



Escola Politécnica da USP

PEF 3522 - Ação do Vento nas Edificações

Projeto Semestral

Prof. Henrique Campelo Gomes

Prof. Ruy Pauletti

GRUPO 4

Pedro Henrique Pedrosa Torres

Ricardo Maia Avelino

Guilherme Cruz Soares da Silva

Dezembro 2018

1. Objetivo	2
2. Apresentação do Modelo	3
2.1. Dimensões principais	3
2.2. Tomadas de pressão	4
2.3. Modelo Físico	7
3. Ação do vento segundo NBR 6123	9
3.1. Coeficientes de pressão e de forma	12
3.1.1. Coeficientes de pressão e de forma externos	13
3.1.2. Coeficientes de pressão e de forma internos	16
3.2. Coeficientes de pressão e forma totais	17
4. Modelo numérico em Ansys/Fluent	18
4.1. Hipóteses de simulação	18
4.2. Resultados Vento à 0°	20
4.3. Resultados Vento à 90°	26
5. Ensaio no túnel de vento	30
5.1. Resultados à 0°	31
5.2. Resultados à 90°	32
5.3. Resultados à 45°	33
6. Comparação e análise dos resultados	34
6.1. Comparação para resultados de vento aplicado a 0°	35
6.2. Comparação para resultados de vento aplicado a 90°	37
7. Conclusão	39

1. Objetivo

O objetivo dessa atividade é comparar o efeito do vento sobre uma edificação simples por três métodos; o primeiro, é a utilização da norma brasileira de ventos NBR6123; o segundo, consiste de um modelo numérico de escoamento realizado com o Ansys/Fluent; o terceiro, corresponde à um ensaio em túnel de vento realizado no IPT em 04/12/2018.

Pretende-se avaliar os benefícios de uma aplicação normativa e suas limitações no que tange o efeito do vento, esta é a metodologia largamente aplicada no estudo de edificações no Brasil por questões de agilidade e orçamento/tempo que impossibilitam estudos mais avançados.

Além disso, o modelo numérico nos permitirá entender os desafios de uma modelagem complexa para estudo da interação entre vento e estrutura e avaliar a sua aderência à um resultado real obtido em túnel de vento.

2. Apresentação do Modelo

O modelo a ser estudado consiste em uma casa simples com telhado de duas águas. Para a realização do modelo, as dimensões principais e ângulo de inclinação do telhado foram previamente definidas pelos docentes da disciplina. Nosso grupo (GRUPO 3) ficou responsável da modelagem da estrutura possuindo ângulo de queda de 45° .

2.1. Dimensões principais

As principais dimensões são definidas nas figuras abaixo:

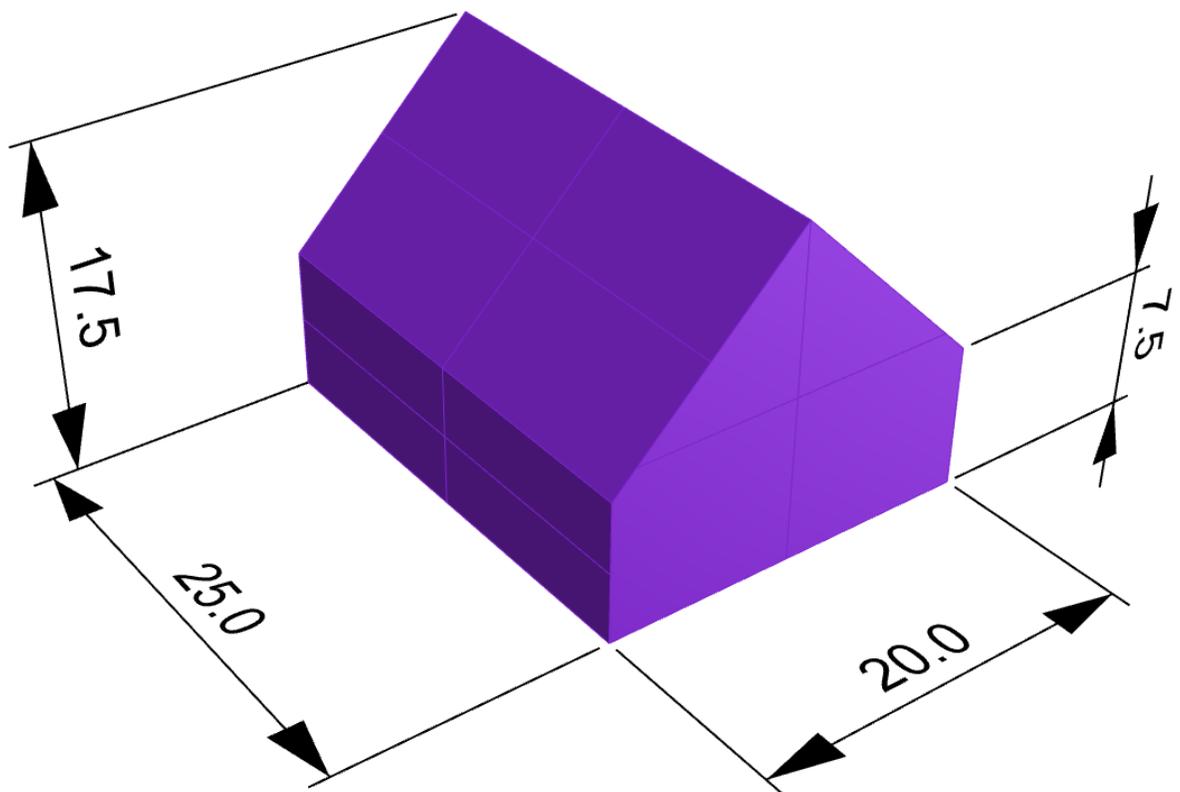


Figura 1. Modelo da casa com dimensões principais. (Em metros para o modelo real ou em centímetros para o modelo reduzido em escala 1:100)

2.2. Tomadas de pressão

O modelo será adicionado de 32 medidas de pressão que são apresentadas nas figuras a seguir, bem como suas dimensões planas em relação à eixos de referência do modelo.

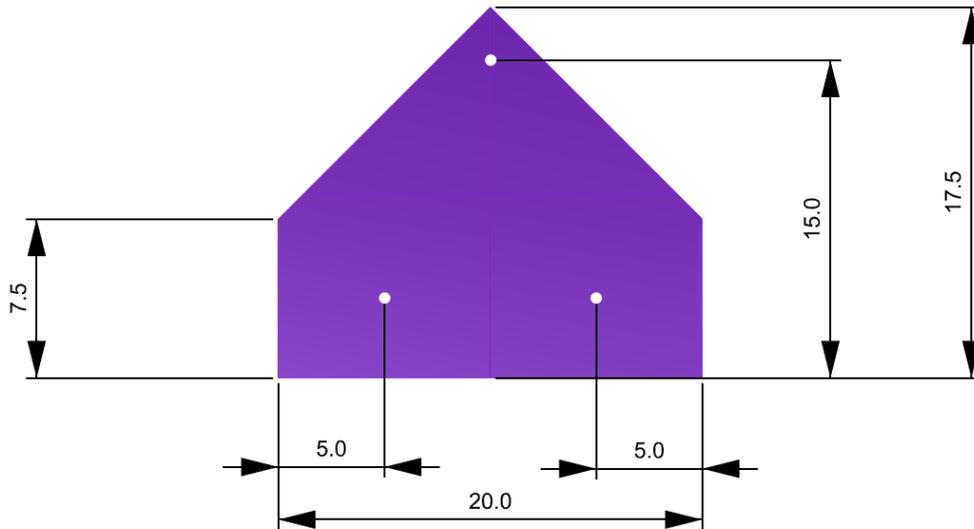


Figura 2. Tomadas de pressão na face frontal..

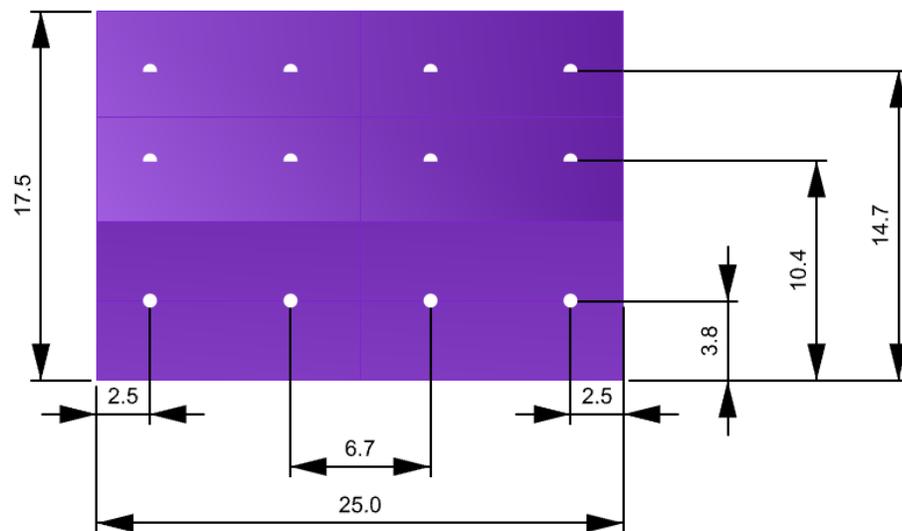


Figura 3. Tomadas de pressão na face lateral.

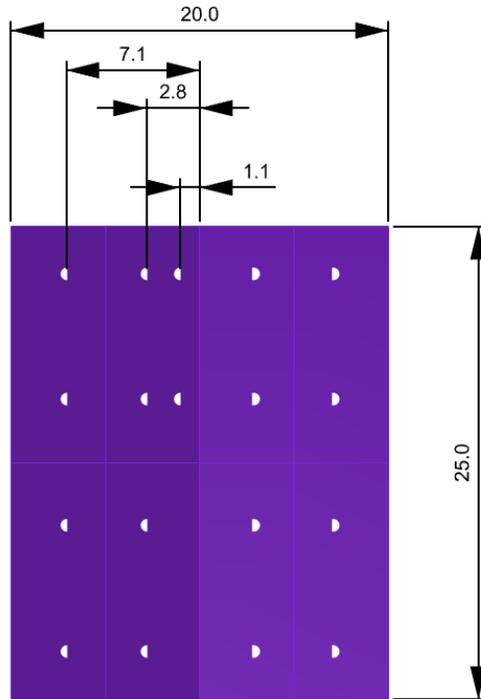
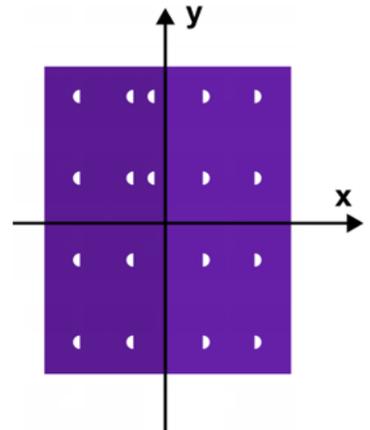


Figura 4. Tomadas de pressão na face superior.

Uma tabela com a posição das tomadas de pressão pode ser vista a seguir:

Tabela 1. Posição das tomadas de pressão.

Posição das tomadas de pressão							
Index	x	z	y	Index	x	z	y
Paredes laterais				Telhado esquerda			
11	-10	3.75	-10	61	-7.88	9.62	10
12	-10	3.75	-3.34	62	-7.88	9.62	3.34
13	-10	3.75	3.34	63	-7.88	9.62	-3.34
14	-10	3.75	10	64	-7.88	9.62	-10
1	10	3.75	-10	68	-2.83	14.67	10
2	10	3.75	-3.34	67	-2.83	14.67	3.34
3	10	3.75	3.34	66	-2.83	14.67	-3.34
4	10	3.75	10	65	-2.83	14.67	-10
Barlavento				Telhado direita			
21	-5	3.75	12.5	41	7.88	9.62	10
22	5	3.75	12.5	42	7.88	9.62	3.34
23	0	14.2	12.5	43	7.88	9.62	-3.34
Sotavento				44	7.88	9.62	-10
31	-5	3.75	-12.5	45	2.83	14.67	10
32	5	3.75	-12.5	46	2.83	14.67	3.34
33	0	14.2	-12.5	47	2.83	14.67	-3.34
				48	2.83	14.67	-10
				Pressão de Borda			
				51	1.06	16.44	10
				52	1.06	16.44	3.34



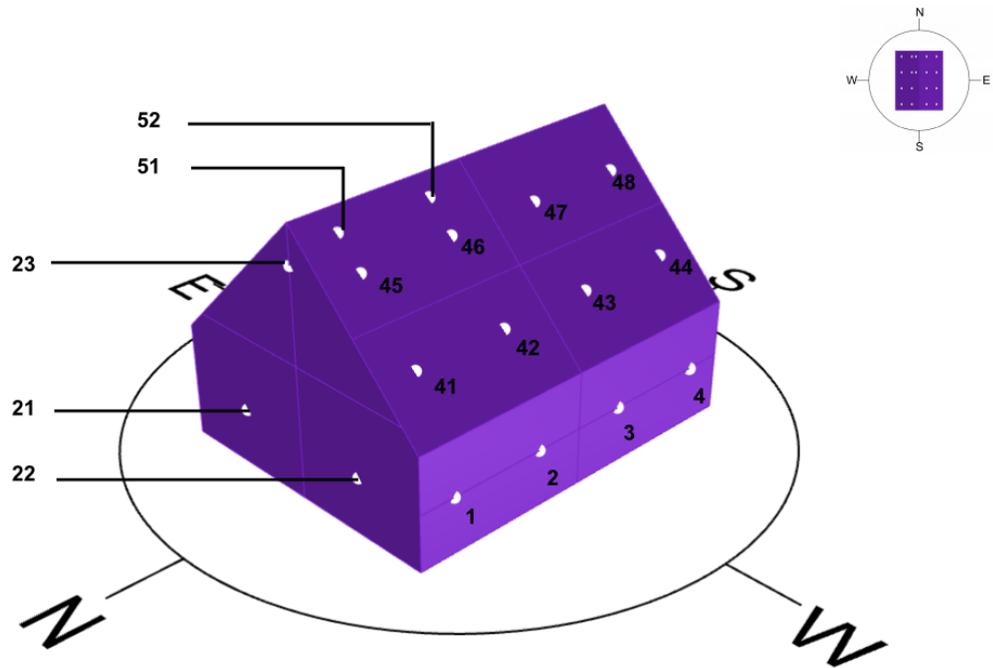


Figura 5. Tomadas de pressão do modelo - Fachada Oeste/Norte.

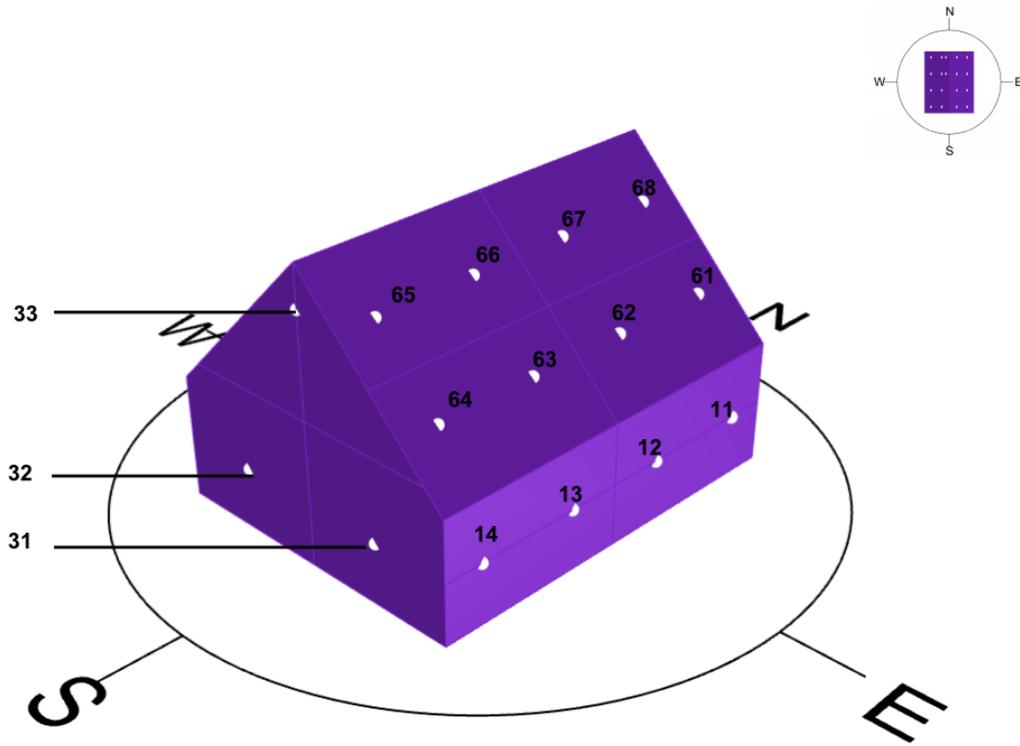


Figura 6. Tomadas de pressão do modelo - Fachada Leste/Sul.

2.3. Modelo Físico

Um modelo físico foi construído em “papel isopor” com as dimensões do modelo numérico na escala 1:100 apresentado. As tomadas de pressão correspondem a tubos com 0.5 mm de diâmetro que são localizados nas mesmas posições apresentadas na Figura 5 e na Figura 6. A casa foi planejada e cortada como apresentado na Figura 7, e posteriormente foi montada com auxílio de cola-quente e fita adesiva resultando no corpo de prova das Figura 8 e Figura 9 pronto para ser ensaiado no túnel de vento.

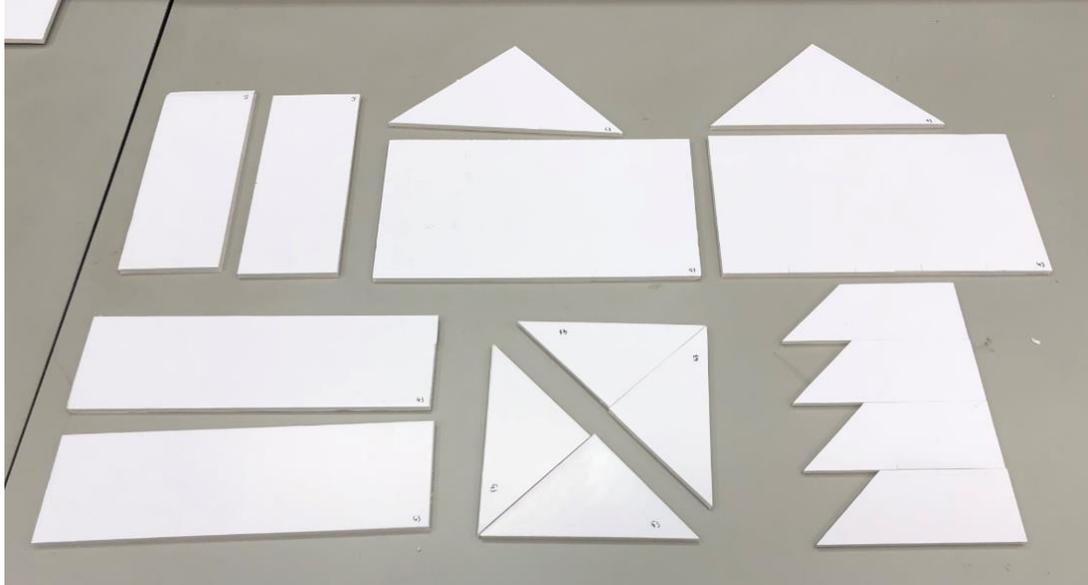


Figura 7. Planificação da casa para montagem.

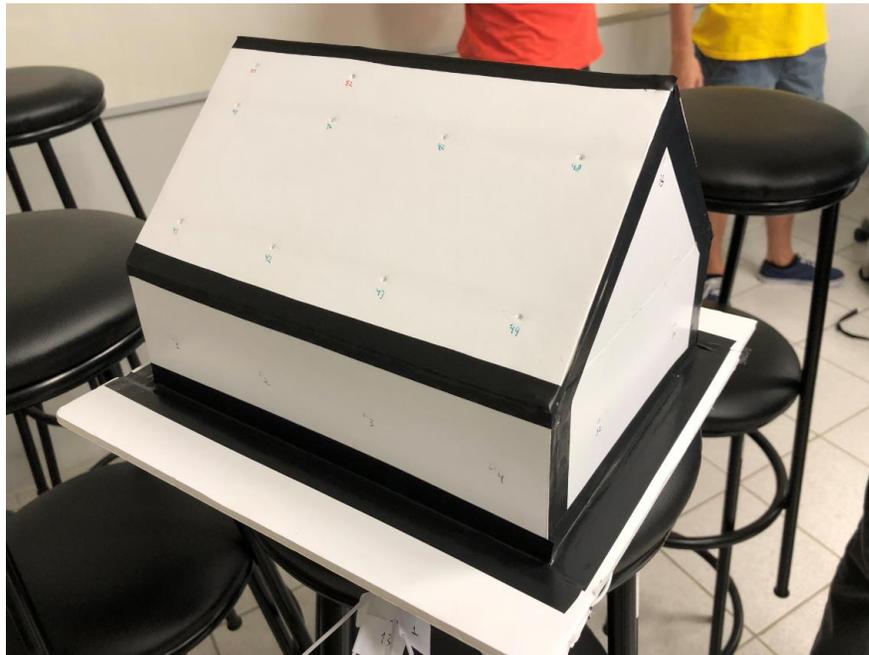


Figura 8. Montagem realizada. Fachada Leste (E)



Figura 9. Montagem realizada. Fachada Oeste (W).

As tomadas de pressão foram devidamente etiquetadas. Os tubos foram instalados na parte interior da estrutura e saíram desta por meio de uma abertura feita no fundo conforme apresentado na Figura 10.

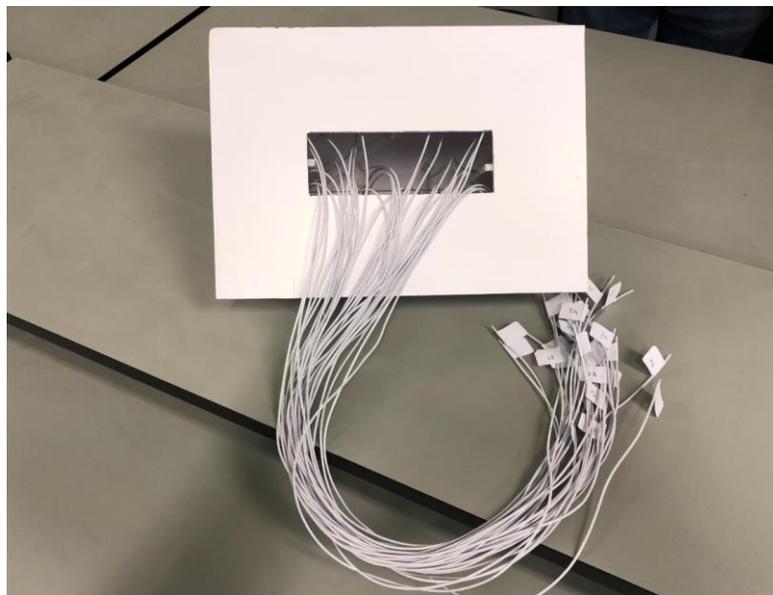


Figura 10. Detalhe da saída dos tubos de tomada de pressão embaixo do modelo.

Portanto:

$$S_2 = b \times F_r \times \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

Onde:

z é a altura sobre o terreno;

b e p são parâmetros obtidos na tabela abaixo.

Tabela 2. Parâmetros meteorológicos.

Categ.	z _z (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	F _r	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

No caso da estrutura temos categoria II e classe B, obtendo pela tabela os valores de 1,00, 0,98 e 0,09 para os parâmetros b, F_r e p respectivamente.

Deste modo, o valor para o fator S₂ é:

$$S_2 = 1,00 \times 0,98 \times \left(\frac{17,5}{10}\right)^{0,09} \Rightarrow S_2 = 1,031$$

- Fator S₃

O fator estático pode ser obtido pela tabela abaixo:

Tabela 3. Valores mínimos de S_3 .

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína parcial ou total pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com baixo fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Considerando o hangar como uma instalação com baixo fator de ocupação, temos que sua classificação é a de Grupo 3, assim: $S_3 = 0,95$.

- Velocidade Característica do Vento

A velocidade característica do vento pode ser determinada pela expressão:

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Onde:

V_0 é a velocidade básica do vento;

S_1 é o fator topográfico;

S_2 é o fator de rugosidade, dimensões e altura;

S_3 é o fator estatístico.

Assim, para a estrutura temos:

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 = 40 \times 1,00 \times 1,031 \times 0,95 \Rightarrow V_k = 39,18 \text{ m/s}$$

- Pressão dinâmica

A pressão pode ser obtida pela expressão:

$$q = 0,613 \times V_k^2$$

Para o hangar:

$$q = 0,613 \times 39,18^2 \Rightarrow q = 941 \text{ Pa}$$

3.1. Coeficientes de pressão e de forma

No presente trabalho estamos interessados em encontrar os coeficientes de pressão para cada ponto da estrutura. Antes das determinações dos coeficientes de pressão e de forma externo e interno, definiu-se as direções do vento que podem atuar na estrutura. Em um estudo preliminar, foi verificado que as situações mais desfavoráveis da ação do vento são aquelas em que este incide perpendicularmente às fachadas. Assim, considerou-se duas situações: ventos nas direções 0° e 90° ilustradas a seguir.

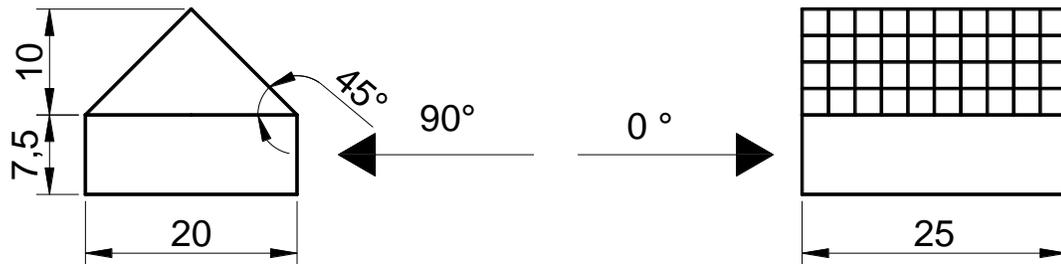


Figura 12. Cortes transversal e longitudinal e direção do vento.

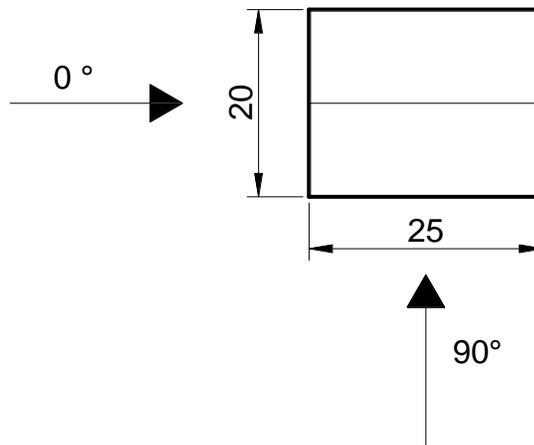


Figura 13. Planta utilizada para cálculo dos coef. de pressão externo e interno.

3.1.1. Coeficientes de pressão e de forma externos

- Paredes

Para a determinação dos coeficientes de pressão e de forma externos para as paredes, utiliza-se a tabela da NBR 6123 abaixo:

Para utilizar a tabela, as determinações de alguns parâmetros são necessários, sendo eles: altura relativa e proporções em planta.

Altura relativa:

$$\frac{h}{b} = \frac{17,5}{20} = 0,875$$

Proporções em planta:

$$\frac{a}{b} = \frac{25}{20} = 1,25$$

$$\frac{b}{3} = \frac{20}{3} = 6,67$$

$$\frac{a}{4} = \frac{25}{4} = 6,25$$

Onde:

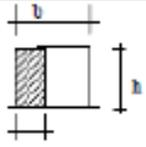
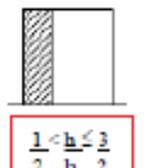
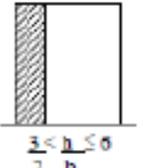
a é a dimensão maior em planta;

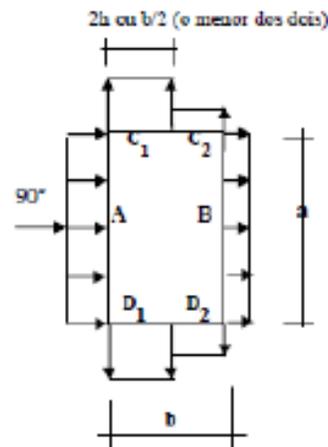
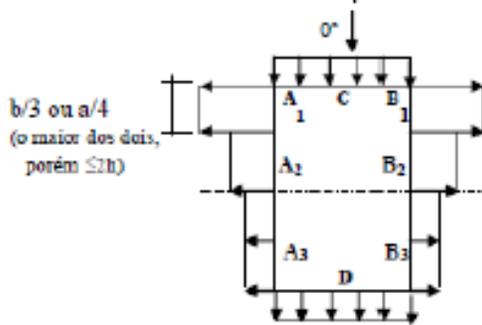
b é a dimensão menor em planta;

h é a altura da parede.

Como a altura relativa está compreendida entre 0,5 e 1,5 e a proporção entre o lado maior e o lado menor está compreendida entre 1 e 1,5, podemos obter os coeficientes de pressão e de forma para as paredes na tabela:

Tabela 4. Coeficientes de pressão e de forma externos, para paredes de planta retangular

Tabela 4: Coeficientes de pressão e de forma externos, para paredes de planta retangular (Tabela 4 - transcrita da NBR 6123:88 com finalidade didática)										
Altura relativa	Valores de C_e 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		
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
$0,2b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
	$1 < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	-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
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-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



- a) Para a/b entre $3/2$ e 3 interpolar linearmente.
 b) Para vento a 0° , nas partes A_1 e B_1 , o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:
 - Para $a/b = 1$: mesmo valor das partes A_2 e B_2
 - Para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$
 - Para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente
 c) Para cada uma das incidências do vento (0° ou 90°), o coeficiente de pressão médio externo, C_{pe} médio, é aplicado à parte de barlavento das paredes paralelas ao vento, em uma distância igual a $0,2b$ ou h , considerando-se o menor destes dois valores

- d) Para determinar o coeficiente de arrasto, C_a , deve ser usado o gráfico da Figura 4 (vento de baixa turbulência) ou da figura 5 (vento de alta turbulência - ver 6.5.3).

- Telhado

Para a determinação dos coeficientes de pressão e de forma externos para o telhado, utiliza-se a tabela 5 da NBR 6123 com os seguintes parâmetros:

$$\frac{h}{b} = \frac{17,5}{20} = 0,875 \frac{a}{b} = \frac{25}{20} = 1,25 \quad \theta = 45^\circ$$

Tabela 5. Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhado com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular.

Telhados em duas águas :

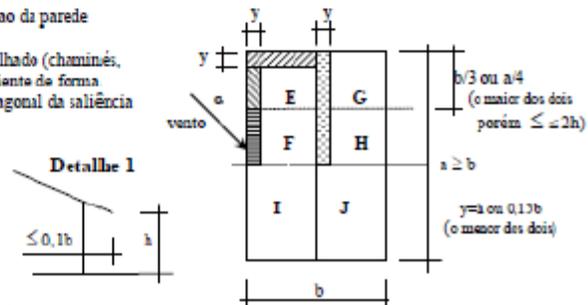
Tabela 5: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular (Tabela 5 - transcrita da NBR 6123:33)

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				C_{pe} médio			
		$\alpha=90^\circ$		$\alpha=0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$ 	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
	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	
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$ 	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				-1,0
60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				-1,0	
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$ 	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			
	45°	-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					

Notas:

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

Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b .



Portanto, todos os coeficientes de forma externos da estrutura foram obtidos.

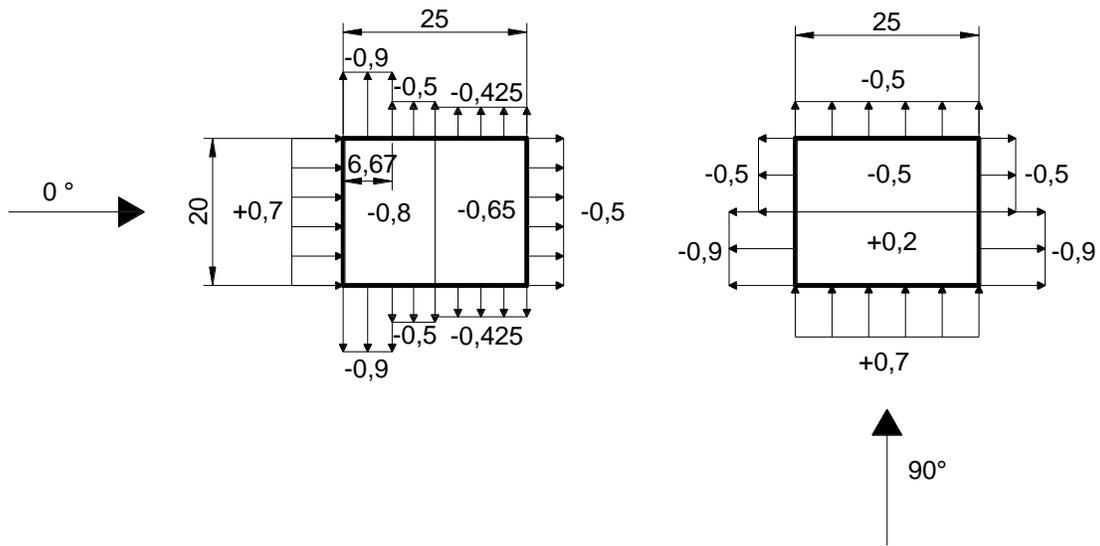


Figura 14. Coeficientes de forma das paredes e telhado em vista de planta.

3.1.2. Coeficientes de pressão e de forma internos

Como a estrutura estudada no projeto não possui abertura dominante, adotou-se que as faces são igualmente permeáveis. Portanto, segundo a NBR6123, trata-se do caso 2, tratando-se de edificações com quatro faces igualmente permeáveis.

Para este caso temos que os coeficientes para pressão internos são:

$$C_{pi} = -0,3 \text{ ou } C_{pi} = 0$$

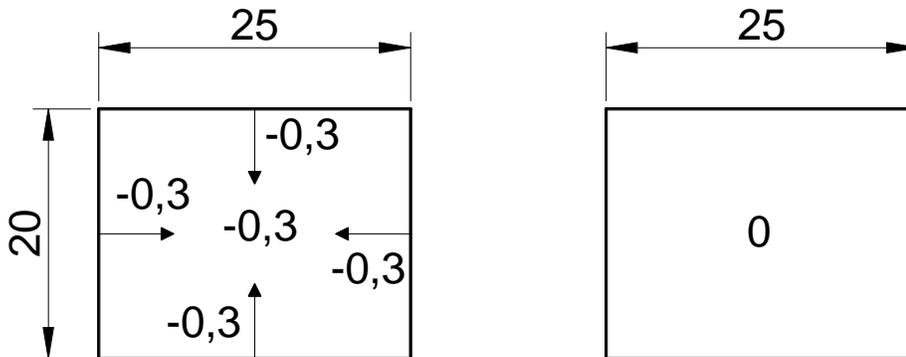


Figura 15. Coeficientes de forma internos em vista de planta.

3.2. Coeficientes de pressão e forma totais

Com todos os coeficientes definidos, fez-se a composição destes obtendo os seguintes resultados:

- Vento a 0°

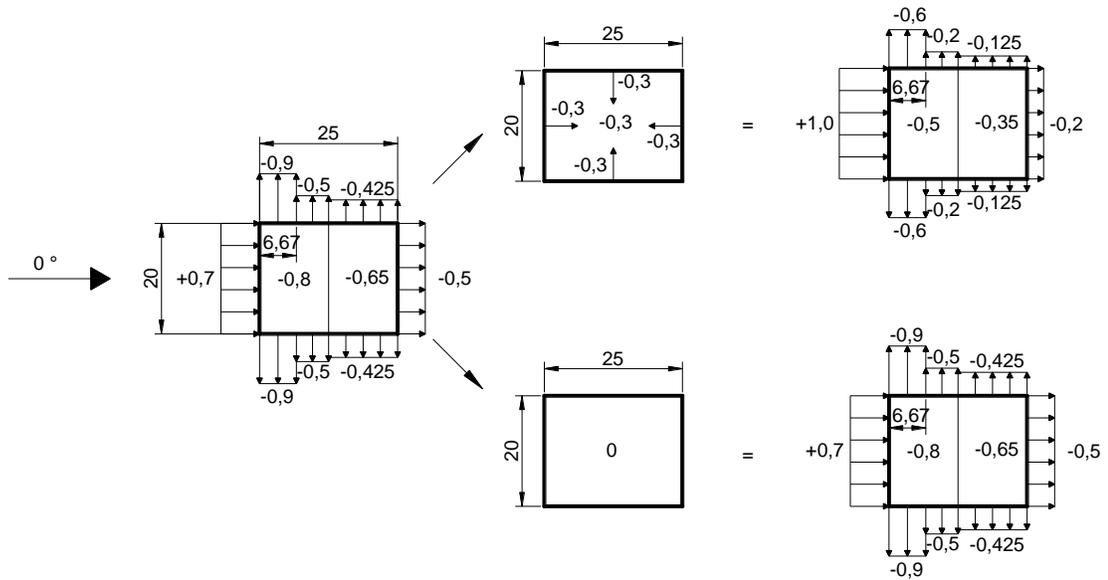


Figura 16. Coeficientes de pressão externos, internos e totais na estrutura em planta para vento a 0°

- Vento a 90°

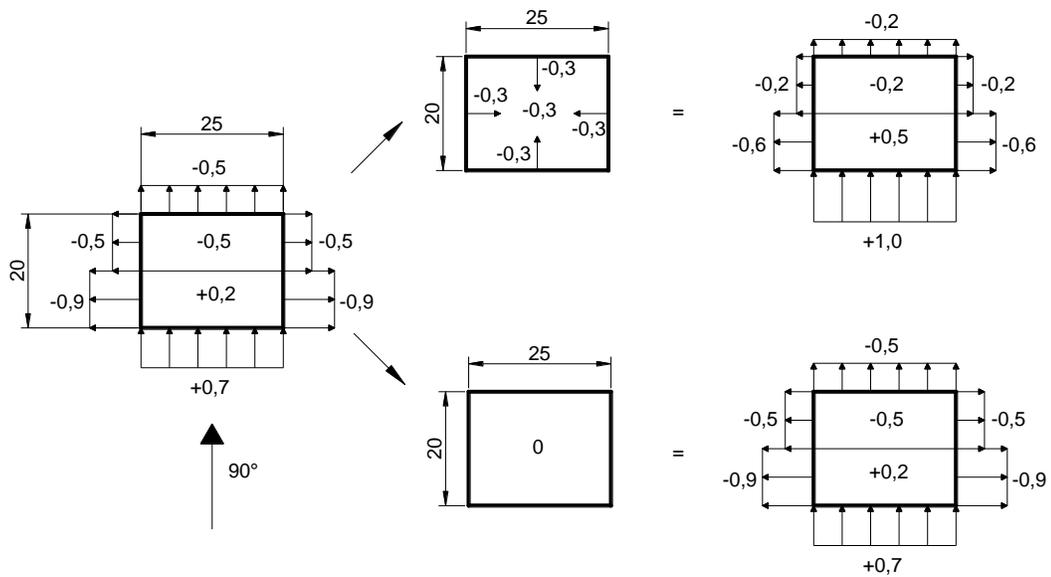


Figura 17. Coeficientes de pressão externos, internos e totais na estrutura em planta para vento a 90°.

4. Modelo numérico em Ansys/Fluent

O modelo foi construído no Ansys com o módulo Fluent. Com essa ferramenta é possível a criação de um único modelo geométrico que será analisado numericamente para o vento nas duas direções (0 e 90 graus).

4.1. Hipóteses de simulação

A análise do escoamento é não linear e é realizada em 200 iterações (steps) nos quais todos os dados de velocidade, pressão, entre outros são recalculados.

O tipo de solver utilizado é *Pressure-Based*, a consideração de tempo é *Steady* e a formulação da velocidade *Absolute*. Os efeitos gravitacionais não são considerados no escoamento.

No Fluent pode-se criar dois materiais, um representando o fluido e outro representando o objeto ensaiado.

As propriedades do fluido são:

Densidade 1.225 kg/m³

Viscosidade: 1.7x10⁽⁻⁵⁾ kg/m-s

O sólido é considerado de alumínio, possuindo alta massa específica e rigidez o que permite que suas deformações sejam desprezíveis.

Densidade: 2719 kg/m³

Duas seções são criadas para entrada e saída do fluido durante o escoamento, elas são chamadas de *inlet* e *outlet*. Ao *inlet* podemos incluir a propriedade de velocidade do escoamento. Essa velocidade é considerada $v = 45$ m/s, além disso consideramos uma intensidade de turbulência de 5% e *Turbulent Viscosity Ratio* igual a 10.

A mesh possui 113472 elementos tetraédricos e 21869 nós e é apresentada na Figura 18, vemos que na realidade é o ar que é modelado enquanto que o obstáculo/objeto ensaiado é representado por seções.

Da mesma forma um modelo semelhante é realizado, porém, nesse caso a casa é rotacionada de 90 graus e assim pode-se analisar o efeito do vento na direção perpendicular como apresentado na Figura 19.

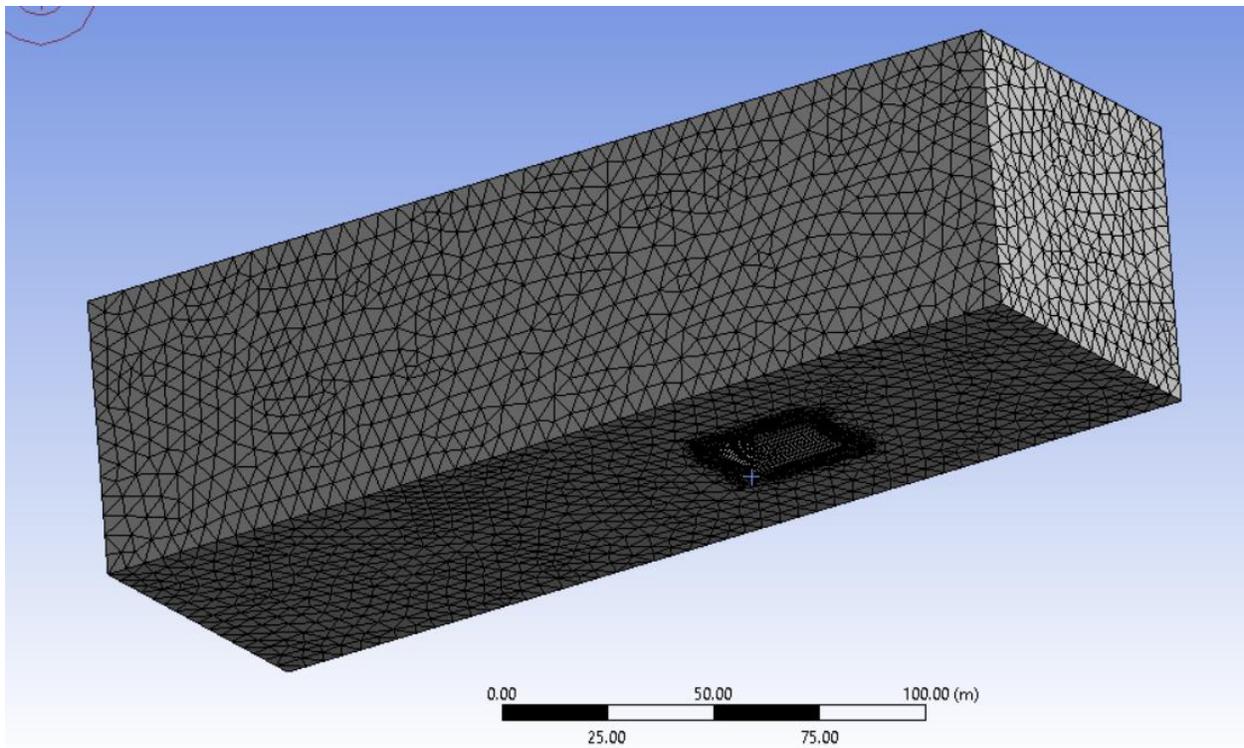


Figura 18. Mesh considerada com tamanho reduzido próximo ao obstáculo/objeto ensaiado para o modelo de estudo do vento à 0 graus.

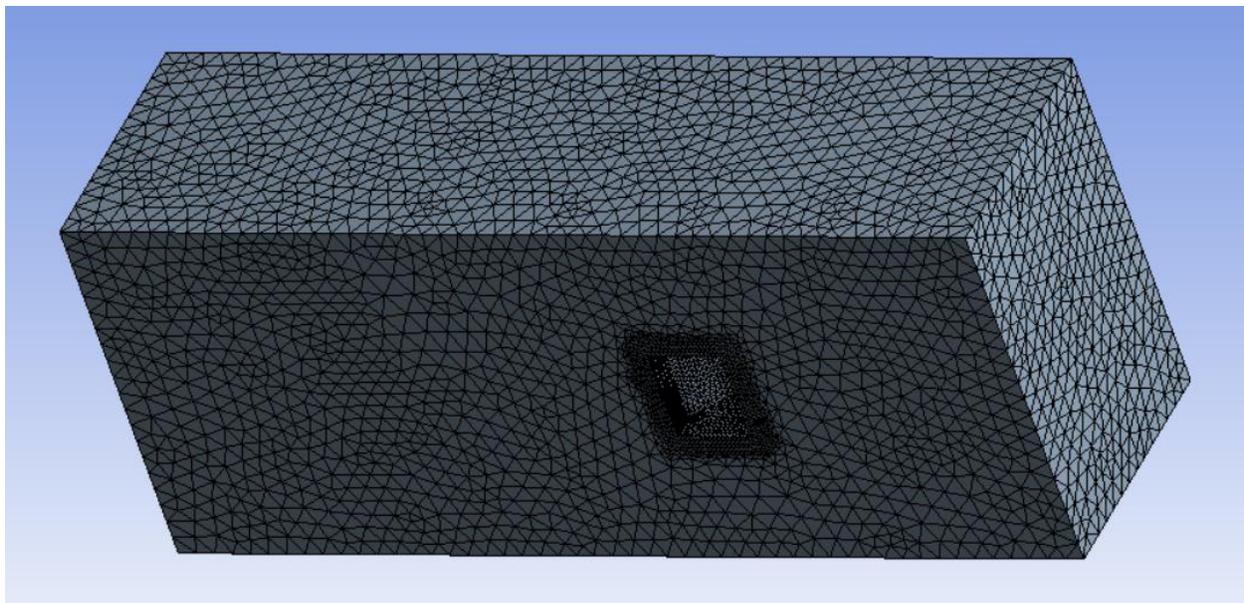


Figura 19. Mesh considerada com tamanho reduzido próximo ao obstáculo/objeto ensaiado para o modelo de estudo do vento à 90 graus.

Os principais resultados desta análise são apresentados nas seções a seguir.

4.2. Resultados Vento à 0°

Os valores de coeficiente de pressão nas paredes da edificação são apresentados no diagrama a seguir. Neste diagrama o valor unitário do coeficiente de pressão é equivalente a 3.0 unidades no gráfico. Assim sendo, o quadriculado apresentado é tal que cada quadrícula equivale a aproximadamente um coeficiente de pressão de 0.8.

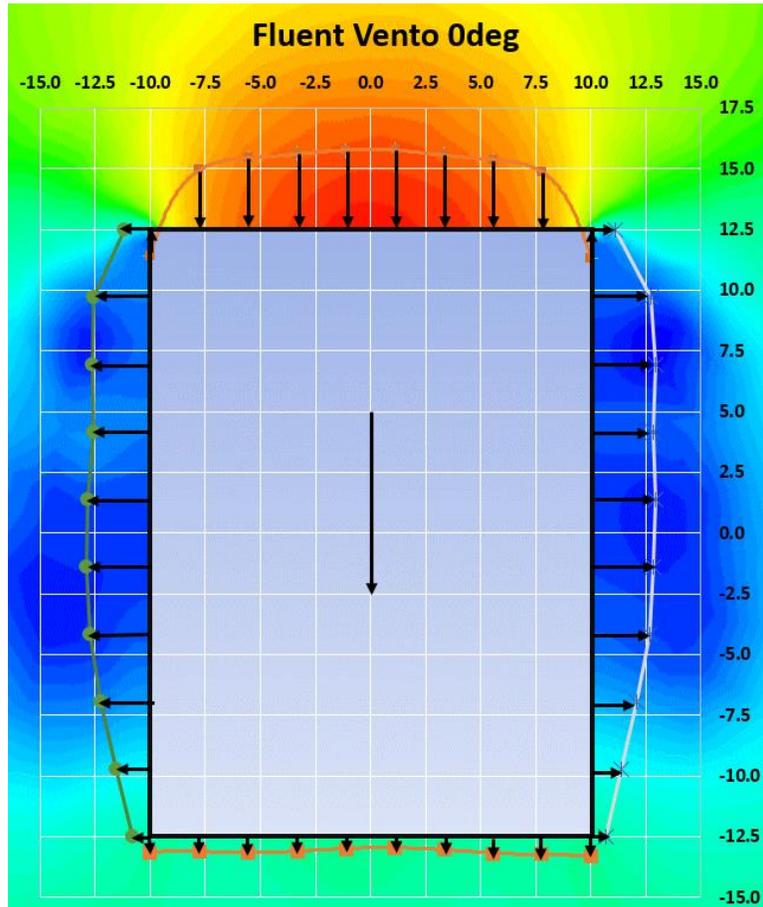


Figura 20. Resultado do coeficiente de pressão x3.0 resultante nas paredes – Vento a 0 graus.

Tabela 6. Coeficientes de pressão nas paredes da edificação para vento a 0 graus.

Valores de Coeficiente de pressão (CP) nas paredes da edificação - Vento à 0 graus.							
Series 1 at /LINE:Borda direita		Series 1 at /LINE:Borda traseira		Series 1 at /LINE:Borda esquerda		Series 1 at /LINE:Borda frontal	
X [m]	Pressure Coefficient	Z [m]	Pressure Coefficient	X [m]	Pressure Coefficient	Z [m]	Pressure Coefficient
-10.0	-0.4	-12.5	-0.6	-10.0	-0.6	-12.5	-0.3
-7.8	-0.4	-9.7	-0.8	-7.8	-0.6	-9.7	0.8
-5.6	-0.5	-6.9	-0.6	-5.6	-0.6	-6.9	0.9
-3.3	-0.6	-4.2	-0.5	-3.3	-0.7	-4.2	1.0
-1.1	-0.8	-1.4	-0.4	-1.1	-0.8	-1.4	1.0
1.1	-0.8	1.4	-0.3	1.1	-0.9	1.4	1.1
3.3	-0.9	4.2	-0.4	3.3	-1.0	4.2	1.1
5.6	-0.9	6.9	-0.4	5.6	-1.0	6.9	1.0
7.8	-0.9	9.7	-0.4	7.8	-1.0	9.7	0.9
10.0	-0.2	12.5	-0.4	10.0	-0.3	12.5	-0.2

Da mesma maneira, o coeficiente de pressão é analisado em quatro seções transversais que são enumeradas na Figura 21.

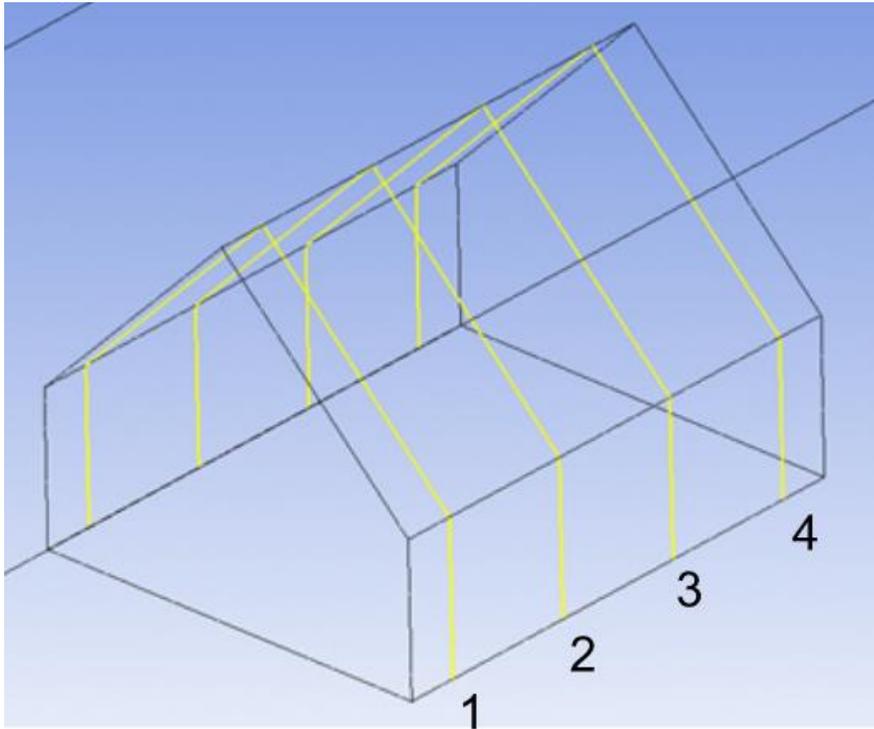


Figura 21. Seções estudadas para obtenção dos valores de coeficiente de pressão

Observa-se que da mesma forma que previsto pela norma, todas as pressões captadas nas seções transversais de 1 a 4 são de sucção e apresentam maior magnitude quando mais próximas da face montante ao vento.

Tabela 7. CP vento à 0 grau - Corte 1

Valores de Coeficiente de pressão (CP) na Seção 1							
Series 1 at /LINE:Telhado 11 [Parede esquerda]		Series 1 at /LINE:Telhado 12 [Queda d'água esquerda]		Series 2 at /LINE:Telhado 13 [Queda d'água direita]		Series 2 at /LINE:Telhado 14 [Parede direita]	
Y [m]	CP	X [m]	CP	X [m]	CP	Y [m]	CP
0.0	-1.0	-10.0	-0.8	0.0	-1.4	7.5	-1.0
0.8	-1.0	-8.9	-0.9	1.1	-1.4	6.7	-0.9
1.7	-1.0	-7.8	-1.0	2.2	-1.4	5.8	-0.9
2.5	-0.9	-6.7	-1.1	3.3	-1.3	5.0	-0.9
3.3	-0.9	-5.6	-1.2	4.4	-1.3	4.2	-0.8
4.2	-0.9	-4.4	-1.2	5.6	-1.3	3.3	-0.8
5.0	-0.9	-3.3	-1.3	6.7	-1.2	2.5	-0.8
5.8	-0.9	-2.2	-1.4	7.8	-1.1	1.7	-0.8
6.7	-0.9	-1.1	-1.4	8.9	-1.0	0.8	-0.8
7.5	-0.8	0.0	-1.4	10.0	-1.0	0.0	-0.8

Tabela 8. CP vento à 0 grau - Corte 2

Valores de Coeficiente de pressão (CP) na Seção 2							
Series 1 at /LINE:Telhado 11 [Parede esquerda]		Series 1 at /LINE:Telhado 12 [Queda d'água esquerda]		Series 2 at /LINE:Telhado 13 [Queda d'água direita]		Series 2 at /LINE:Telhado 14 [Parede direita]	
Y [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	Y [m]	ressure Coefficien
0.0	-0.8	-10.0	-1.0	0.0	-1.1	7.5	-1.1
0.8	-0.9	-8.9	-1.1	1.1	-1.3	6.7	-1.0
1.7	-0.9	-7.8	-1.2	2.2	-1.3	5.8	-0.9
2.5	-0.9	-6.7	-1.2	3.3	-1.3	5.0	-0.9
3.3	-0.9	-5.6	-1.3	4.4	-1.3	4.2	-0.9
4.2	-0.9	-4.4	-1.3	5.6	-1.3	3.3	-0.9
5.0	-1.0	-3.3	-1.3	6.7	-1.2	2.5	-0.9
5.8	-1.0	-2.2	-1.2	7.8	-1.2	1.7	-0.9
6.7	-1.0	-1.1	-1.2	8.9	-1.3	0.8	-0.8
7.5	-1.0	0.0	-1.1	10.0	-1.1	0.0	-0.8

Tabela 9. CP vento à 0 grau - Corte 3

Valores de Coeficiente de pressão (CP) na Seção 3							
Series 1 at /LINE:Telhado 11 [Parede esquerda]		Series 1 at /LINE:Telhado 12 [Queda d'água esquerda]		Series 2 at /LINE:Telhado 13 [Queda d'água direita]		Series 2 at /LINE:Telhado 14 [Parede direita]	
Y [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	Y [m]	ressure Coefficien
0.0	-0.9	-10.0	-1.1	0.0	-0.2	7.5	-1.3
0.8	-0.9	-8.9	-0.9	1.1	-0.2	6.7	-1.3
1.7	-1.0	-7.8	-0.9	2.2	-0.3	5.8	-1.1
2.5	-0.9	-6.7	-0.9	3.3	-0.4	5.0	-1.0
3.3	-0.9	-5.6	-0.8	4.4	-0.5	4.2	-1.0
4.2	-0.9	-4.4	-0.6	5.6	-0.6	3.3	-0.9
5.0	-0.9	-3.3	-0.5	6.7	-0.7	2.5	-0.9
5.8	-1.0	-2.2	-0.4	7.8	-0.7	1.7	-0.9
6.7	-1.1	-1.1	-0.3	8.9	-0.8	0.8	-0.9
7.5	-1.1	0.0	-0.2	10.0	-1.3	0.0	-0.9

Tabela 10. CP vento à 0 grau - Corte 4

Valores de Coeficiente de pressão (CP) na Seção 4							
Series 1 at /LINE:Telhado 11 [Parede esquerda]		Series 1 at /LINE:Telhado 12 [Queda d'água esquerda]		Series 2 at /LINE:Telhado 13 [Queda d'água direita]		Series 2 at /LINE:Telhado 14 [Parede direita]	
Y [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	X [m]	ressure Coefficien	Y [m]	ressure Coefficien
0.0	-0.4	-10.0	-0.4	0.0	-0.1	7.5	-0.4
0.8	-0.4	-8.9	-0.2	1.1	-0.1	6.7	-0.5
1.7	-0.5	-7.8	-0.2	2.2	-0.1	5.8	-0.5
2.5	-0.4	-6.7	-0.2	3.3	-0.1	5.0	-0.5
3.3	-0.4	-5.6	-0.1	4.4	-0.1	4.2	-0.5
4.2	-0.4	-4.4	-0.1	5.6	-0.2	3.3	-0.5
5.0	-0.4	-3.3	-0.1	6.7	-0.2	2.5	-0.5
5.8	-0.4	-2.2	-0.1	7.8	-0.2	1.7	-0.5
6.7	-0.4	-1.1	-0.1	8.9	-0.2	0.8	-0.5
7.5	-0.4	0.0	-0.1	10.0	-0.4	0.0	-0.4

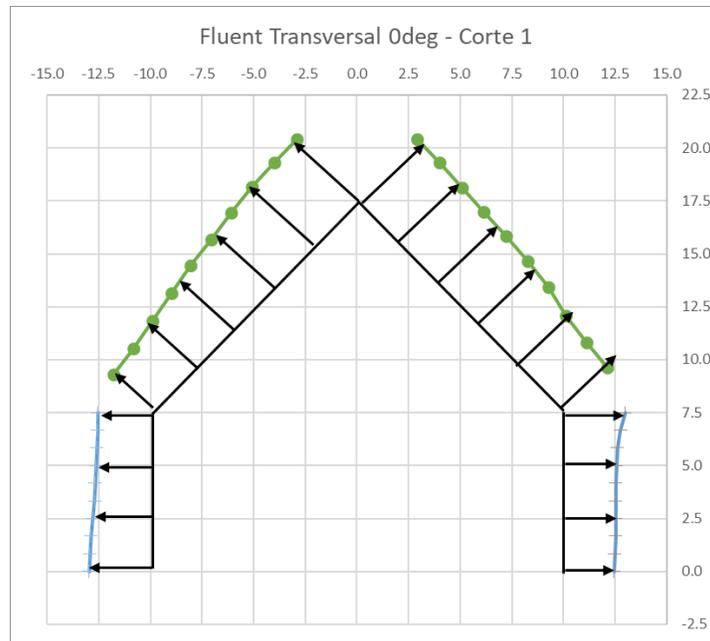


Figura 22. Resultados com vento a 0 graus do CP no Corte 1

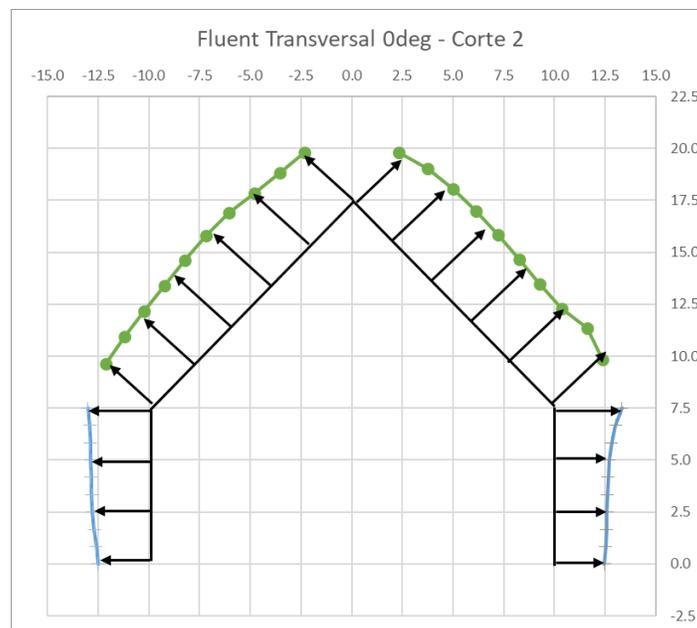


Figura 23. Resultados com vento 0 graus do CP no Corte 2

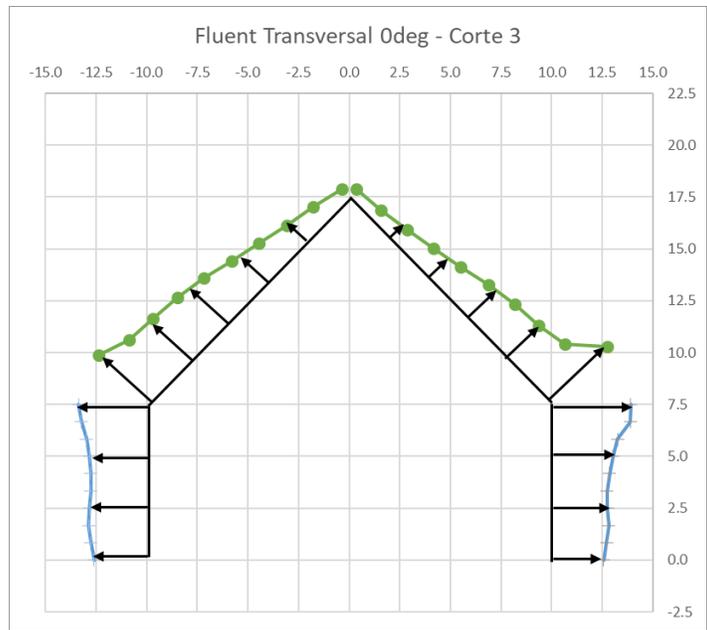


Figura 24. Resultados com vento a 0 graus do CP no Corte 3.

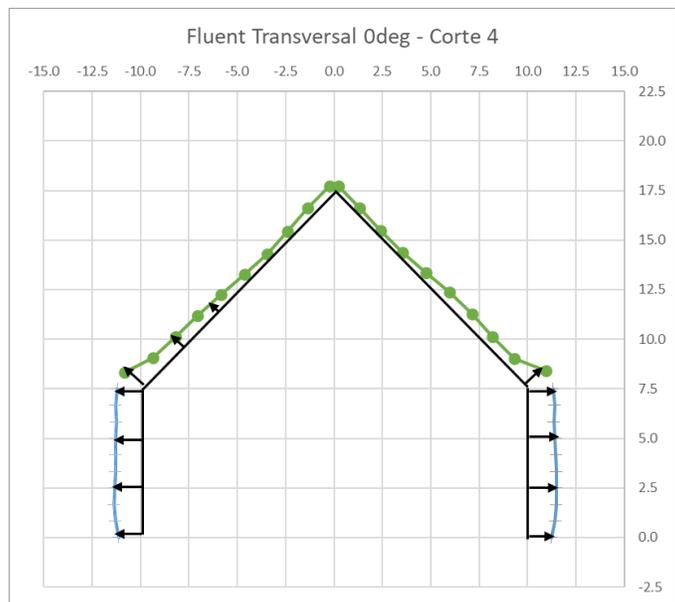


Figura 25. Resultados com vento a 0 graus do CP no Corte 4.

A Figura 26 representa os resultados mencionados previamente tridimensionalmente.

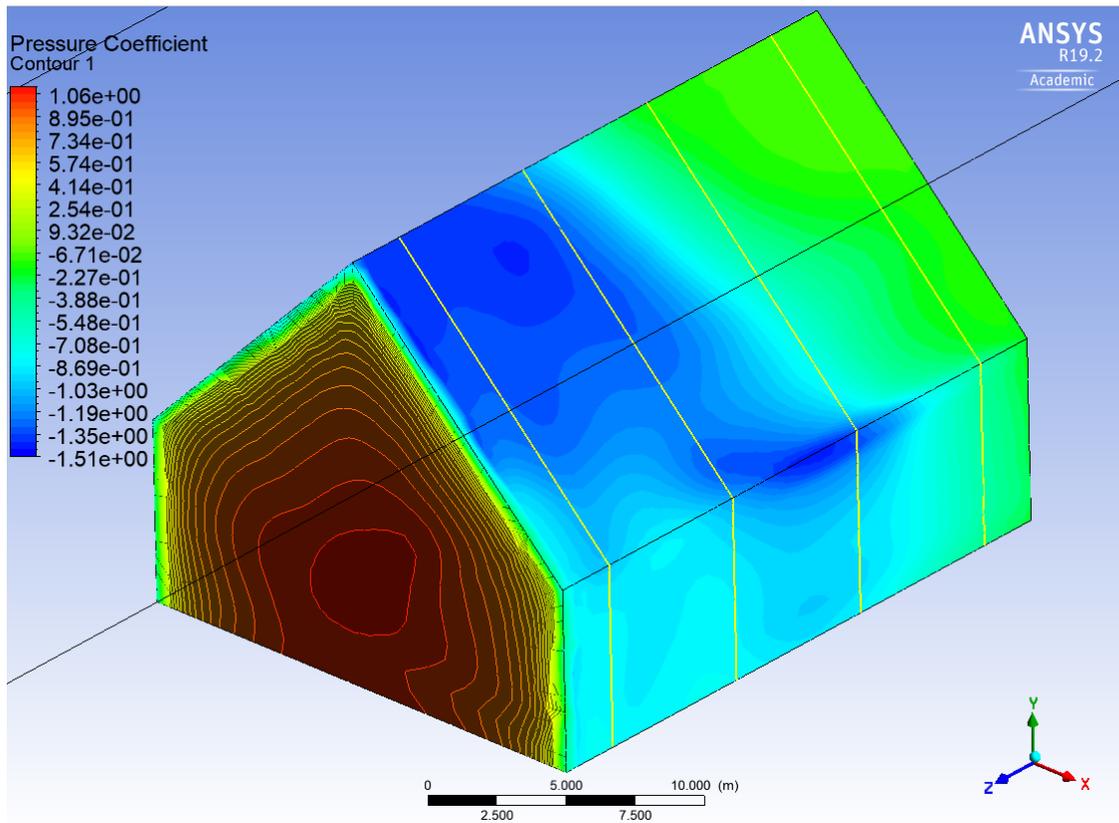


Figura 26. Resultados do coeficiente de pressão na edificação para vento a 0 graus.

4.3. Resultados Vento à 90°

Seguindo a mesma organização da parte 4.2 e os mesmos cortes 1 a 4, os resultados para a simulação com vento a 90° são apresentados a seguir.

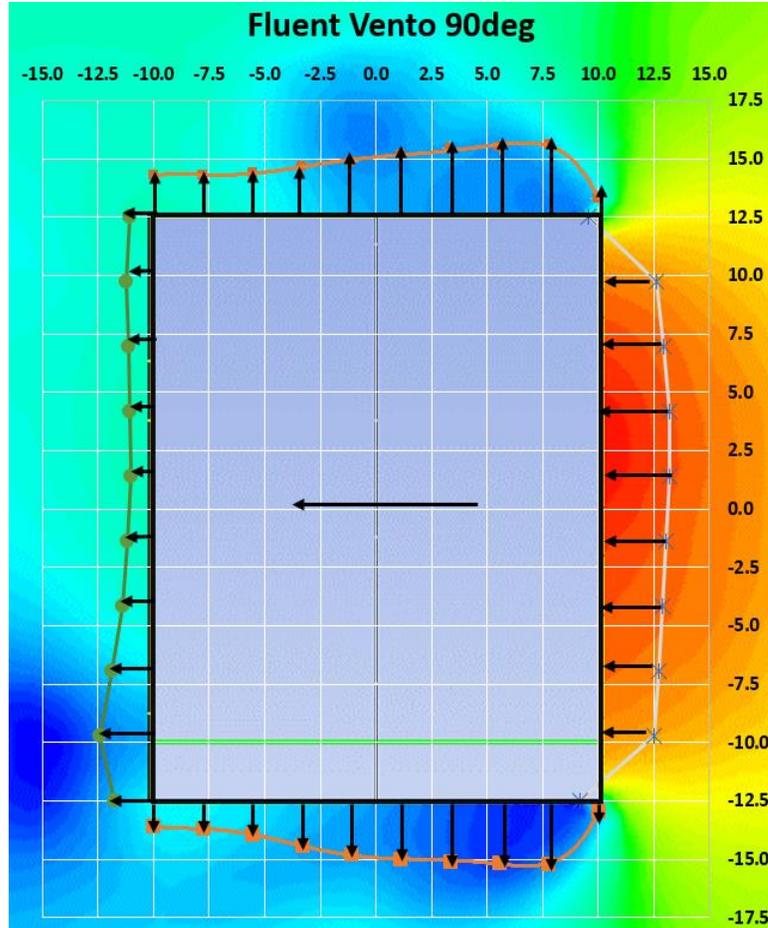


Figura 27. Resultado do coeficiente de pressão x3.0 resultante nas paredes – Vento a 90 graus.

Tabela 11 Coeficientes de pressão nas paredes da edificação para vento a 90 graus

Valores de Coeficiente de pressão (CP) nas paredes da edificação - Vento a 90 graus.							
[Name]		[Name]		[Name]		[Name]	
Series 1 at /LINE: Borda direita		Series 1 at /LINE: Borda traseira		Series 1 at /LINE: Borda esquerda		Series 1 at /LINE: Borda frontal	
[Data]		[Data]		[Data]		[Data]	
X [m]	Pressure Coefficient	Z [m]	Pressure Coefficient	X [m]	Pressure Coefficient	Z [m]	Pressure Coefficient
-10.0	-0.4	-12.5	-0.6	-10.0	-0.6	-12.5	-0.3
-7.8	-0.4	-9.7	-0.8	-7.8	-0.6	-9.7	0.8
-5.6	-0.5	-6.9	-0.6	-5.6	-0.6	-6.9	0.9
-3.3	-0.6	-4.2	-0.5	-3.3	-0.7	-4.2	1.0
-1.1	-0.8	-1.4	-0.4	-1.1	-0.8	-1.4	1.0
1.1	-0.8	1.4	-0.3	1.1	-0.9	1.4	1.1
3.3	-0.9	4.2	-0.4	3.3	-1.0	4.2	1.1
5.6	-0.9	6.9	-0.4	5.6	-1.0	6.9	1.0
7.8	-0.9	9.7	-0.4	7.8	-1.0	9.7	0.9
10.0	-0.2	12.5	-0.4	10.0	-0.3	12.5	-0.2

O valor para os mesmos cortes da Figura 21 é apresentado nos gráficos a seguir. Para reduzir o número de tabelas, esse dado é apresentado apenas graficamente e a escala de magnitude dos vetores é a mesma. Cada quadrado no gráfico corresponde à CP igual a 0.8.

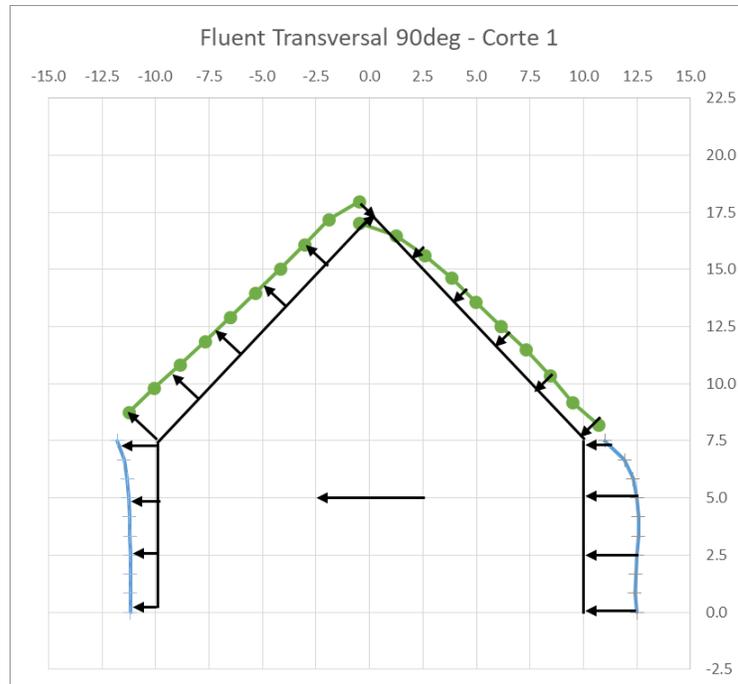


Figura 28 Resultados com vento a 90 graus do CP no Corte 1



Figura 29 Resultados com vento a 90 graus do CP no Corte 2

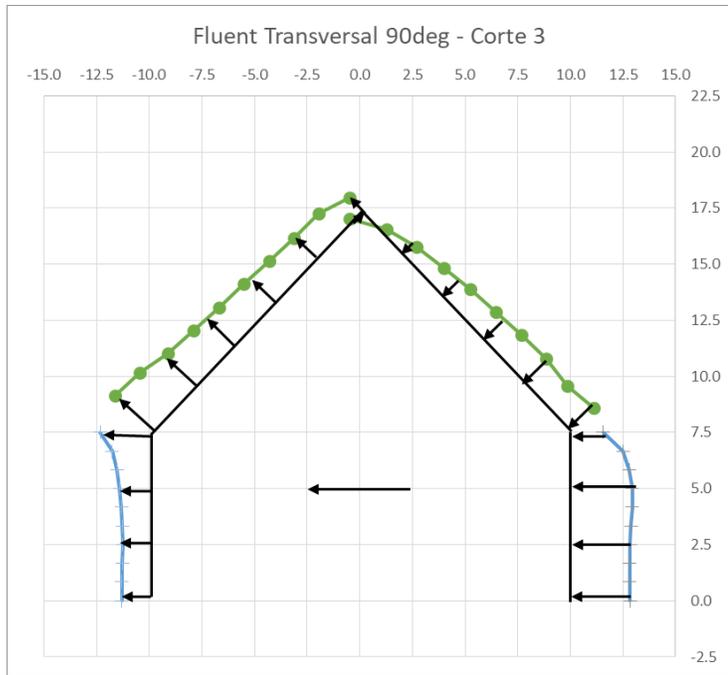


Figura 30 Resultados com vento a 90 graus do CP no Corte 3

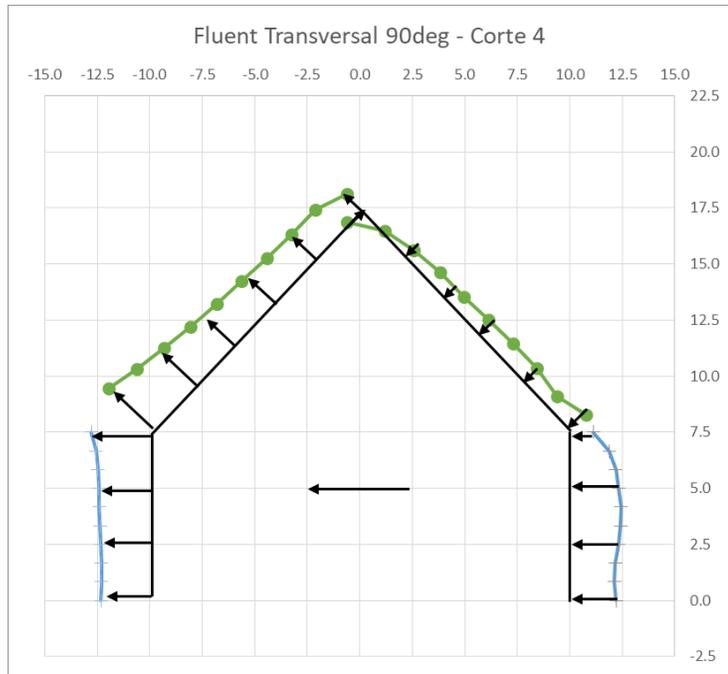


Figura 31 Resultados com vento a 90 graus do CP no Corte 4

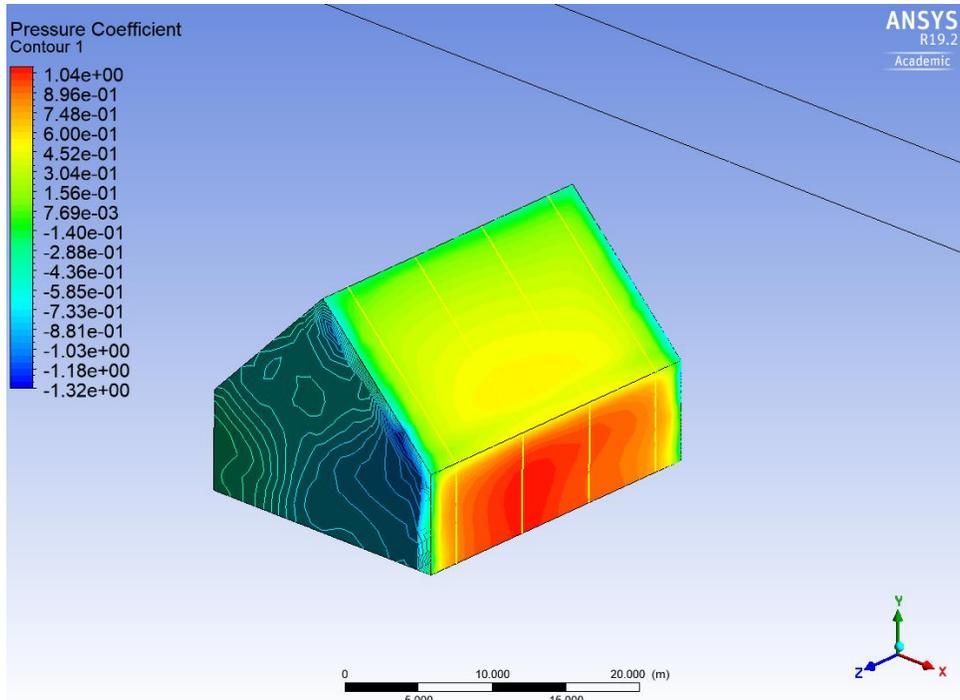


Figura 32 Resultados do coeficiente de pressão na edificação para vento a 90 graus.

5. Ensaio no túnel de vento

Ao lado das instalações da Escola Politécnica está o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), instituto voltado para a pesquisa que possui o maior túnel de vento da América Latina. Os alunos fizeram uma visita às instalações em 13/11 para conhecer o equipamento e sua operação. O túnel está ativado desde 2002, possui 40 metros de comprimento e permite a realização de análises aerodinâmicas em edifícios, navios, veículos, aeronaves e etc.



Figura 33. Túnel de vento do IPT (Fotografia tirada em 13/12/2018).

A maquete é posicionada com o auxílio de uma mesa giratória que permite que a medição se repita para vento a 0, 45 e 90 graus. As 32 tomadas de pressão são conectadas à equipamentos de que captam às pressões efetivas nos pontos de tomada de pressão.

Além dessas 32 medições, uma medição na parede do túnel (Antena de Pitot-Prandtl) registrou a pressão estática atuando nas paredes do tubo durante o ensaio ($q' = 102,9 \text{ N/m}^2$).

Assim sendo, basta dividir a pressão efetiva do arquivo de resultados pela pressão dinâmica q para obtenção dos coeficientes de pressão. No entanto, não se pode utilizar a pressão dinâmica $q' = 102,9 \text{ N/m}^2$ pois esta foi medida a uma altura H muito acima da maquete.

A pressão dinâmica é obtida por meio de um fator de conversão f dado a seguir em função da altura de nossa maquete tomada como $H=175 \text{ mm}$.

$$f=0,0186 \cdot H^{(0,569)} = 0.35$$

Portanto a pressão estática na parede do tubo será:

$$Q = f \cdot q' = 0.35 \cdot 102.9 = 36.2 \text{ Pa}$$

A seguir os resultados de pressão estática obtida nas tomadas de pressão e o valor equivalente do coeficiente de pressão são apresentados para os três ensaios.

Para esse ensaio, os pontos foram reagrupados

5.1. Resultados à 0°

Resultado do ensaio à 0°		
Pt. Medição	Pressão Estática	CP
1	-39.8	-1.10
2	-29.9	-0.83
3	-15.0	-0.42
4	-10.6	-0.29
11	-41.1	-1.14
12	-25.0	-0.69
13	-13.1	-0.36
14	-9.4	-0.26
21	27.3	0.75
22	25.4	0.70
23	29.9	0.83
31	-12.4	-0.34
32	-13.0	-0.36
33	-12.0	-0.33
41	-46.5	-1.29
42	-33.0	-0.91
43	-16.1	-0.45
44	-10.7	-0.30
45	-51.6	-1.43
46	-30.5	-0.84
47	-13.4	-0.37
48	-9.9	-0.27
51	-52.9	-1.46
52	-27.0	-0.75
61	-48.5	-1.34
62	-27.9	-0.77
63	-12.8	-0.35
64	-8.8	-0.24
68	-9.2	-0.26
67	-11.2	-0.31
66	-27.7	-0.77
65	-50.9	-1.41

5.2. Resultados à 90°

Resultado do ensaio à 90°		
Pt. Medição	Pressão Estática	CP
1	19.3	0.53
2	27.7	0.77
3	27.5	0.76
4	16.6	0.46
11	-23.9	-0.66
12	-22.5	-0.62
13	-23.4	-0.65
14	-25.5	-0.70
21	-19.4	-0.54
22	-41.4	-1.14
23	-40.8	-1.13
31	-22.8	-0.63
32	-47.0	-1.30
33	-42.9	-1.19
41	17.1	0.47
42	23.5	0.65
43	22.8	0.63
44	13.2	0.37
45	9.5	0.26
46	12.7	0.35
47	11.6	0.32
48	7.1	0.20
51	2.3	0.06
52	6.4	0.18
61	-29.6	-0.82
62	-28.9	-0.80
63	-29.0	-0.80
64	-30.5	-0.84
68	-28.0	-0.77
67	-25.8	-0.71
66	-26.5	-0.73
65	-27.0	-0.75

5.3. Resultados à 45°

Resultado do ensaio à 45°		
Pt. Medição	Pressão Estática	CP
1	19.3	0.53
2	13.9	0.38
3	8.0	0.22
4	-2.3	-0.06
11	-27.1	-0.75
12	-29.6	-0.82
13	-28.6	-0.79
14	-25.7	-0.71
21	4.2	0.12
22	18.9	0.52
23	14.5	0.40
31	-23.9	-0.66
32	-20.9	-0.58
33	-22.7	-0.63
41	15.3	0.42
42	9.3	0.26
43	3.5	0.10
44	-5.2	-0.14
45	7.9	0.22
46	1.2	0.03
47	-2.7	-0.08
48	-8.7	-0.24
51	0.1	0.00
52	-3.2	-0.09
61	-28.7	-0.79
62	-30.6	-0.85
63	-31.3	-0.87
64	-32.0	-0.89
68	-31.9	-0.88
67	-30.2	-0.84
66	-30.3	-0.84
65	-28.6	-0.79

6. Comparação e análise dos resultados

Os resultados para vento aplicado à 0 e 90 graus foi comparado segundo as três metodologias apresentadas e os valores do coeficiente de pressão calculados nos 32 pontos mencionados anteriormente são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 12. Tabela resumo dos CPs obtidos com a variação destes em relação ao valor normativo.

Vento à 0 graus						Vento à 90 graus					
Index	Norma	Fluent	(%Var)	Ensaio	(%Var)	Index	Norma	Fluent	(%Var)	Ensaio	(%Var)
1	-0.90	-0.90	0%	-1.10	22%	1	0.70	0.86	22%	0.53	-24%
2	-0.50	-0.94	88%	-0.83	66%	2	0.70	1.09	55%	0.77	9%
3	-0.43	-0.92	116%	-0.42	-2%	3	0.70	0.96	38%	0.76	9%
4	-0.43	-0.43	1%	-0.29	-31%	4	0.70	0.81	15%	0.46	-35%
11	-0.90	-0.85	-6%	-1.14	26%	11	-0.50	-0.40	-20%	-0.66	32%
12	-0.50	-0.87	74%	-0.69	38%	12	-0.50	-0.34	-32%	-0.62	24%
13	-0.43	-0.92	116%	-0.36	-15%	13	-0.50	-0.43	-15%	-0.65	30%
14	-0.43	-0.49	16%	-0.26	-39%	14	-0.50	-0.79	59%	-0.70	41%
21	0.70	1.00	43%	0.75	8%	21	-0.90	-1.00	11%	-0.54	-40%
22	0.70	1.00	43%	0.70	0%	22	-0.50	-0.70	40%	-1.14	129%
23	0.70	1.08	54%	0.83	18%	23	-0.70	-0.85	21%	-1.13	61%
31	-0.50	-0.21	-58%	-0.34	-32%	31	-0.50	-0.60	20%	-0.63	26%
32	-0.50	-0.21	-58%	-0.36	-28%	32	-0.90	-0.91	1%	-1.30	45%
33	-0.50	-0.15	-70%	-0.33	-34%	33	-0.70	-0.81	16%	-1.19	69%
41	-0.80	-1.09	36%	-1.29	61%	41	0.20	0.30	52%	0.47	137%
42	-0.80	-1.21	51%	-0.91	14%	42	0.20	0.52	162%	0.65	225%
43	-0.65	-0.86	33%	-0.45	-31%	43	0.20	0.51	155%	0.63	216%
44	-0.65	-0.18	-73%	-0.30	-54%	44	0.20	0.30	50%	0.37	83%
45	-0.80	-1.35	69%	-1.43	78%	45	0.20	0.16	-22%	0.26	31%
46	-0.80	-1.22	52%	-0.84	5%	46	0.20	0.26	28%	0.35	76%
47	-0.65	-0.41	-38%	-0.37	-43%	47	0.20	0.22	12%	0.32	60%
48	-0.65	-0.08	-87%	-0.27	-58%	48	0.20	0.16	-19%	0.20	-2%
51	-0.80	-1.37	71%	-1.46	83%	51	0.20	0.05	-76%	0.06	-68%
52	-0.80	-1.15	44%	-0.75	-7%	52	0.20	0.13	-36%	0.18	-12%
61	-0.80	-1.11	39%	-1.34	68%	61	-0.50	-0.48	-3%	-0.82	64%
62	-0.80	-1.22	52%	-0.77	-4%	62	-0.50	-0.50	0%	-0.80	60%
63	-0.65	-0.75	15%	-0.35	-46%	63	-0.50	-0.58	15%	-0.80	61%
64	-0.65	-0.19	-71%	-0.24	-62%	64	-0.50	-0.65	30%	-0.84	69%
65	-0.65	-0.09	-86%	-0.26	-61%	65	-0.50	-0.49	-2%	-0.77	55%
66	-0.65	-0.30	-54%	-0.31	-53%	66	-0.50	-0.43	-15%	-0.71	43%
67	-0.80	-1.30	63%	-0.77	-4%	67	-0.50	-0.39	-22%	-0.73	47%
68	-0.80	-1.35	69%	-1.41	76%	68	-0.50	-0.39	-23%	-0.75	49%

Pode-se notar que praticamente não há ocorrência de incoerências de sinal, o que garante que o comportamento geral das pressões aplicadas é sempre coerente para todos os métodos. Alguns valores divergem fortemente (>100%) mas apenas em pontos isolados como nas tomadas de pressão 42 e 43 do ensaio de 90 graus e 3 e 13 do ensaio de 0 graus. Nesses casos há um aumento no módulo da sucção observada no ponto para o ensaio do túnel de vento e a análise com o Fluent.

6.1. Comparação para resultados de vento aplicado a 0°

Selecionamos a seção transversal 1 (Corte 1) da Figura 21 para comparar os diferentes CPs obtidos bem como uma análise da planta do edifício e do CP encontrado nas paredes. Os resultados são apresentados e comentados nas figuras abaixo:

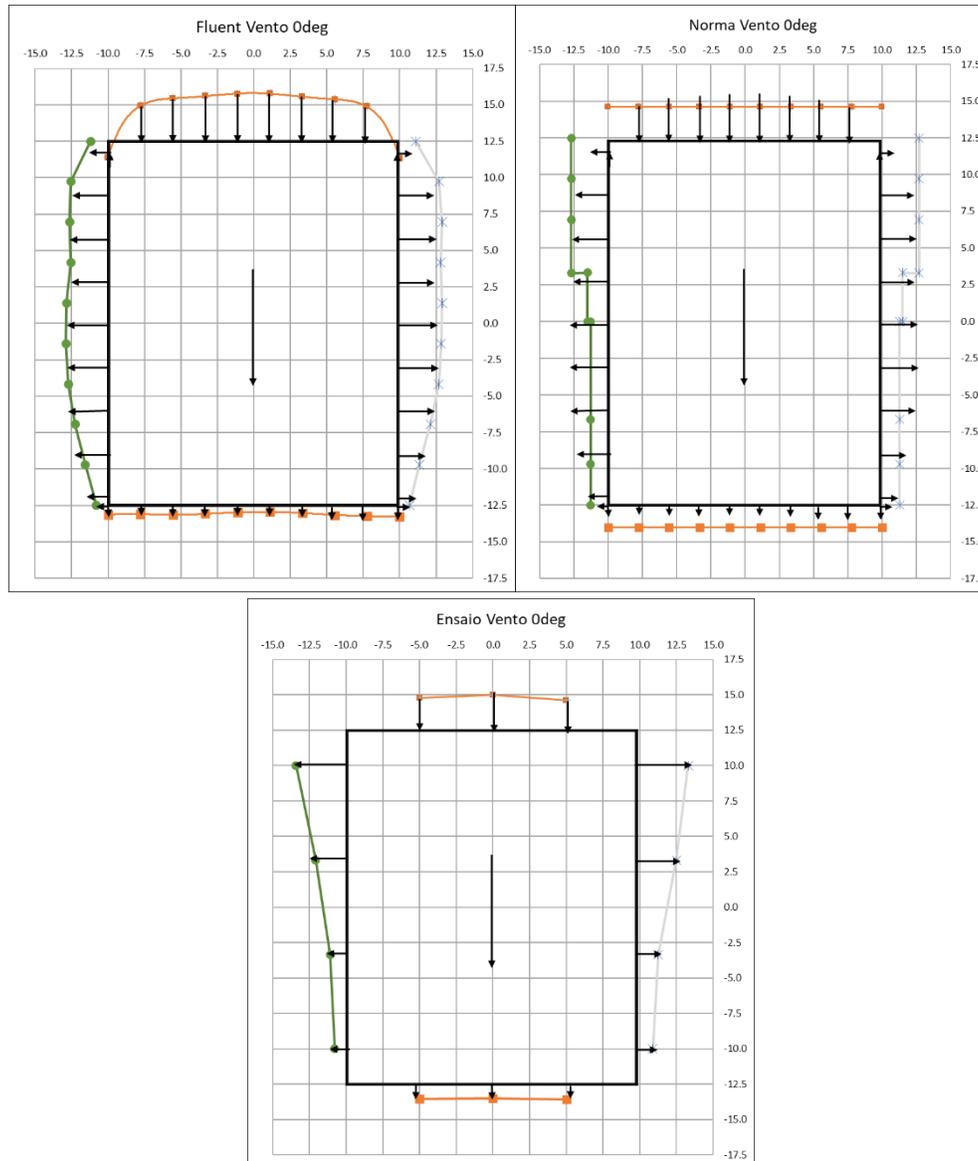


Figura 34. CP nas paredes para os diferentes métodos (Caso de vento a 0 graus).

O padrão observado é muito semelhante para os diferentes métodos. A sucção é mais acentuada na região próxima ao barlavento. Um CP positivo é encontrado na seção de barlavento e negativo na seção de sota-vento.

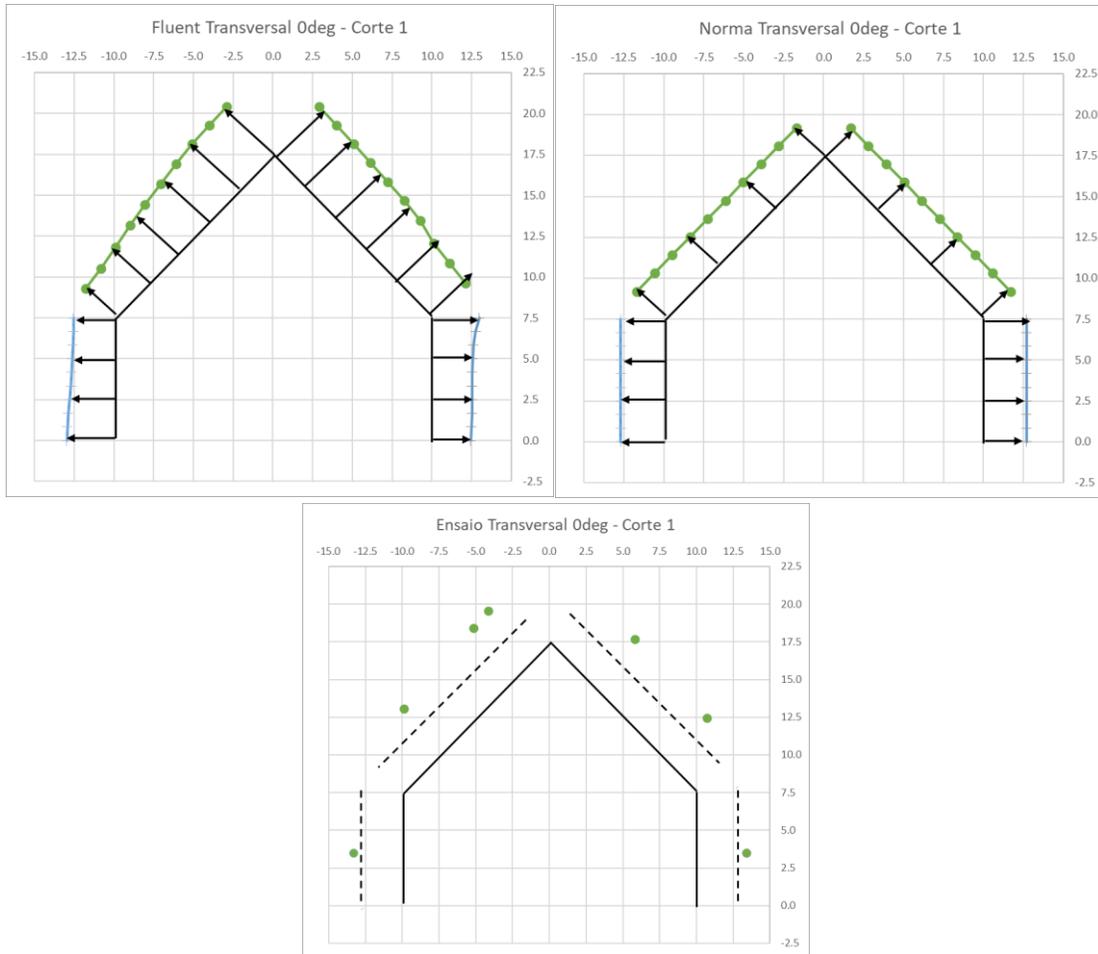


Figura 35. CP no corte 1 para os diferentes métodos (Caso de vento a 0 graus).

O padrão observado é semelhante, sucção ($CP < 0$) em todas as quatro faces. Os valores do ensaio e do Fluent são superiores ao da norma em módulo.

6.2. Comparação para resultados de vento aplicado a 90°

Repetimos a mesma análise agora para o vento aplicado a 90 graus. Os resultados em planta podem ser observados na Figura 36.

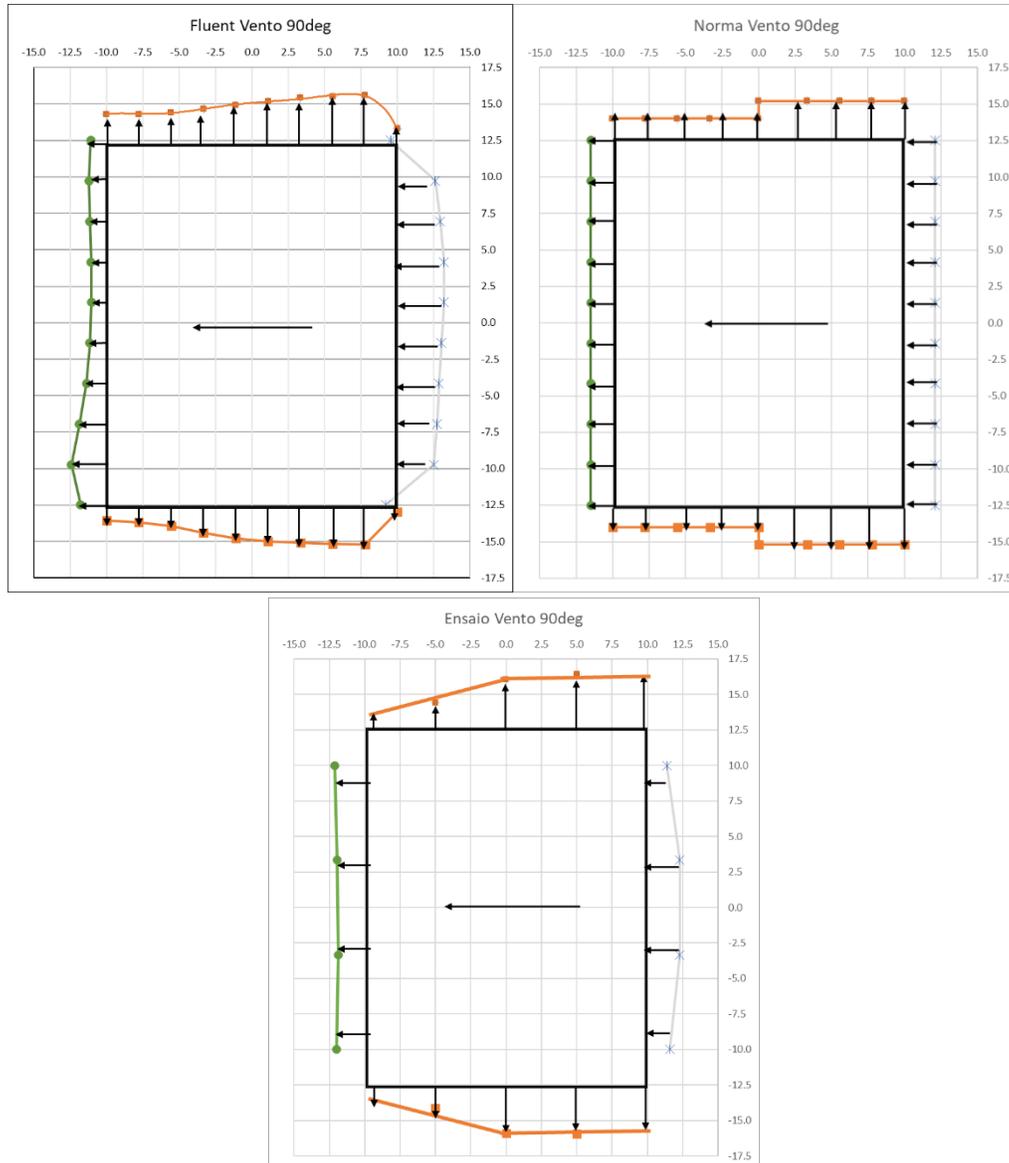


Figura 36. CP nas paredes para os diferentes métodos (Caso de vento a 90 graus).

O padrão observado é novamente semelhante para os diferentes métodos. A sucção é mais acentuada na região próxima ao barlavento que agora é a face com maiores dimensões da edificação. Um CP positivo é encontrado na seção de barlavento e negativo na seção de sotavento. As análises com o Fluent e o ensaio permitem concluir que o perfil no barlavento não é constante como suposto pela norma, mas apresenta um valor superior no centro da face.

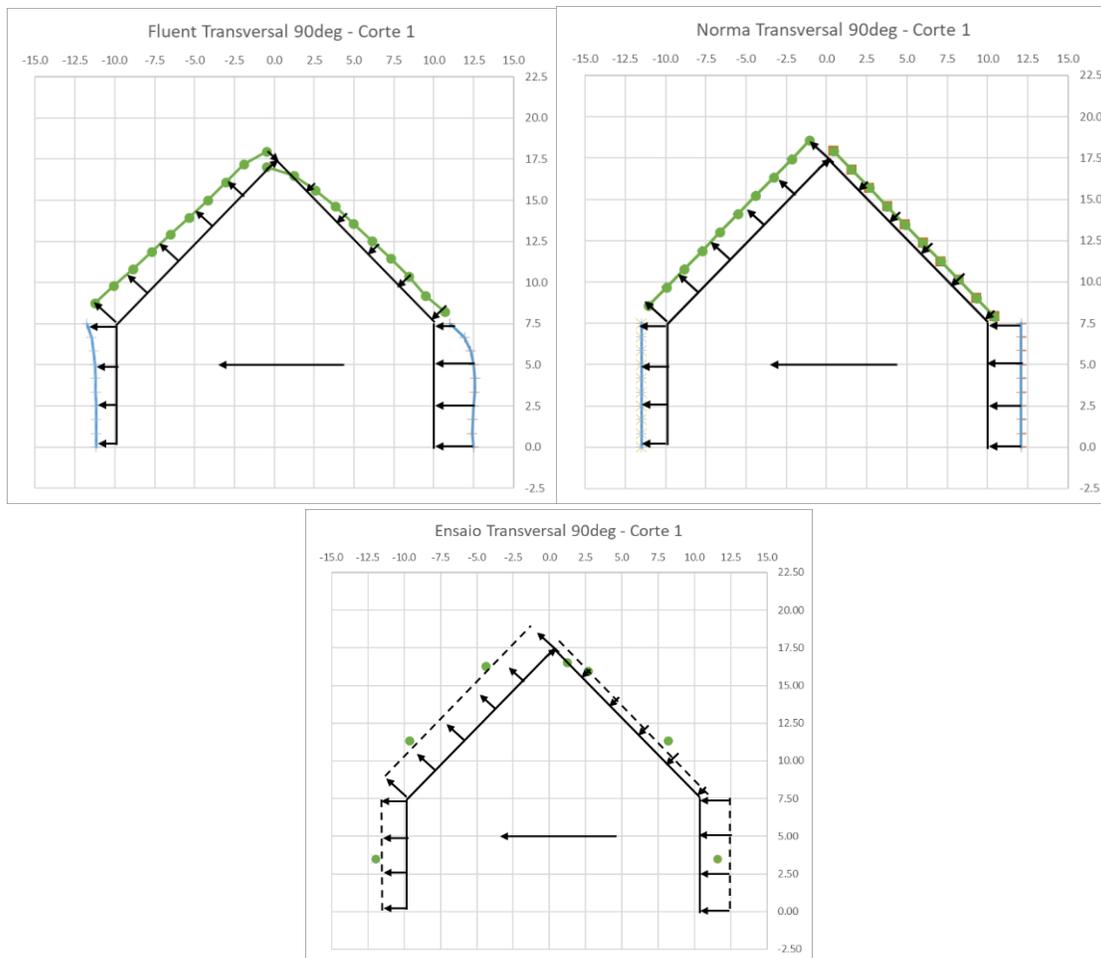


Figura 37. CP no corte 1 para os diferentes métodos (Caso de vento a 90 graus).

Observamos que devido à inclinação do telhado, o CP na face inclinada é inferior ao da parede e isso se verifica tanto para o valor normativo, quanto para as análises. Para esta seção, vemos que os valores da norma são bem semelhante aos encontrados, apresentando desvios pequenos.

7. Conclusão

O trabalho desenvolvido na disciplina PEF 3522 - Ação do Vento nas Edificações permitiu aos alunos a compreensão do efeito dos ventos em edificações de geometria simples.

Além de realizar uma análise segundo a norma, como ocorre geralmente nos escritórios de cálculos os alunos entraram em contato com a modelagem numérica do fenômeno do escoamento e também de um ensaio em um túnel de vento com um corpo de prova de dimensões reduzidas.

Observou-se que a grande vantagem de realizar esse tipo de ensaio, é que se pode obter o coeficiente de pressão em diversos pontos da edificação e não apenas o seu valor médio, conforme apresentado na norma.

Foi observado que para a maioria dos casos isso resultou em um aumento do CP observado nos pontos analisados. Esses efeitos talvez sejam desprezíveis para a análise de uma edificação simples, porém quando o projeto toma proporções maiores, ou mesmo geometrias mais complexas fica claro que a execução de ensaios ou modelagens completas pode enriquecer as informações disponíveis aos engenheiros sobre os efeitos dos ventos nas edificações.

A coerência entre os resultados normativos e os resultados oriundo das modelagens físicas e numéricas foi observada. Raramente houve inversão de sinal do CP, ou seja, o perfil de distribuição foi em geral muito semelhante para os três métodos analisados.

Alguns desafios e questões seguem em aberto para futuras investigações, um deles é como considerar os efeitos das pressões internas nos ensaios, pois não se conhece a área das frestas e como realizar ensaios que vão além das limitações do túnel de vento, ou seja, considerando fenômenos como downburst, vento térmico e etc.

Vento à 0 graus						Vento à 90 graus					
Index	Norma	Fluent	(%Var)	Ensaio	(%Var)	Index	Norma	Fluent	(%Var)	Ensaio	(%Var)
1	-0.90	-0.90	0%	-1.10	22%	1	0.70	0.86	22%	0.53	-24%
2	-0.50	-0.94	88%	-0.83	66%	2	0.70	1.09	55%	0.77	9%
3	-0.43	-0.92	116%	-0.42	-2%	3	0.70	0.96	38%	0.76	9%
4	-0.43	-0.43	1%	-0.29	-31%	4	0.70	0.81	15%	0.46	-35%
11	-0.90	-0.85	-6%	-1.14	26%	11	-0.50	-0.40	-20%	-0.66	32%
12	-0.50	-0.87	74%	-0.69	38%	12	-0.50	-0.34	-32%	-0.62	24%
13	-0.43	-0.92	116%	-0.36	-15%	13	-0.50	-0.43	-15%	-0.65	30%
14	-0.43	-0.49	16%	-0.26	-39%	14	-0.50	-0.79	59%	-0.70	41%
21	0.70	1.00	43%	0.75	8%	21	-0.90	-1.00	11%	-0.54	-40%
22	0.70	1.00	43%	0.70	0%	22	-0.50	-0.70	40%	-1.14	129%
23	0.70	1.08	54%	0.83	18%	23	-0.70	-0.85	21%	-1.13	61%
31	-0.50	-0.21	-58%	-0.34	-32%	31	-0.50	-0.60	20%	-0.63	26%
32	-0.50	-0.21	-58%	-0.36	-28%	32	-0.90	-0.91	1%	-1.30	45%
33	-0.50	-0.15	-70%	-0.33	-34%	33	-0.70	-0.81	16%	-1.19	69%
41	-0.80	-1.09	36%	-1.29	61%	41	0.20	0.30	52%	0.47	137%
42	-0.80	-1.21	51%	-0.91	14%	42	0.20	0.52	162%	0.65	225%
43	-0.65	-0.86	33%	-0.45	-31%	43	0.20	0.51	155%	0.63	216%
44	-0.65	-0.18	-73%	-0.30	-54%	44	0.20	0.30	50%	0.37	83%
45	-0.80	-1.35	69%	-1.43	78%	45	0.20	0.16	-22%	0.26	31%
46	-0.80	-1.22	52%	-0.84	5%	46	0.20	0.26	28%	0.35	76%
47	-0.65	-0.41	-38%	-0.37	-43%	47	0.20	0.22	12%	0.32	60%
48	-0.65	-0.08	-87%	-0.27	-58%	48	0.20	0.16	-19%	0.20	-2%
51	-0.80	-1.37	71%	-1.46	83%	51	0.20	0.05	-76%	0.06	-68%
52	-0.80	-1.15	44%	-0.75	-7%	52	0.20	0.13	-36%	0.18	-12%
61	-0.80	-1.11	39%	-1.34	68%	61	-0.50	-0.48	-3%	-0.82	64%
62	-0.80	-1.22	52%	-0.77	-4%	62	-0.50	-0.50	0%	-0.80	60%
63	-0.65	-0.75	15%	-0.35	-46%	63	-0.50	-0.58	15%	-0.80	61%
64	-0.65	-0.19	-71%	-0.24	-62%	64	-0.50	-0.65	30%	-0.84	69%
65	-0.65	-0.09	-86%	-0.26	-61%	65	-0.50	-0.49	-2%	-0.77	55%
66	-0.65	-0.30	-54%	-0.31	-53%	66	-0.50	-0.43	-15%	-0.71	43%
67	-0.80	-1.30	63%	-0.77	-4%	67	-0.50	-0.39	-22%	-0.73	47%
68	-0.80	-1.35	69%	-1.41	76%	68	-0.50	-0.39	-23%	-0.75	49%