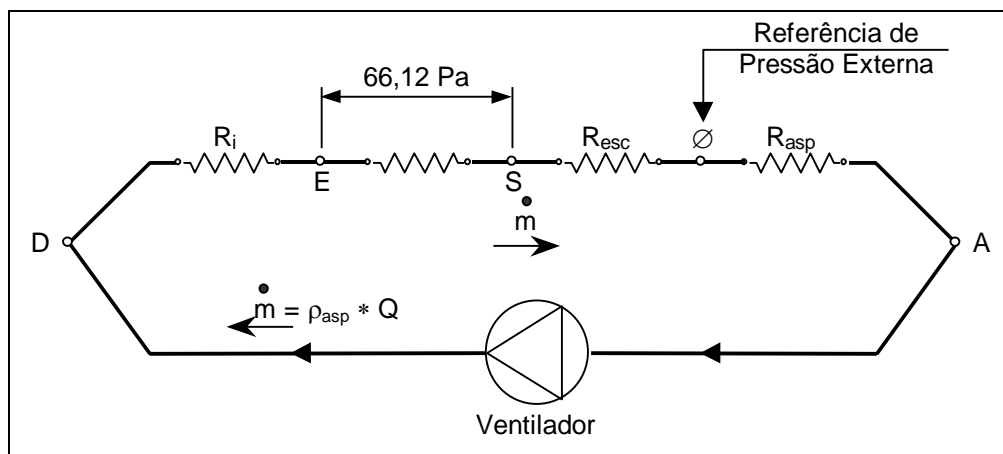


Figura 5

$$p_S = R_{esc} * \dot{m}^2$$

$$p_E = p_S + 66,12$$

$$p_D = p_E + R_i * \dot{m}^2$$

$$p_A = 0 - R_{asp} * \dot{m}^2$$

$$\therefore p_D - p_A = 66,12 + (R_i + R_{esc}) * \dot{m}^2 - (-R_{asp}) * \dot{m}^2 = 66,12 + (R_i + R_{esc} + R_{asp}) * \dot{m}^2$$

$$R_i = 1,4837 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme ítem 5.3)}$$

$$R_{asp} = 0,9892 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme ítem 5.4)}$$

$$R_{esc} = 4,9454E - 02 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme ítem 5.5)}$$

$$\therefore p_D - p_A = 66,12 + 2,5223 * \dot{m}^2 = \Delta p_{SIST_{FECH}}$$

Substituindo  $\dot{m}$  por  $\rho_{asp} * Q$ , tem-se:

$$\dot{m} = \rho_{asp} * \left( \frac{Q}{3600} \right) \text{ para } Q \text{ em } \text{m}^3/\text{h}$$

$$\therefore \Delta p_{sist_{fech}} = 66,12 + 2,5223 * \left[ \rho_{asp} * \left( \frac{Q}{3600} \right) \right]^2$$

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

$$\begin{aligned} \therefore \Delta p_{\text{sist}_{\text{fech}}} &= 66,12 + 2,5223 * \left[ 1,034 * \left( \frac{Q}{3600} \right) \right]^2 = 66,12 + 2,5223 * \left( \frac{1,034}{3600} \right)^2 * Q^2 \\ &= 66,12 + 2,0808 E - 07 * Q^2 \end{aligned}$$

ou seja,

$$\Delta p_{\text{sist}_{\text{fech}}} = 66,12 + 2,0808 E - 07 * Q^2$$

para Q em m<sup>3</sup>/h na aspiração do ventilador e  $\Delta p_{\text{sist}_{\text{fech}}}$  em Pa.

## 6.2 Considerando 2 PCF's abertas e as demais fechadas.

Como a verificação implica na manutenção das PCF's abertas com a velocidade mínima do ar no vão da porta de 1 m/s, a consideração mais desfavorável está obviamente associada à condição da porta de entrada na caixa de escada situa-se no 20º andar, e a de saída no pavimento térreo, que corresponde ao máximo de estratificação de distribuição.

### 6.2.1 Esquema elétrico equivalente.

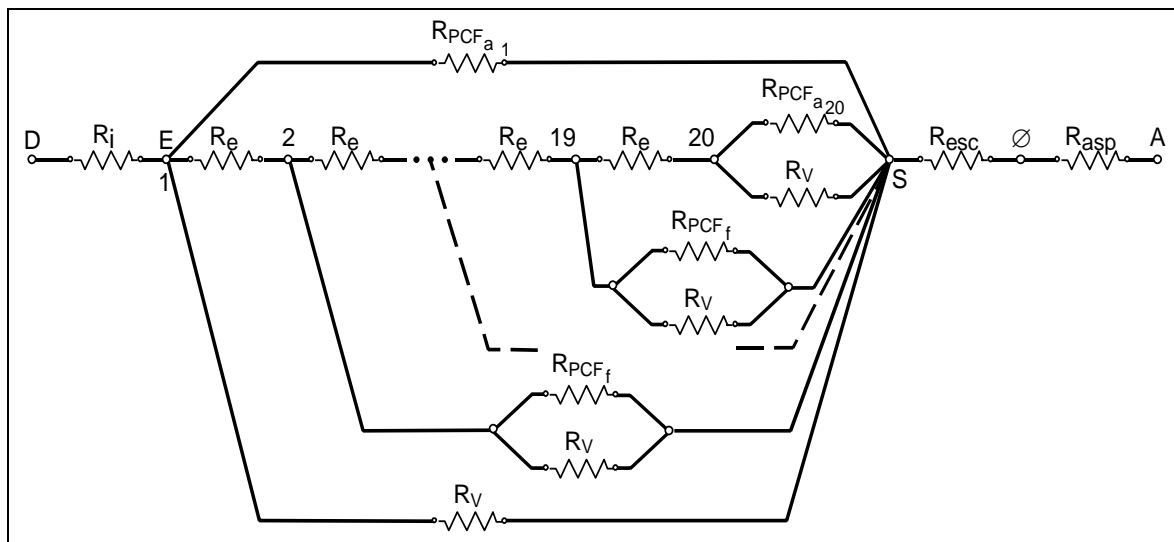


Figura 6

### 6.2.2 Determinação da resistência $R_{E-S}$ .

$$R_{PCF_{a1}} = R_{PCF_{a20}} = \frac{c}{2 * S^2 * \rho}$$

$$c = 2,74 \text{ (Idelcik)}$$

$$S = 1,652 \text{ m}^2 \text{ (IT)}$$

$$\rho = 1,034 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore R_{PCF_{a1}} = R_{PCF_{a20}} = \frac{2,74}{2 * 1,652^2 * 1,034} = 0,4855 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

As demais resistências fluido-dinâmicas já foram determinadas no item 6.1 (PCF's fechadas), uma vez que as mesmas permanecem constantes, independentemente de  $\Delta p$  e  $\dot{m}$ .

O cálculo foi feito em planilha eletrônica, conforme os mesmos passos descritos no item 6.1.2 substituindo nos 1º e 20º pisos  $R_{PCF_{fechada}}$  por  $R_{PCF_{aberta}}$  e está evidenciado na planilha adiante complementada com o cálculo prévio de  $R_{eq(20-S)}$  e  $a_{PCF_a}$  como segue:

$$a_{PCF(a)} = \frac{1}{\sqrt{R_{PCF_a}}} = \frac{1}{\sqrt{0,4855}} = 1,4351 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_v = 0,02146 \text{ (conforme 6.1.2)}$$

$$\therefore a_{eq(20-S)} = 1,4351 + 0,02146 = 1,4566$$

$$e R_{eq(20-S)} = \frac{1}{1,4566^2} = 0,4713 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 = R_{N-S}$$

as demais constantes na 3ª linha da planilha foram copiadas das já determinadas anteriormente.

• **Verificação da caixa de escada como duto-plenum.**

$R_e$	$R_{eq(20-S)}$	$a_v$	$a_{PCF_{fechada}}$	$a_{PCF_{aberta}}$
0,0291	0,4713	0,02146	0,05972	1,4351
N – S	$R_{N-S}$	$a_{N-S}$	$a_{eqv.(N-S)}$	$R_{eqv.(N-S)}$
20 – S	0,4713			0,4713
19 – S	0,5004	1,4137	1,4949	0,4475
18 – S	0,4766	1,4486	1,5297	0,4273
17 – S	0,4564	1,4802	1,5614	0,4102
16 – S	0,4392	1,5089	1,5900	0,3955
15 – S	0,4246	1,5346	1,6158	0,3830
14 – S	0,4121	1,5578	1,6390	0,3723
13 – S	0,4013	1,5785	1,6597	0,3630
12 – S	0,3921	1,5970	1,6782	0,3551
11 – S	0,2842	1,6134	1,6946	0,3482
10 – S	0,3773	1,6280	1,7092	0,3423
9 – S	0,3714	1,6409	1,7221	0,3372
8 – S	0,3663	1,6524	1,7335	0,3328
7 – S	0,3618	1,6624	1,7436	0,3289
6 – S	0,3580	1,6713	1,7525	0,3256
5 – S	0,3547	1,6792	1,7603	0,3227
4 – S	0,3518	1,6860	1,7672	0,3202
3 – S	0,3493	1,6921	1,7733	0,3180
2 – S	0,3471	1,6974	1,7786	0,3161
1 – S	0,3452	1,7020	3,1586	0,1002

### 6.2.3 Determinação das vazões mássicas relativas nos trechos.

Calculadas de forma análoga à descrita no item 6.1.4 ou seja, de uma forma geral.

$$\frac{\dot{m}[N-(N+1)]}{\dot{m}_T} = \frac{a_{N-S}}{a_{eq(N-S)}} * \frac{\dot{m}[(N-1)-N]}{\dot{m}_T}$$

$$e \frac{\dot{m}_{1-2}}{\dot{m}_T} = \frac{a_{1-S}}{a_{eq(1-S)}} = \frac{1,7020}{3,1586} = 0,5388$$

Os resultados acham-se evidenciados na planilha abaixo:

$N-(N+1)$	$\frac{a_{N-S}}{a_{eq(N-S)}}$	$\frac{\dot{m}(N-1)-N}{\dot{m}_T}$	$\lambda_N = \frac{\dot{m}[N-(N+1)]}{\dot{m}_T}$	$\lambda_N^2$
1 - 2	0,5388		0,5388	0,2903
2 - 3	0,9554	0,5388	0,5142	0,2644
3 - 4	0,9542	0,5142	0,4907	0,2408
4 - 5	0,9541	0,4907	0,4681	0,2191
5 - 6	0,9539	0,4681	0,4465	0,1994
6 - 7	0,9537	0,4465	0,4259	0,1813
7 - 8	0,9534	0,4259	0,4060	0,1649
8 - 9	0,9532	0,4060	0,3870	0,1498
9 - 10	0,9529	0,3870	0,3688	0,1360
10 - 11	0,9525	0,3688	0,3512	0,1234
11 - 12	0,9521	0,3512	0,3344	0,1118
12 - 13	0,9516	0,3344	0,3182	0,1013
13 - 14	0,9511	0,3182	0,3027	0,0916
14 - 15	0,9505	0,3027	0,2877	0,0828
15 - 16	0,9498	0,2877	0,2732	0,0747
16 - 17	0,9489	0,2732	0,2593	0,0672
17 - 18	0,9480	0,2593	0,2458	0,0604
18 - 19	0,9469	0,2458	0,2328	0,0542
19 - 20	0,9457	0,2328	0,2201	0,0485
<b>SOMA:</b>				<b>2,6618</b>

$$\frac{\dot{m}_{PCF_{a_1}}}{\dot{m}_T} = \frac{a_{PCF_{a_1}}}{a_{E-S}}$$

$$a_{PCF_{a_1}} = 1,4351 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_{E-S} = a_{eq(1-S)} = 3,1586 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\therefore \frac{\dot{m}_{PCF_{a_1}}}{\dot{m}_T} = \frac{1,4351}{3,1586} = 0,4543$$

$$\frac{\dot{m}_{PCF_{a_{20}}}}{\dot{m}_{19-20}} = \frac{a_{PCF_{a_{20}}}}{a_{eq(20-S)}}$$

$$a_{PCF_{20}} = a_{PCF_1} = 1,4351 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$a_{eq(20-S)} = \frac{1}{\sqrt{R_{eq(20-S)}}} = \frac{1}{\sqrt{0,4713}} = 1,4566 \text{ Pa}^{-0,5} \text{ kg s}^{-1}$$

$$\frac{\dot{m}_{19-20}}{\dot{m}_T} = 0,2201 \text{ (conforme planilha anterior)}$$

$$\therefore \dot{m}_{PCF_{a20}} = 0,2201 * \dot{m}_T * \frac{1,4351}{1,4566} = 0,2201 * 0,9852 * \dot{m}_T = 0,2168 * \dot{m}_T$$

$$\therefore \dot{m}_{PCF_{a1}} = 0,4543 * \dot{m}_{E-S} \text{ e}$$

$$\dot{m}_{PCF_{a20}} = 0,2168 * \dot{m}_{E-S}$$

### 6.2.4 Equação do sistema.

De acordo com esquema elétrico equivalente

$$\Delta p_{sist.a} = (R_i + R_{E-S} + R_{esc} + R_{asp}) * \dot{m}^2 \text{ (resistências em série)}$$

$$R_i = 1,4837 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme item 5.3)}$$

$$R_{asp} = 0,9892 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme item 5.4)}$$

$$R_{esc} = 4,9454E-02 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2 \text{ (conforme item 5.5)}$$

$$R_{E-S} = R_{eq(1-S)} = 0,1002 \text{ Pa kg}^{-2} \text{ s}^2$$

$$\therefore \Delta p_{sist.a} = 2,6225 * \dot{m}^2$$

substituindo  $\dot{m} = \left( \frac{\rho_{asp} * Q}{3600} \right)$  para Q em m<sup>3</sup>/h e Δp em Pa, tem-se:

$$\Delta p_{sist.a} = 2,6225 * \left( \frac{1,034}{3600} \right)^2 * Q^2 = 2,1635E-07 * Q^2$$

$$\boxed{\Delta p_{sist.a} = 2,1635E-07 * Q^2}$$

para Δp em Pa e Q em m<sup>3</sup>/h na aspiração do ventilador.

## 7. INTERAÇÃO DOS SISTEMAS COM VENTILADOR.

### 7.1 Curvas dos sistemas.

Sistema com PCF's fechadas:

$$\Delta p_{sist.fech.} = 66,12 + 2,0808E-07 * Q^2 \text{ (conforme item 6.1.5)}$$

para Δp em Pa e Q em m<sup>3</sup>/h na aspiração do ventilador.

Sistema com PCF's abertas:

$$\Delta p_{sist.abt.} = 2,1635E-07 * Q^2$$

nas mesmas condições acima.

De acordo com item 4.3 a vazão total corresponde a 11,81 m<sup>3</sup>/s na condição padrão ou  $\frac{11,81 \cdot 1,204}{1,034} \cdot 3600 = 49506 \text{ m}^3/\text{h}$  na condição de aspiração do ventilador.

Variando a vazão de 48000 a 52000 m<sup>3</sup>/h obtém-se, aplicando as equações acima, as curvas representadas pela tabela abaixo:

Q (m <sup>3</sup> /h)	$\Delta p_{T_{\text{fech.}}}$ (Pa)	$\Delta p_{T_{\text{abert.}}}$ (Pa)
48000	546	498
49000	566	519
50000	586	541
51000	607	563
52000	629	585

## 7.2 Curva do ventilador.

Para Q = 49506 m<sup>3</sup>/h obtém-se, aplicando-se as equações do sistema:

$$\Delta p_{\text{sist. fech.}} = 576 \text{ Pa e } \Delta p_{\text{sist. ab.}} \cong 530 \text{ Pa}$$

∴ O ponto de operação do ventilador corresponde portanto à 49506 m<sup>3</sup>/h e 576 Pa, e o ponto de seleção a 49506 m<sup>3</sup>/h e  $\frac{576 \cdot 1,204}{1,034} = 671 \text{ Pa}$  de pressão total

$$S_{\text{desc}} = 1,214 \text{ m}^2 \text{ (ventilador Higrotec 2001 DIDW tamanho 900)}$$

$$V_{\text{desc}} = \frac{\left(\frac{49506}{3600}\right)}{1,214} = 11,32 \text{ m/s}$$

$$p_{\text{d desc}} = 77,23 \text{ Pa (na condição padrão)}$$

$$\therefore p_{\text{est}} = 671 - 77,23 = 594 \text{ Pa (60,5 mmca)}$$

O ventilador nestas condições corresponde a 922 rpm cuja curva para as condições reais de operação em pressões totais obtém-se conforme tabela abaixo, onde:

$$V_{\text{desc}} = \frac{\left(\frac{Q}{3600}\right)}{S_{\text{desc.}}}$$

$$p_{\text{d desc.}} (\text{padrão}) = \frac{V_{\text{desc}}^2 \cdot 1,204}{2}$$

$$p_t (\text{padrão}) - p_{\text{est}} \cdot 9,81 + p_{\text{d desc}} \text{ (para } p_{\text{est}} \text{ em mmca)}$$

$$p_t (\text{real}) = p_t (\text{padrão}) \cdot \frac{1,034}{1,204}$$

$$\eta_t = \eta_{\text{est.}} \cdot \frac{p_t (\text{padrão})}{p_{\text{est}} (\text{padrão})}$$



Q (m <sup>3</sup> /h)	P <sub>est.</sub>		η <sub>est</sub> (%)	V <sub>desc.</sub> (m/s)	P <sub>d<sub>desc.</sub></sub> (Pa)	P <sub>t<sub>padrão</sub></sub> (Pa)	P <sub>t<sub>real</sub></sub> (Pa)	η <sub>t</sub> (%)
	mmca	Pa						
48000	66,0	647	77	10,98	72,6	720	618	85
49000	63,0	617	75	11,21	75,7	692	595	84
50000	59,0	579	73	11,44	78,7	657	565	83
51000	56,0	549	70	11,66	81,9	631	542	80
52000	50,0	490	68	11,89	85,2	578	494	78

### 7.3 Pontos de operação dos sistemas com o ventilador.

Evidenciado no gráfico abaixo:

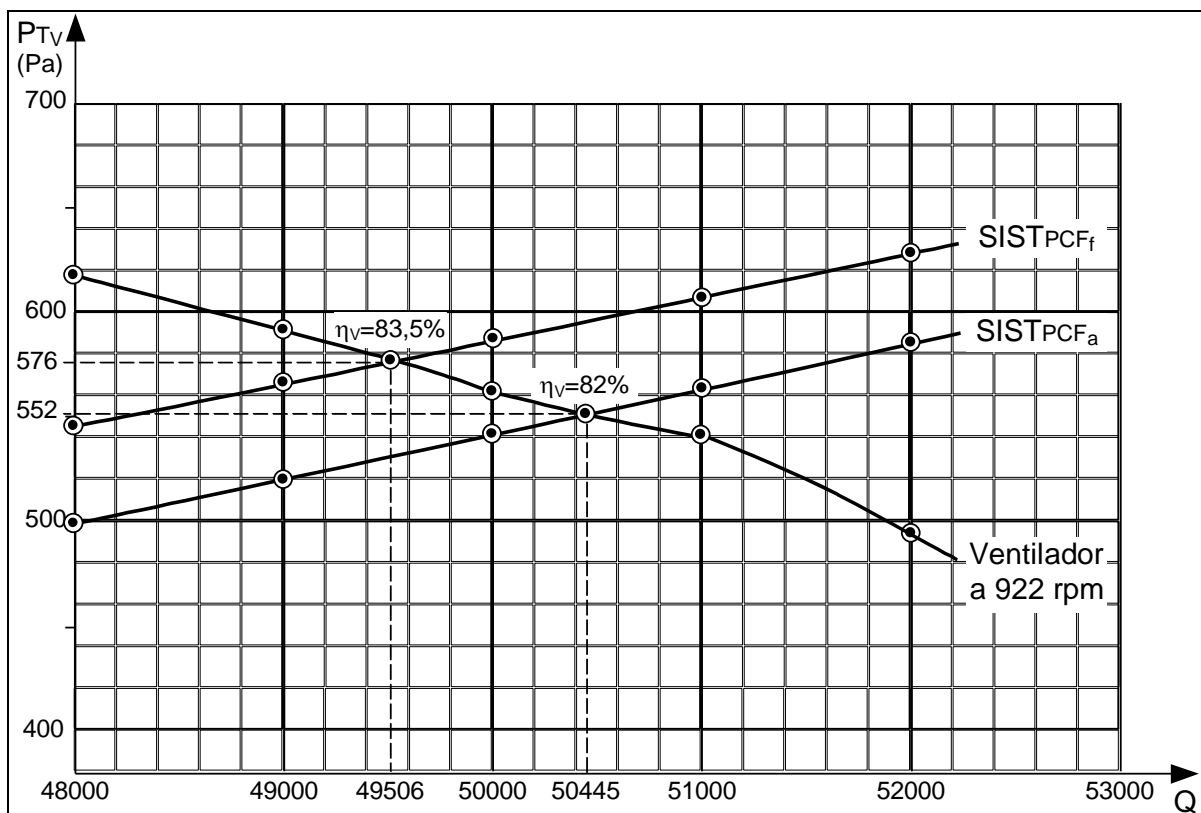


Figura 7

## 8. DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DO AR ATRAVÉS DAS PCF<sub>a1</sub> E PCF<sub>a20</sub>.

$$Q = 50445 \text{ m}^3/\text{h} = 14,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m}_T = 14,01 \cdot 1,034 = 14,48 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{e_{escada}} = 14,48 - 1,08 - 1,0 = 12,40 \text{ kg/s} = \dot{m}_{E-S}$$

Conforme item 6.2.3

$$\dot{m}_{PCF_{a1}} = 0,4543 \cdot \dot{m}_{E-S} = 0,4543 \cdot 12,40 = 5,63 \text{ kg/s}$$



$$V_{\text{padrão}} = \frac{5,63}{1,204 * 1,652} = 2,83 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{\text{PCF}_{a20}} = 0,2168 * \dot{m}_{\text{E-S}} = 0,2168 * 12,4 = 2,69 \text{ kg/s}$$

$$V_{\text{padrão}} = \frac{2,69}{1,204 * 1,652} = 1,35 \text{ m/s}$$

Portanto as velocidades referidas ao ar padrão, satisfazem a limitação de 1 m/s estipulada na IT.

## 9. DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA REQUERIDA PELOS SISTEMAS INTERADOS COM O VENTILADOR.

### 9.1 Para a condição de PCF's fechadas.

$$p_{oT} = \frac{Q * \Delta p_T}{\eta_T}$$
$$\therefore p_{oT} = \frac{\left(\frac{49506}{3600}\right) * 576}{0,835} = 9486\text{W} = 9,49 \text{ kW} = 12,88 \text{ CV efetivos}$$

### 9.2 Para a condição de PCF's abertas.

$$p_{oT} = \frac{\left(\frac{50445}{3600}\right) * 552}{0,82} = 9432 = 9,43 \text{ kW} = 12,81 \text{ CV efetivos}$$

$\therefore$  motor acoplado de 15 CV atende a ambas as condições.

### OBS. FINAIS:

1. Praticamente, no caso particular presente, as limitações impostas pela IT do Corpo de Bombeiros estariam atendidas dentro das margens de tolerância.
2. Se o número de andares fosse menor e a vazão básica fosse correspondente à duas PCF's abertas, as resistências das PCF's fechadas e dos vazamentos não identificados da caixa de escada devem referir-se à situação de PCF's fechadas, e aplicadas na composição da resistência total associada à situação de 2 portas abertas para a constatação do atendimento às velocidades mínimas através das mesmas ou acréscimo da vazão  $\dot{m}_{\text{E-S}}$  se for necessário.

Aplicando todos os acréscimos associados a PCF's fechadas, somente as equações dos sistemas poderão decidir sobre as condições de operação do ventilador, a fim de atender às 2 situações definidas dentro das limitações impostas.

### Referências:

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



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

**BRASIL**

**Nota:**

O assunto tratado neste SmacPaper foi também 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, sendo 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**