

Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica



PEF 3522 – Ação do Vento nas Edificações

RELATÓRIO

Professores:

Henrique Campelo Gomes,
Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

Alexandre Joseph TOKKA - 10462190
Antoine Nicolas MICHEL - 10462206

São Paulo, 2018

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer os Professores Henrique e Ruy por ter dado esse curso prático com uma variedade de abordagens. Agradecemos também a Paola por ter tomado tempo para nos ensinar a usar ANSYS e a equipe do IPT por ter nos dado a possibilidade de ter acesso ao túnel de vento.

Sumário

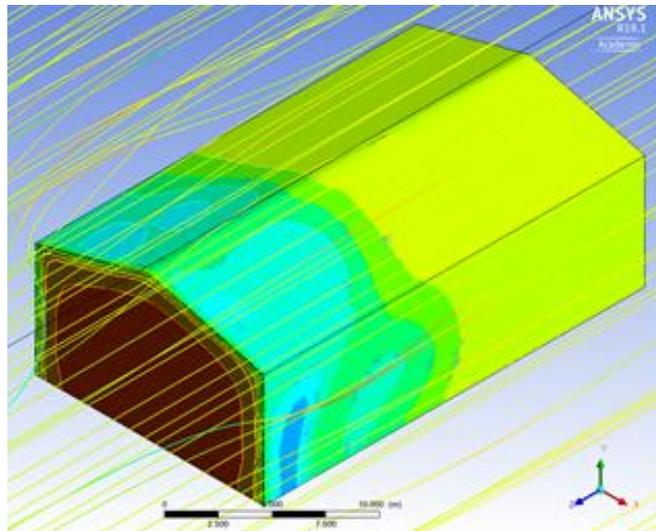
Sumário	1
Introdução	3
Apresentação geral do problema	4
Geometria da estrutura	4
Previsões pela Norma NBR6123	4
Pressão dinâmica	4
Coeficientes de pressão e de forma externo	5
Esquema resumo dos coeficientes de pressão	8
O modelo físico: a maquete	9
O modelo numérico	10
Resultados numéricos e experimentais	11
Vento de 0°	11
Vento de 90°	15
Conclusão	18
Anexo: Parâmetros utilizados para ANSYS	20

Introdução

Para concluir a matéria Ação do vento nas edificações, foi realizado um estudo da ação do vento sobre uma pequena estrutura (no máximo de 22,5 m x 25 m x 10 m).

O estudo se divide em duas atividades principais: primeiro, a realização de uma maquete com uma escala 1/100 do edifício, essa maquete foi usada para uma simulação num túnel de vento no IPT. Numa segunda fase, esse edifício foi reproduzido numericamente e analisado com o software ANSYS.

Após apresentar os dois modelos, serão comparados, numa segunda parte do relatório, os resultados da norma brasileira com os resultados experimentais e numéricos.



1. Apresentação geral do problema

1.1. Geometria da estrutura

A geometria do nosso modelo, com escala 1/100, é:

- comprimento $L = 25 \text{ cm}$,
- largura $a = 15 \text{ cm}$,
- altura $h = 7,5 \text{ cm}$ (sem o teto),
- ângulo do teto $\alpha = 15^\circ$.
- Consequentemente, a altura total da estrutura $H = h + \frac{a}{2 \cdot \cos(\alpha)} = 7,8 \text{ cm}$.

1.2. Previsões pela Norma NBR6123

Com base na norma brasileira NBR6123 e nas dimensões precedentes apresentadas, podemos estimar a pressão, os coeficientes de pressão e os coeficientes de forma.

1.2.1. Pressão dinâmica

O primeiro passo corresponde à determinação da pressão dinâmica q . Sabe-se que $q = \frac{1}{2} * \rho * V_k^2$ com $\frac{1}{2} * \rho = 0,613 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ segundo a NBR6123. Falta então a determinação de:

$$V_k = S1 * S2 * S3 * V_0.$$

Primeiramente, V_0 é a velocidade básica do vento e é definida de acordo com o lugar de estudo. Temos aqui $V_0 = 45 \text{ m/s}$.

Vemos agora os diferentes fatores que intervêm:

$S1$ é o fator de topografia. Aqui a topografia é regular e então $S1 = 1,0$.

$S2$ é o fator de rugosidade de terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno. $S2 = b * Fr * (z/10)^p$ sendo b e p obtidos com a tabela adjacente. Nos casos onde o fator de rajada Fr não é definido, toma-se o valor da categoria II classe A, ou seja $Fr = 1,00$.

Categ.	z_g (m)	Param.	Classes		
			A	B	C
I	25	b	1,10	1,11	1,12
	0	p	0,06	0,065	0,07
II	30	b	1,00	1,00	1,00
	0	Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	35	b	0,94	0,94	0,93
	0	p	0,10	0,105	0,115
IV	42	b	0,86	0,85	0,84
	0	p	0,12	0,125	0,135
V	50	b	0,74	0,73	0,71
	0	p	0,15	0,16	0,175

Como a edificação está num terreno aberto sem obstáculo, a rugosidade é de categoria I. Para a seguida, a obtenção da classe, temos agora que distinguir a estrutura das vedações.

Para a *estrutura*, a dimensão máxima é $L = 25 \text{ m}$ e pertence então à *classe B*, enquanto as *vedações* pertencem à *classe A*.

Para a altura sobre o terreno, considera-se o topo da edificação. Isso é sempre o caso para as vedações, e é também o caso da nossa estrutura porque ela é baixa. Como foi considerada uma inclinação de $\theta = 15^\circ$ para o nosso grupo, temos então $H = h + \frac{a}{2 \cdot \cos(\alpha)} = 7,8 \text{ m}$. Temos então:

- $S2[\text{estrutura}] = 1,09$
- $S2[\text{vedações}] = 1,10$

$S3$ é o fator probabilístico. A nossa estrutura foi julgada pertencer ao grupo 2 e adota-se então $S3[\text{estrutura}] = 1,00$. Temos aliás $S3[\text{vedações}] = 0,88$.

Concluimos então escrevendo que:

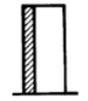
- $Vk[\text{estrutura}] = 49,5 \text{ m/s}$
- $Vk[\text{vedações}] = 43,2 \text{ m/s}$
- $q[\text{estrutura}] = 1502 \text{ Pa}$
- $q[\text{vedações}] = 1144 \text{ Pa}$

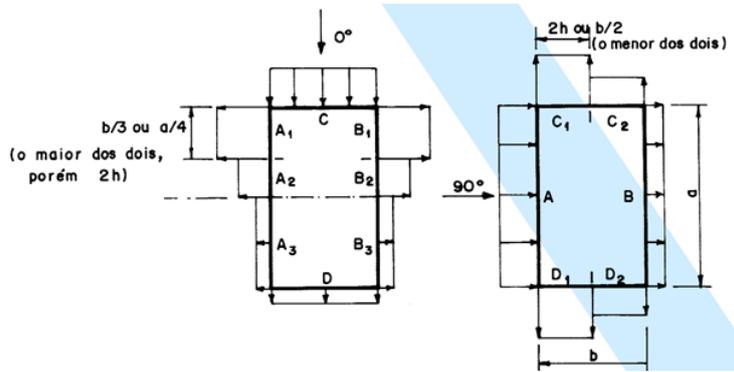
1.2.2. Coeficientes de pressão e de forma externo

Neste segundo item, procuramos os coeficientes de pressão e de forma externo na edificação. Serão considerados aqui separadamente as paredes e o telhado.

- Paredes

Usamos aqui a tabela 4 da NBR6123 apresentada abaixo e que é adaptada a o nosso caso de estudo:

Altura relativa		Valores de C_{pe} para								C_{pe} médio
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 $0,2 b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2



Já sabemos que a altura relativa $h/b = 7,5/15 = 0,50 \leq \frac{1}{2}$ e que temos para as proporções em planta, notando a (resp. b) a dimensão maior (resp. menor) em planta:

$a/b = 25/15 = 1,67 \in [1,5;2]$, $15/3 = 5$ e $25/4 = 6,25$. Dados que estamos entre duas situações precisamos interpolar os resultados da tabela anterior. Estamos então no caso de $C_{pe} = -0,96$.

Precisamos agora fazer a distinção segundo a direção do vento para obter os valores de C_{pe} procurados para as paredes. Colocaremos aqui as mesmas figuras do que no artigo pois não houve mudanças.

Para o caso $\alpha = 0^\circ$, ou seja o caso do vento perpendicular a face de menor dimensão da edificação, os valores são:

Face	Largura	C_{pe}
A1 (e B1)	$\max(b/3;a/4) = 6,25$ m	-0,80
A2 (e B2)	$\max(b/3;a/4) = 6,25$ m	-0,56
A3 (e B3)	$2*\max(b/3;a/4) = 12,5$ m	-0,28
C	15 m	+0,70
D	15 m	-0,36

O caso $\alpha = 90^\circ$ trata-se de maneira semelhante:

Face	Largura	C_{pe}
A	25	+0,70
B	25	-0,46
C1 (e D1)	$\min(b/2,2*h) = b/2 = 7,5$	-0,86
C2 (e D2)	$\min(b/2,2*h) = b/2 = 7,5$	-0,46

- Telhado

Nesta parte usa-se a tabela 5 da NBR6125 apresentada abaixo:

Altura relativa	θ	Valores de C_p para				C_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ$ (V)		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4	-1,2	-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1	
	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8					
	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7					
60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7					

DETALHE I

Notas: a) O coeficiente de forma C_p na face inferior do beiral é igual à da parede correspondente.
b) Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminés, reservatórios, torres, etc.), deve ser considerado um coeficiente de forma $C_p = 1,2$, até uma distância igual à metade da dimensão da diagonal da saliência vista em planta.
c) Na cobertura de lanternins, C_{pe} médio = - 2,0.
d) Para vento a 0° , nas partes I e J o coeficiente de forma C_p tem os seguintes valores:
 $a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H; $a/b \geq 2$: $C_p = - 0,2$.
Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b .

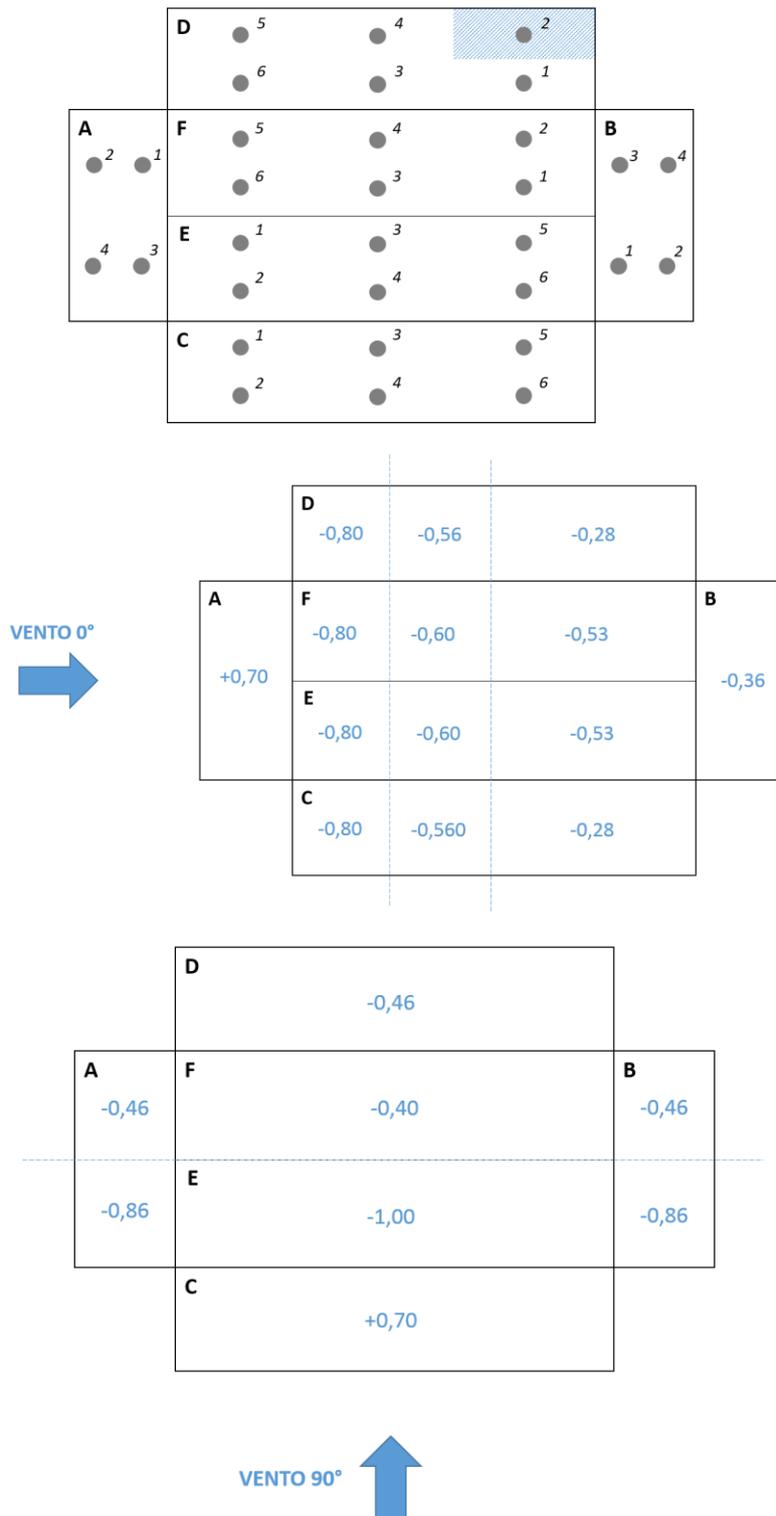
Por razões de simetria, somente a zona EF será detalhada. Nesta parte não fazemos a distinção dual entre um vento com $\alpha = 0^\circ$ ou 90° pois consideramos que o vento será oblíquo. Trabalharemos então com os coeficientes de pressão médios. (Vento 90° : $C_{pe} = -1,0$ e Vento 0° : $C_{pe} = -0,8$)

Começamos com as dimensões que vão entrar em conta. O comprimento de E é $\max(b/3; a/4) = a/4$ e é então o comprimento de F também. Temos também $y = \min(h; 0,15b) = 0,15b$. Temos:

Zonas				
Cpe	-1,4	-1,2	0	-1,2

1.2.3. Esquema resumo dos coeficientes de pressão

As figuras a seguir apresentam as tomadas e os coeficiente de pressão em função da orientação do vento. Os esquemas representam a maquete vista de acima com as paredes rebatidos.

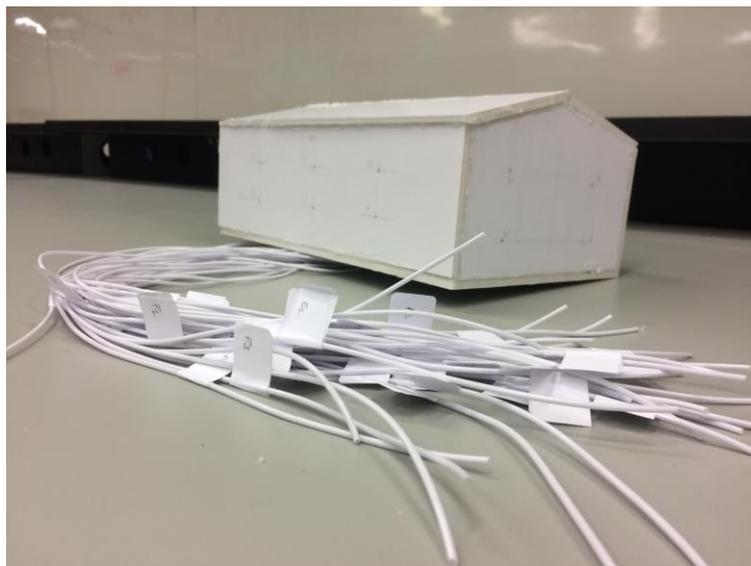


1.3. O modelo físico: a maquete

Para a construção da maquete foi utilizado um material plástico de espessura mais ou menos 0,5 cm. Essa espessura foi considerada na construção da maquete de tal maneira que todas as dimensões exteriores respeitem os valores do parágrafo anterior. Esse problema não acontece no modelo numérico já que cada parede é modelada como infinitamente fina.

Essa escala (1/100) foi escolhida conforme ao tamanho do túnel de vento, o menor túnel de vento disponível podendo receber maquete inferiores a 300 mm.

32 tomadas foram instaladas na superfície em contato com o vento: 6 para as faces mais compridas, 6 para cada porção de teto e 4 nas duas últimas faces. Cada tomada foi nomeada para facilitar a exploração dos resultados.



Os valores obtidos pela experiência corresponde, para cada tomada, a diferença de pressão ΔP_e . Para obter o coeficiente de pressão, precisamos dividi-la pela pressão dinâmica: $C_{pe} = \Delta P_e / q^*$.

A pressão dinâmica experimental q^* é dada em função da velocidade medida no topo do túnel de vento. Por consequência, essa velocidade é bem diferente da velocidade no topo da nossa maquete, e consequentemente q^* também. Para determinar q^* (*topo maquete*) temos a fórmula apresentada na seguida. Essa fórmula foi obtida por regressão linear. Ela é função da altura H (em mm) da maquete e de $q = 102,9$ Pa a pressão medida no topo do túnel.

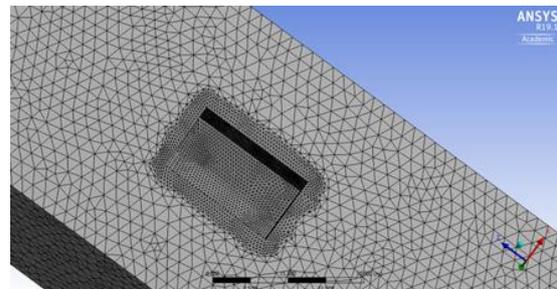
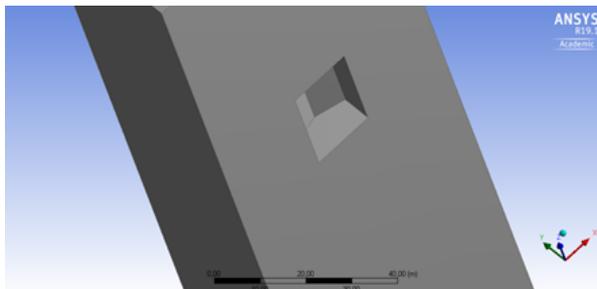
$$q^* = f * q = 0,0186 * H^{0,569} * q = 22,83 \text{ Pa}$$



1.4. O modelo numérico

O modelo numérico foi realizado com o software ANSYS. Duas situações foram estudadas: um vento na longitudinal da estrutura e um na transversal.

Numericamente, o escopo de estudo é uma caixa que contém o vento com uma descontinuidade que corresponde à forma da estrutura, como mostrado na imagem abaixo.



As dimensões dessa “caixa de vento” dependem diretamente das dimensões da casa. Para um vento na longitudinal, considerando o edifício como o ponto central de referência, o comprimento da caixa deve ser da ordem de 10 vezes o comprimento do edifício ($10*L$), $3*L$ na frente do edifício e $6*L$ atrás. Essas dimensões permitem limitar os efeitos de borda e ter um espaço adequado para estudar os fenômenos físicos. De fatos, antes de chegar no edifício, o vento vai ter linha de correntes paralela e organizadas, mas após o vento vai ter um comportamento perturbado pela casa sobre uma certa distância, daí vem o $6*L$. Na transversal foi escolhido $4*a$ e, igualmente para a altura, $4*H$.

No caso do vento de 90° , na transversal, o mesmo processo foi efetuado invertendo as grandezas “L” e “a”.

O programa ANSYS permite um refinamento da malha nos locais de interesses, ou seja nesse caso o edifício. Isso permite uma melhor precisão nos resultados sem aumentar radicalmente o tempo de cálculo.

2. Resultados numéricos e experimentais

2.1. Vento de 0°

Esses primeiros resultados correspondem a um vento cuja direcção é paralela ao eixo longitudinal do edifício. Aqui, o vento entra perpendicularmente à face A. A numeração das tomadas fica igual ao que foi apresentado anteriormente.

Devido a problemas com o software, valores de pressões coerentes mas coeficientes de pressão inexplicavelmente altos, foi decidido calcular os coeficientes para cada furo com os dados de pressão fornecido pelo ANSYS. Assim, temos :

$$C_{pe} = \Delta Pe/q \text{ com } q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 = 1,240 \cdot 10^3 \text{ Pa.}$$

O vento inicial v_0 é igual a 45 m/s.

Os resultados em termos de pressões com o software são os seguintes:

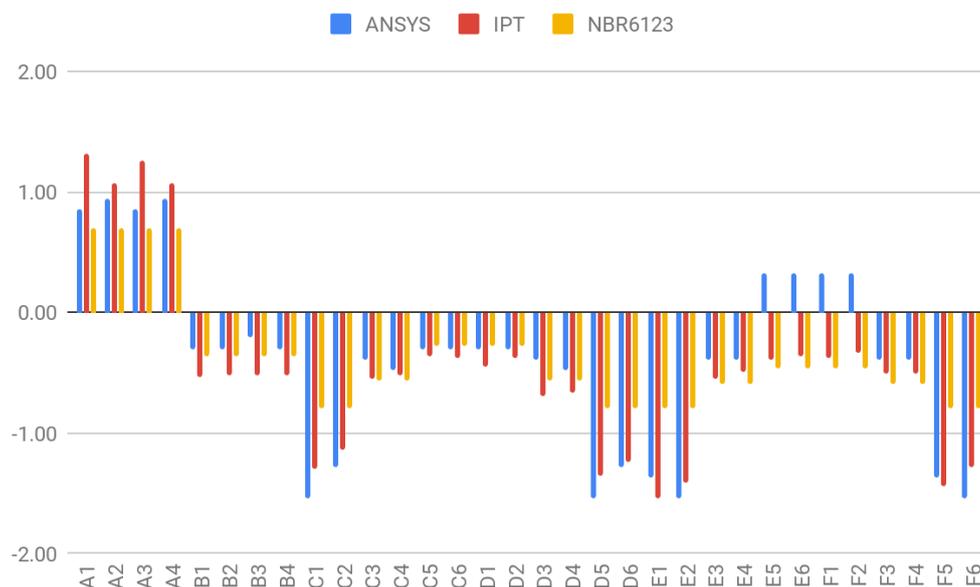
Tomada i	Pressão
	ANSYS
	Pa
A1	1.059,00
A2	1.169,00
A3	1.059,00
A4	1.169,00
B1	-373,40
B2	-373,40
B3	-263,20
B4	-373,40
C1	-1.916,00
C2	-1.585,00
C3	-483,60
C4	-593,80
C5	-373,40
C6	-373,40
D1	-373,40
D2	-373,40
D3	-483,60
D4	-593,80
D5	-1.916,00
D6	-1.585,00
E1	-1.696,00

E2	-1.916,00
E3	-483,60
E4	-483,60
E5	398,00
E6	398,00
F1	398,00
F2	398,00
F3	-483,60
F4	-483,60
F5	-1.696,00
F6	-1.916,00

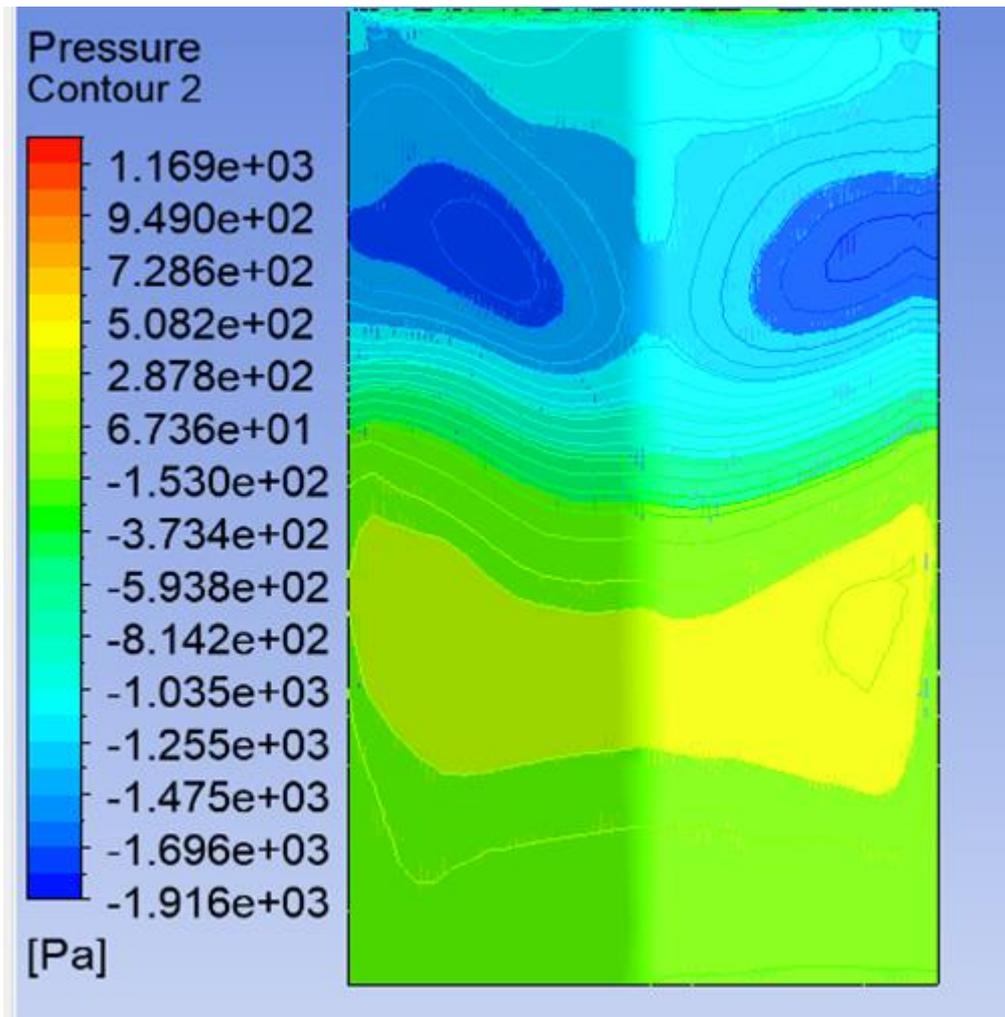
Nota: Nesta tabela, os valores de pressões indicados correspondem aos valores de pressões efetivas $\Delta Pe = P_{ef}$.

Podemos então passar agora aos resultados em termos dos coeficientes de pressão.

Temos os resultados para os coeficientes de pressão apresentados no gráfico e na tabela a seguir para cada tomada e método de cálculo.



Nota-se já com o gráfico que, de um modo geral, os métodos são coerentes, ou seja, a exceção dum zona no teto, as zonas de sucção e de sobrepressão são idênticas e com uma evolução similar nas faces do edifício testado. Uma diferença notável ocorre para as tomadas E5 e E6 (e por simetria F1 e F2). De fato, a diferença dos outros métodos, obtemos uma sobrepressão nesta zona com o modelo numérico, conforme a figura das pressões a seguir. Não obstante, de uma maneira geral, esta proximidade, qualitativamente, tende a validar os diferentes métodos empregados.



Os outros métodos consideram então uma sucção sobre toda a zona do teto, enquanto de acordo com o modelo numérico, passando esta primeira de sucção no teto, o fenómeno tende a se inverter depois da segunda metade (na longitudinal).

A tabela a seguir apresenta os resultados numéricos e experimentais. Mostra-se então de maneira mais precisa desta vez as diferenças entre os valores obtidos, ou seja de maneira mais quantitativa. Vê-se que os erros relativos entre os métodos são bastante importantes.

Tomada i	C _{pe}			Erro ANSYS/IPT	Erro ANSYS/NBR	Erro IPT/NBR
	ANSYS	IPT	NBR6123			
A1	0.85	1.32	0.70	35.07%	18.04%	46.78%
A2	0.94	1.07	0.70	11.86%	25.75%	34.55%
A3	0.85	1.26	0.70	32.39%	18.04%	44.58%
A4	0.94	1.07	0.70	11.53%	25.75%	34.31%
B1	-0.30	-0.54	-0.36	43.78%	16.35%	32.79%
B2	-0.30	-0.52	-0.36	42.32%	16.35%	31.05%
B3	-0.21	-0.53	-0.36	59.68%	41.04%	31.62%
B4	-0.30	-0.52	-0.36	41.69%	16.35%	30.29%
C1	-1.55	-1.29	-0.80	16.38%	48.23%	38.08%
C2	-1.28	-1.15	-0.80	10.39%	37.41%	30.15%
C3	-0.39	-0.55	-0.56	29.16%	30.36%	1.69%
C4	-0.48	-0.52	-0.56	7.03%	14.49%	8.02%
C5	-0.30	-0.37	-0.28	17.96%	7.02%	23.71%
C6	-0.30	-0.37	-0.28	18.83%	7.02%	24.52%
D1	-0.30	-0.44	-0.28	32.20%	7.02%	36.96%
D2	-0.30	-0.38	-0.28	21.70%	7.02%	27.19%
D3	-0.39	-0.69	-0.56	43.61%	30.36%	19.03%
D4	-0.48	-0.66	-0.56	27.55%	14.49%	15.27%
D5	-1.55	-1.35	-0.80	12.58%	48.23%	40.77%
D6	-1.28	-1.24	-0.80	3.10%	37.41%	35.41%
E1	-1.37	-1.55	-0.80	11.51%	41.51%	48.24%
E2	-1.55	-1.41	-0.80	9.07%	48.23%	43.06%
E3	-0.39	-0.56	-0.60	29.78%	35.00%	7.44%
E4	-0.39	-0.49	-0.60	20.07%	35.00%	18.68%
E5	0.32	-0.40	-0.47	18.85%	31.71%	15.85%
E6	0.32	-0.36	-0.47	12.03%	31.71%	22.37%
F1	0.32	-0.37	-0.47	13.58%	31.71%	20.97%
F2	0.32	-0.33	-0.47	4.08%	31.71%	28.80%
F3	-0.39	-0.51	-0.60	22.77%	35.00%	15.83%
F4	-0.39	-0.51	-0.60	23.96%	35.00%	14.52%
F5	-1.37	-1.44	-0.80	5.14%	41.51%	44.52%
F6	-1.55	-1.28	-0.80	17.40%	48.23%	37.32%
				29.55%	42.23%	20.70%

Enfatizamos já agora que cada método empregado teve suas hipóteses e simplificações, ou que pode explicar as diferenças quantitativas. Primeiro, a NBR propôs uma obtenção do coeficiente de pressão mais grosseiro dado que é definido para uma face do edifício e não a escala de um ponto, o

que teria sido preferível neste estudo onde compara-se valores em pontos particulares. Em segundo, no modelo numérico, os resultados são lidos graficamente com uma incerteza a respeito da posição das tomadas na maquete e o volume de controle pode ter uma influência também. Enfim, a maquete apresenta as imprecisões inevitáveis de um modelo real construído, além das obstruções presentes no túnel para representar a vizinhança mas que, no nosso caso, foram relativamente demasiadas altas em comparação à altura da nossa maquete.

Num objetivo de validar a coerência dos resultados numéricos da pressão, foi realizado um teste com um vento v_1 igual a 22,5 m/s. Dado que a pressão efetiva é proporcional à velocidade ao quadrado, espera-se então uma redução desta última por quatro. A tabela abaixo permitiu confirmar esta regra.

Vento	0	
Tomada i	Vento (m/s)	
	45	22,5
Pressão (Pa)		
A1	1059	245,6
A2	1169	280,2
A3	1059	245,6
A4	1169	280,2

2.2. Vento de 90°

Os resultados em termos de pressões com o software são os seguintes:

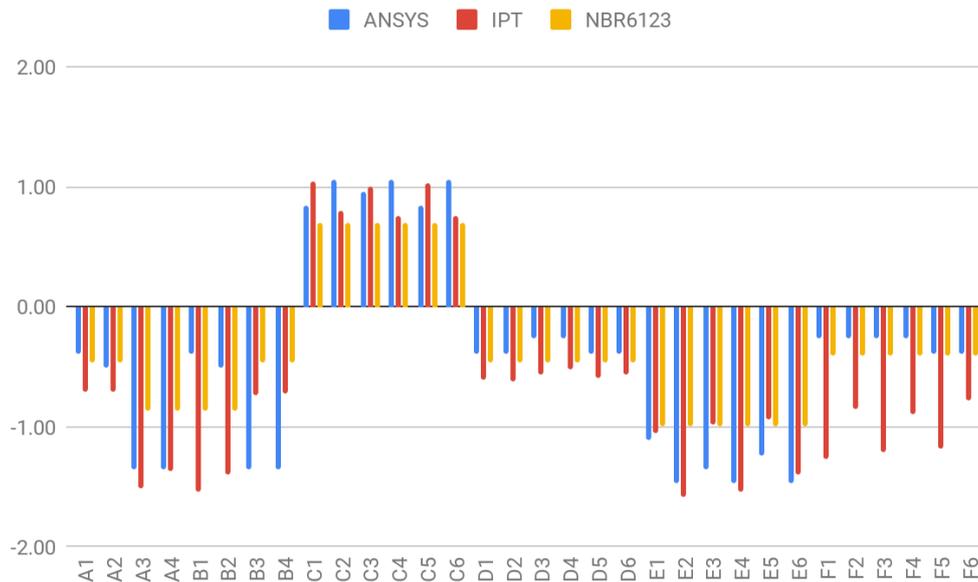
Tomada i	Pressão
	ANSYS
<i>Pa</i>	
A1	-482,00
A2	-631,70
A3	-1.679,00
A4	-1.679,00
B1	-482,00
B2	-631,70
B3	-1.679,00
B4	-1.679,00
C1	1.051,00
C2	1.315,00
C3	1.183,00

C4	1.315,00
C5	1.051,00
C6	1.315,00
D1	-482,30
D2	-482,30
D3	-332,60
D4	-332,60
D5	-482,30
D6	-482,30
E1	-1.380,00
E2	-1.829,00
E3	-1.679,00
E4	-1.829,00
E5	-1.530,00
E6	-1.829,00
F1	-332,30
F2	-332,30
F3	-332,30
F4	-332,30
F5	-482,00
F6	-482,00

Nota: Nesta tabela, os valores de pressão indicados correspondem aos valores de pressão efetivas $\Delta Pe = P_{ef}$.

Podemos então passar agora aos resultados em termos dos coeficientes de pressão.

Esses primeiros resultados de coeficientes de pressão correspondem a um vento cuja direcção é perpendicular ao eixo longitudinal do edifício. Os comentários são similares a aqueles já emitidos antes.



Não obstante, a zona do teto com as tomadas F1 a F6 chama a nossa atenção com um forte desvio dos resultados do IPT em comparação aos outros modelos.

A tabela a seguir apresenta os resultados numéricos e experimentais para uma comparação mais precisa dos resultados e erros. Os comentários ficam idênticos ao caso com o vento a 0°.

Tomada i	Cpe			Erro	Erro	Erro
	ANSYS	IPT	NBR6123	ANSYS/IPT	ANSYS/NBR	IPT/NBR
A1	-0.39	-0.71	-0.46	44.95%	15.50%	34.85%
A2	-0.51	-0.71	-0.46	27.85%	9.70%	34.85%
A3	-1.35	-1.51	-0.86	10.11%	36.49%	42.91%
A4	-1.35	-1.37	-0.86	1.30%	36.49%	37.31%
B1	-0.39	-1.54	-0.86	74.80%	54.80%	44.25%
B2	-0.51	-1.39	-0.86	63.46%	40.76%	38.31%
B3	-1.35	-0.74	-0.46	45.62%	66.03%	37.52%
B4	-1.35	-0.72	-0.46	46.95%	66.03%	35.96%
C1	0.85	1.04	0.70	18.42%	17.41%	32.62%
C2	1.06	0.80	0.70	24.34%	33.99%	12.76%
C3	0.95	1.01	0.70	5.26%	26.63%	30.48%
C4	1.06	0.76	0.70	28.26%	33.99%	7.99%
C5	0.85	1.03	0.70	18.00%	17.41%	32.28%
C6	1.06	0.75	0.70	29.25%	33.99%	6.70%
D1	-0.39	-0.61	-0.46	36.21%	15.45%	24.55%
D2	-0.39	-0.62	-0.46	37.51%	15.45%	26.09%
D3	-0.27	-0.56	-0.46	51.89%	41.69%	17.50%
D4	-0.27	-0.53	-0.46	48.97%	41.69%	12.48%
D5	-0.39	-0.59	-0.46	33.73%	15.45%	21.62%
D6	-0.39	-0.56	-0.46	30.89%	15.45%	18.27%
E1	-1.11	-1.05	-1.00	5.74%	10.14%	4.67%
E2	-1.48	-1.59	-1.00	7.02%	32.20%	36.97%
E3	-1.35	-0.97	-1.00	28.03%	26.15%	2.55%
E4	-1.48	-1.54	-1.00	4.06%	32.20%	34.95%
E5	-1.23	-0.94	-1.00	23.93%	18.95%	6.14%
E6	-1.48	-1.40	-1.00	5.39%	32.20%	28.34%
F1	-0.27	-1.27	-0.40	78.92%	33.00%	68.53%
F2	-0.27	-0.85	-0.40	68.62%	33.00%	53.17%
F3	-0.27	-1.20	-0.40	77.75%	33.00%	66.79%
F4	-0.27	-0.89	-0.40	69.82%	33.00%	54.95%
F5	-0.39	-1.19	-0.40	67.23%	2.82%	66.28%
F6	-0.39	-0.77	-0.40	49.78%	2.82%	48.32%
				42.51%	31.14%	27.20%

Conclusão

Para terminar, realizamos uma comparação da ação do vento num edifício baixo com três modos diferentes: a norma brasileira NBR6123, uma experiência num túnel de vento com uma maquete e com o programa de simulação em elementos finitos ANSYS.

Para cada modo de estudo determinamos o coeficiente de pressão externo C_{pe} como variável de comparação. Dado que C_{pe} e a pressão p são proporcionais o erro calculado para uma é igual ao outro.

Comparando os resultados dos três métodos, destaca-se que o erro tem uma variação grande, de 1,3% (valor muito satisfatório) até mais de 50%, já descontando os casos onde foi provável que ocorreu um erro de medida.

O erro global, considerando todas as tomadas, entre os três métodos varia de 20% até 48%. Nos dois casos, vento a 0° e 90°, os valores que tem máxima verossimilhança são os do IPT com da Norma Brasileira. No caso da comparação ANSYS/IPT e ANSYS/NBR temos erros similares mas invertidos, ou seja no caso vento 0° o erro ANSYS/IPT é inferior ao erro ANSYS/NBR e no caso vento 90° ocorre o contrário.

É importante destacar que cada que cada método tem o seu limite. A norma NBR propôs coeficiente com menor precisão (com a escala de uma superfície e não de uma tomada). Além do fato de que a maquete pode apresentar irregularidade na superfície devida a cola por exemplo ou com uma parede com um ligeiro deslocamento, foi destacado pelo engenheiro do laboratório explicou que os obstáculos (simulando os prédios ou topografia irregular do entorno) presente no túnel têm alturas parecidas a aquela da maquete e isso poderia ter tido uma influência importante nos resultados obtidos.

Para concluir, observamos as diferenças que podem ocorrer em função do método escolhido nos resultados obtidos. Um futuro objetivo interessante seria ver como podemos calibrar com mais precisão o modelo numérico com os resultados experimentais e diminuir o erro.

Anexo: Parâmetros utilizados para ANSYS

Neste anexo descrevemos os parâmetros de entrada para o modelo numérico ANSYS. Será tomado como exemplo a geometria com o vento inclinado a 0° e com uma velocidade de entrada de 45 m/s.

Geometria

Nesta parte define-se a geometria do modelo de estudo primeiro bem como o volume de controle, ou seja aquele volume que se estima necessário para não observar efeitos de bordas no nosso modelo de estudo. Para o nosso modelo, cria-se primeiro o esboço em plano e obtém-se o volume com variação. Realiza-se enfim a extrusão do galpão estudado do volume de controle.

Malha

Nesta parte, nomea-se primeiro as diferentes surfaces. Ou seja para o volume de controle define-se a surface *inlet* de onde vai vir o vento, a surface *outlet* oposta a esta primeira e a surface *wall* composta com o resto das surfaces. Defini-se depois *house_wall* composta com todas as faces do edifício de estudo e define-se o domínio do fluido *fluid_domain* onde o ar, e o vento então, vai estar. Define-se esta zona com o volume de controle então.

Em um segundo tempo, realiza-se a malha. Gera-se uma malha primeiro sobre todo o modelo. Aqui foram guardadas as características padrões propostas pelo software. Depois, afina-se a malha para a zona de estudo, ou seja para o galpão. Ou seja realiza-se um refinamento de nível 3 sobre a seleção nomeada *house_wall*.

Configuração

Nesta parte, começa-se por definir que vamos trabalhar com *double precision* e define-se as *processing options* com *parallel* para mais eficiência nos cálculos.

Depois, escolha-se de trabalhar com um estudo estacionário e com o *k-epsilon model*. Define-se o material ar na parte *fluid* dos materiais, com uma densidade de $1,225 \text{ kg/m}^3$ e uma viscosidade de $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m*s)}$. Pode-se então definir o *fluid_domain* com o ar na *Cell Zone Condition* e define-se as *boundary conditions*. Conserva-se os valores padrões e no *inlet* entra-se a velocidade de entrada, ou seja aqui 45 m/s.

Solução

Executa-se o software com 100 iteração.

Resultados

Nesta parte, apenas mencionamos que os resultados de pressões e de coeficientes de pressão foram obtidos definindo a variável de estudo sobre a área de aplicação *house_wall*. A precisão gráfica é obtida jogando sobre o número de contornos.