

Efeitos do Vento Sobre Painéis Fotovoltaicos Aplicados Em Coberturas de Edifícios - Martifer Solar

Rúben Augusto Gomes da Cunha Barbosa

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Eng. José Manuel Laginha Mestre da Palma

Orientador na Martifer Solar: Eng. José Carlos Amador

VERSÃO PROVISÓRIA



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

2013-01-21

À minha família

Resumo

A indústria fotovoltaica aposta, actualmente, no fator da diferenciação, de modo a ganhar vantagem competitiva face à forte concorrência existente no mercado global. A Martifer Solar apresenta-se como uma empresa que aposta continuamente na inovação e desenvolvimento dos seus produtos de modo a garantir que os mesmos sejam os mais eficientes e competitivos.

A análise do escoamento atmosférico sobre edifícios assume particular importância aquando da caracterização das instalações fotovoltaicas em coberturas. As técnicas de cálculo utilizadas neste trabalho resultam da apreciação do Eurocódigo 1 - Acções em Estruturas mais concretamente as constantes na secção 1-4: Acções do Vento. No entanto, em casos específicos, e dado o carácter generalista desta norma, a mesma pode revelar-se insuficiente tornando-se indispensável o recurso a métodos auxiliares como aqueles que se baseiam na análise computacional. Desta forma, recorreu-se à utilização da aplicação Ansys Fluent e ao modelo de turbulência $k-\varepsilon$ *Standart* que tem por base a formulação Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS).

O presente trabalho propõe um modelo de calibração de um edifício que visa o estudo de vários parâmetros que permitam uma aproximação às várias aplicações comerciais usadas. Este passo permitiu verificar a influência da dimensão do volume de controlo e do refinamento geral e local da malha nos resultados obtidos.

O passo seguinte consistiu em simulações tendo em conta a direcção e intensidade do escoamento sobre a cobertura do edifício e sobre o painel fotovoltaico tendo este último sido sujeito a diversas inclinações. De seguida foram analisados os coeficientes de pressão na cobertura bem como as forças resultantes nas superfícies do painel.

Os painéis fotovoltaicos quando submetidos a ventos com direcção de 180° apresentam resultados instáveis devido a intersecções com o escoamento incidente.

Os resultados numéricos em comparação com o Eurocódigo EC1 revelam diferentes valores principalmente na zona *I*.

Wind Effects on Photovoltaic Panels applied on Flat Rooftops - Martifer Solar

Abstract

The photovoltaic industry bets currently in the factor of differentiation in order to gain competitive advantage in the face of strong competition in the global market. Martifer Solar presents itself as a company that invests in innovation and continuous development of its products to ensure that they are the most efficient and competitive.

The analysis of the atmospheric flow over buildings is particularly important when characterization of photovoltaic systems on roofs. The calculation techniques used in this study result from the assessment of Eurocode 1 - Actions on Structures specifically those contained in the section 1-4: Wind Actions. However, in specific cases, and given the general character of this standard, it may be insufficient becoming indispensable the use helper methods like those based on the computational analysis. Thus, we resorted to using the application Ansys Fluent and $k-\varepsilon$ *Standart* turbulence model that is based on the Reynolds-Averaged Navier Stokes formulation (RANS).

This paper proposes a calibration model of a building which aims to study various parameters which enable an approach to use various commercial applications. This step verifies the influence of the size of the volume control and refinement of mesh local and general the results obtained.

The next step in simulations take account the intensity and direction of flow on the roof of the building and on the photovoltaic panel latter having been subject to various inclinations. Next the pressure coefficients in coverage and the resultant forces on the surface of the panel were analyzed.

When subjected to wind direction of 180° the photovoltaic panels present unstable results due to the intersections with the incident flow.

The numerical results compared with Eurocode EC1 shows different values in particularly those in zone *I*.

Agradecimentos

Quero agradecer ao professor José Manuel Laginha Mestre da Palma pela orientação e transmissão de conhecimentos que me proporcionou. Ao Eng.º José Carlos Amador pela oportunidade concedida de realizar este projeto na Martifer Solar bem como todos os conselhos e apoio que me foi dando durante este período.

À minha família, principalmente aos meus pais, irmã e Diana pela força transmitida na conclusão de mais uma fase na minha vida.

A todos que partilharam comigo o gabinete de *I&D+I* na Martifer Solar, em especial o Eng. Rui Garcia e o meu companheiro de trabalho e amigo Leandro.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	2
1.1	Apresentação da Martifer Solar.....	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do Relatório.....	3
2	Equações Fundamentais – Modelo Computacional	4
2.1	Introdução	4
2.2	Equações Governativas	5
2.2.1	Conservação da Massa – equação da continuidade	5
2.2.2	Equação de quantidade de movimento	5
2.3	Modelo de Turbulência.....	6
2.3.1	Modelo k-ε Standart.....	6
3	Introdução Ao Eurocódigo.....	7
3.1	Introdução	7
3.2	Definição de velocidades	8
3.3	Turbulência do vento.....	9
3.4	Pressão Dinâmica de Pico	9
3.5	Coeficientes de Pressão em Terraços	9
4	Modelo Calibração	10
4.1	Introdução	10
4.2	Pré-Processamento	11
4.2.1	Direção e Intensidade vento	11
4.2.2	Volume de Controlo e Condições de Fronteira	11
4.2.3	Tipo de malha e critério de convergência	13
4.2.4	Distância Adimensional Wall y^+	13
4.2.5	Intensidade da Turbulência.....	14
4.2.6	Rácio de Viscosidade de Turbulenta	14
4.3	Pós-Processamento	14
4.3.1	Análise de malha	14
4.3.2	Análise de y^+	15
4.3.3	Contornos de Velocidade e pressão.....	15
4.4	Conclusões	17
5	Modelação Final	18
5.1	Introdução	18
5.2	Pré-processamento.....	19
5.2.1	Descrição do Problema.....	19
5.2.2	Definição do volume de controlo.....	19
5.2.3	Definição de malha e critério de convergência	19
5.2.4	Definição das condições de fronteira	19
5.2.5	Localização do painel fotovoltaico na cobertura	19
5.2.6	Força Resultante e Centro de Gravidade	20
5.2.7	Perfil de velocidades.....	20
5.3	Pós-Processamento	20
5.3.1	Análise do volume de controlo.....	20

5.3.2	Verificação de y^+ e critério de convergência	21
5.3.3	Fenómenos na Cobertura	21
5.3.4	Fenómenos no Pannel Fotovoltaico.....	25
5.3.5	Inserção de Platibanda	29
5.3.6	Fluent vs Eurocódigo	31
6	Conclusões e perspetivas de trabalho	33
7	Referências e Bibliografia	36
ANEXO A:	Soluções Martifer Solar	38
ANEXO B:	Orientação de eixos e modelos de apoio	39
ANEXO C:	Eurocódigo.....	40

Siglas

$C_0(z)$	Fator de orografia
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Parâmetros do modelo de turbulência
C_{dir}	Fator de direcção
$C_e(z)$	Coefficiente de exposição
$C_r(z)$	Fator de rugosidade
C_{season}	Fator de época
G_k, G_b	Produção de energia cinética de turbulência
$I_v(z)$	Intensidade de turbulência
k_r	Coefficiente do terreno
q_b	Pressão dinâmica de referência
q_p	Pressão dinâmica de pico
u^*	Velocidade de fricção
$v_{b,0}$	Velocidade base fundamental do vento
v_b	Velocidade base do vento a 10 m do solo
$v_m(z)$	Velocidade média do vento
w_e	Pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores
z_0	Comprimento de rugosidade
z_{max}	Altura máxima segundo EC1
z_{min}	Altura mínima segundo EC1
μ_t	Viscosidade turbulenta
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Parâmetros do modelo de turbulência
DNS	Simulação Direta
EC1	Eurocódigo 1 – Ações em estruturas; Parte 1-4 Ações gerais do vento
EN	Norma Europeia
F_{res}	Força resultante
FV	Fotovoltaico
G, H, I	Zonas do terraço segundo EC1
h	Altura do edifício
I	Intensidade turbulenta

<i>I&D+I</i>	Investigação, Desenvolvimento & Inovação;
<i>k</i>	Energia cinética turbulenta
<i>K_s</i>	Rugosidade em altura
<i>k-ε Standart</i>	Modelo de turbulência
L	Dimensão a jusante do edifício
LES	Large Eddy Simulation
NDP	Nationally Determined Parameters
O	Origem do sistema de eixos
R	Dimensão do telhado
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
Re	Número de Reynolds
S	Dimensão a montante do edifício
T	Altura de volume de controlo
V	Velocidade do vento
<i>y</i>	Distância do centro do elemento à parede
<i>y⁺</i>	Distância normal em em coordenadas de parede
<i>α</i>	Inclinação do terraço
<i>β</i>	Ângulo de sombreamento
<i>ε</i>	Taxa de dissipação
<i>ν</i>	Viscosidade cinemática
<i>ρ</i>	Massa volúmica
<i>ψ</i>	Sentido do vento

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Dimensões do volume de controlo	12
Tabela 4.2 - Dimensão dos elementos de malha	13
Tabela 4.3 - Refinamento de malha vs custo computacional	14
Tabela 4.4 - Verificação de $y +$	15
Tabela 5.1 - Força Resultante na cobertura livre.....	21
Tabela 5.2 - Localização da Força Resultante na Cobertura	22
Tabela 5.3 - Força Resultante (N) na cobertura com um painel – vento 0°	23
Tabela 5.4 - Divergência (%) da força resultante na cobertura com a inserção de um painel face à cobertura sem nenhum painel – vento 0°	23
Tabela 5.5 - Localização (m) da Força resultante na cobertura com a inserção de um painel – vento 0°	23
Tabela 5.6 - Força Resultante (N) na cobertura com um painel - vento 180°	24
Tabela 5.7 - Divergência em (%) na cobertura com a inserção de um painel – vento 180°	24
Tabela 5.8 - Localização (m) da Força resultante na cobertura com painel – vento 180°	25
Tabela 5.9 - Força no topo do painel	26
Tabela 5.10 - Força na base do painel	26
Tabela 5.11 - Força resultante (N) no painel	26
Tabela 5.12 - Localização da Força resultante no painel – vento 0°	26
Tabela 5.13 - Força no topo do painel	27
Tabela 5.14 - Força na base do painel	27
Tabela 5.15 - Força Resultante no Painel	27
Tabela 5.16 - Localização da Força resultante no painel – vento 180°	27
Tabela 5.17 - Análise de resultados com platibanda	29
Tabela 5.18 - Centro de gravidade da força resultante na cobertura com platibanda e sem platibanda	30
Tabela 5.19 - Centro de gravidade da força resultante no painel fotovoltaico numa cobertura com platibanda e sem platibanda.....	30

1 Introdução

Actualmente as técnicas usadas para a caracterização dos fenómenos que ocorrem nos painéis fotovoltaicos em coberturas baseiam-se em normas europeias designadas Eurocódigos. Estas normas são baseadas em estudos teóricos e experimentais, assumindo as mesmas um carácter generalista para as diversas aplicações. Alguns projetos assumem uma componente mais complexa sendo por isso necessário um estudo pormenorizado para o qual os métodos analíticos não são na maior parte das vezes viáveis devido ao princípio da turbulência. A aplicação Ansys Fluent através dos seus modelos de turbulência tem a capacidade de resolver as várias equações da quantidade de movimento, continuidade e energia por quais a dinâmica de fluídos se rege.

No âmbito da dissertação do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica na opção de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel foi apresentada uma proposta de trabalho por parte da Martifer Solar para o estudo do efeito do vento sobre painéis fotovoltaicos em coberturas.

1.1 Apresentação da Martifer Solar

A Martifer Solar S.A., é uma empresa que foi constituída em 1990 na Zona Industrial de Oliveira de Frades, Portugal e desempenha uma forte e sustentada liderança no mercado fotovoltaico apresentando soluções FV 360° chave na mão. Estas soluções englobam as seguintes fases do processo: Desenvolvimento, Consultoria Financeira, Gestão do Projeto, Produção de equipamento Solar FV, Construção, Operação e Manutenção (O&M).

Este projecto foi desenvolvido no departamento de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (*I&D+I*) sendo o principal objectivo deste gabinete o estudo e desenvolvimento de soluções inovadoras. O *I&D+I* é composto por uma equipa que promove a inovação e desenvolvimento da criação contínua de produtos em diversos segmentos de negócio: Solo, Instalações em coberturas, BIPV/Integração arquitectónica, Micro/ Minigeração, Off-Grid e Parques de estacionamento. Estas soluções podem ser visíveis no Anexo A – Figura 2.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal a simulação do escoamento do vento sobre um painel fotovoltaico com várias inclinações na cobertura de um edifício exposto a diversos níveis de velocidade.

Uma análise do EC1 e das várias técnicas numéricas disponíveis na aplicação Ansys Fluent foram traçadas como objetivo para a obtenção das forças resultantes e respetivo deslocamento do centro de gravidade no painel fotovoltaico.

1.3 Organização do Relatório

A dissertação está organizada segundo seis capítulos onde no presente capítulo 1 é explicado onde é realizado o projeto bem como os objetivos inicialmente propostos.

O capítulo 2 consiste na apresentação das equações fundamentais e do modelo de turbulência usado na análise do problema proposto.

O capítulo 3 proporciona uma aproximação com as seções usadas para a análise de coberturas segundo o EC1. Este capítulo centraliza-se na definição das zonas do telhado consideradas e das pressões do vento em edifícios comparados com a simulação computacional (FLUENT).

O capítulo 4 propõe um modelo de calibração permitindo uma aquisição de sensibilidade face aos programas usados para a criação do domínio, geração de malha e opções possíveis de alteração na aplicação Fluent. Os campos de velocidades e pressões foram analisados de modo a ter uma percepção dos fenómenos que ocorrem na cobertura.

O capítulo 5 é a modelação final, sendo o painel fotovoltaico submetido a várias inclinações tendo em conta as diversas velocidades do vento. Os resultados finais apresentam-se em forma de força resultante e variação do centro de gravidade com a ajuda de figuras que ilustram os campos de pressão e velocidade.

A parte final da dissertação consiste no capítulo 6, onde são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros com base nos resultados obtidos.

2 Equações Fundamentais – Modelo Computacional

2.1 Introdução

As equações da quantidade de movimento, continuidade e energia são as equações por quais a dinâmica de fluídos se orienta. A turbulência é um princípio descrito pelas equações de Navier-Stokes em que a maior parte das vezes não é viável por via de simulação numérica e depende fortemente dos requisitos do computador. O processo mais utilizado é a média Reynolds (que para todos os efeitos práticos é o tempo médio) das equações resultando na média das equações de Reynolds-Navier-Stokes (RANS). Por este processo todas as estruturas de turbulência são eliminadas do escoamento e uma variação suave da média de velocidades e campos de pressões podem ser obtidos. Contudo, o processo médio introduz termos desconhecidos na equação de transporte, tensões e fluxos de Reynolds, que precisam de ser dados pela escolha apropriada do modelo de turbulência.

Para o cálculo numérico dos escoamentos turbulentos são usados modelos de turbulência baseados em métodos como LES (Large Eddy Simulation) e RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) pois tornam-se mais simplificados em comparação com as equações governativas que se baseiam em métodos de simulação direta (DNS).

A leitura do Ansys Fluent Help torna-se uma ajuda imprescindível na análise contribuindo com linhas de orientação fundamentais na escolha dos vários parâmetros.

2.2 Equações Governativas

2.2.1 Conservação da Massa – equação da continuidade

A equação da continuidade é a forma matemática da conservação da massa, quando aplicada a uma partícula de fluido num escoamento podendo ser definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (2.1)$$

em ρ é a massa volúmica e U_i é a velocidade aplicando-se para um escoamento compressível. Quando o escoamento se apresenta incompressível, $\partial \rho / \partial t \approx 0$ as variações de massa são desprezíveis tomando a equação da continuidade a forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

2.2.2 Equação de quantidade de movimento

A segunda lei de Newton estabelece para sistemas que a taxa de variação temporal da quantidade de movimento do sistema é igual à soma das forças externas que atuam no sistema. A substituição do tensor das tensões viscosas pela relação entre a tensão e taxa de deformação para um fluido Newtoniano onde as propriedades físicas são independentes da direção considerada, a equação do balanço da quantidade de movimento Navier-Stokes escreve-se da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.3)$$

Desenvolvendo a equação (2.3) obtemos a expressão segundo três componentes:

Em x,

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

Em y,

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

Em z ,

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

2.3 Modelo de Turbulência

2.3.1 Modelo k - ε Standart

O modelo k - ε Standart é uma dos modelos de turbulência mais usados sendo caracterizado pela sua economia, robustez e precisão para uma grande variedade de fluxos turbulentos. Este modelo é um dos pertencentes ao método RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes* e é modelado através das equações de transporte da energia cinética turbulenta (k) e da sua taxa de dissipação (ε).

A modelação da viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

A energia cinética turbulenta, k , e a taxa de dissipação, ε , são obtidas através das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

onde:

G_k - Produção de energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes e se obtém por:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (2.10)$$

G_b Produção de energia cinética de turbulência devido à flutuação;

Y_M Contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação;

σ_k e σ_ε Número de Prandtl para k e ε , respetivamente;

S_k e S_ε Parâmetros definidos pelo utilizador.

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

3 Introdução Ao Eurocódigo

3.1 Introdução

Segundo Carlos Pina [6], os Eurocódigos Estruturais constituem um conjunto de Normas Europeias (EN) para o projeto de estruturas de edifícios e de outras obras de engenharia civil, realizadas com diferentes materiais. As NP EN (XX EN nos outros países europeus) correspondem a uma tradução para a língua portuguesa das diferentes partes dos Eurocódigos e são acompanhadas pelos respetivos Anexos Nacionais. Nestes Anexos são definidos, nomeadamente, os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP – Nationally Determined Parameters), que correspondem a parâmetros deixados em aberto nos Eurocódigos para escolha nacional.

Os Eurocódigos permitem-nos uma uniformização da regulamentação bem como uma facilidade na troca de serviços de engenharia e ferramentas de projeto.

O Eurocódigo para a acção sobre estruturas é o EN 1991 – Eurocódigo 1 - Acção em estruturas, sendo este dividido em dez seções:

- EN 1991-1-1: Pesos volúmicos, pesos próprios e sobrecargas
- EN 1991-1-2: Acções em estruturas expostas ao fogo
- EN 1991-1-3: Acções da neve
- EN 1991-1-4: Acções do vento
- EN 1991-1-5: Acções térmicas
- EN 1991-1-6: Acções durante a construção
- EN 1991-1-7: Acções de acidente
- EN 1991-2: Acções de tráfego em pontes
- EN 1991-3: Acções devidas a gruas e equipamentos
- EN 1991-4: Acções em silos e reservatórios

3.2 Definição de velocidades

Para o cálculo da velocidade média do vento a uma altura acima do solo segundo o Eurocódigo é necessário ter em conta alguns factores como a rugosidade do terreno a analisar, a orografia e a velocidade de referência do vento. A velocidade de referência do vento, v_b , deve ser calculada de acordo com:

$$v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0} \quad (3.1)$$

onde:

v_b é a velocidade base do vento a 10 m do solo, para um terreno de categoria II;

$v_{b,0}$ é a velocidade base fundamental do vento;

C_{dir} é o factor de direcção (valor recomendado 1.0);

C_{season} é o factor de época (valor recomendado 1.0).

A definição da velocidade base do vento permite definir a velocidade média do vento a uma altura acima do solo através da seguinte expressão:

$$v_m(z) = C_r(z) \times C_0(z) \times v_b \quad (3.2)$$

em que:

$C_0(z)$ é o factor de orografia assumindo este um aumento em zonas onde existe por exemplo colinas e falésias;

$C_r(z)$ é o factor de rugosidade que tem em conta a variação da velocidade média do vento na localização do obstáculo dependendo esta da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção. Através da análise do Eurocódigo, este refere que o fator de rugosidade se baseia num perfil de velocidades logarítmico dado pela expressão:

$$C_r(z) = k_r \times \ln \frac{z}{z_0} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.2)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min} \quad (3.3)$$

sendo k_r o coeficiente do terreno que depende da rugosidade do terreno z_0 .

$$k_r = 0.19 \times \frac{z_0^{0.07}}{z_{0,II}} \quad (3.4)$$

z_0 assume-se como o comprimento de rugosidade;

z_{min} altura definida pelo em anexo C à qual se considera que a velocidade se apresenta constante;

z_{max} representa o valor máximo que contempla o EC1 sendo considerado igual a 200 metros.

3.3 Turbulência do vento

Segundo o EC1, a intensidade de turbulência do vento pode ser calculada por:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{C_{0(z)} \times \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.5)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min} \quad (3.6)$$

onde k_I representa o coeficiente de turbulência com um valor recomendado de 1.

3.4 Pressão Dinâmica de Pico

A pressão dinâmica de pico à altura z , pode ser caracterizada pela seguinte fórmula:

$$q_p = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = C_e(z) \times q_b \quad (3.7)$$

onde a massa volúmica do ar ρ , tem um valor de 1.25 kg/m^3 , $C_e(z)$ é o coeficiente de exposição.

A pressão dinâmica de referência é caracterizada por:

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (3.8)$$

3.5 Coeficientes de Pressão em Terraços

Para a definição dos coeficientes de pressão em terraços a inclinação (α) da cobertura tem de estar compreendida entre $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$. O EC1 permite a divisão da cobertura de um edifício em forma de paralelepípedo por várias zonas definindo localmente coeficientes de pressão. A divisão da geometria a considerar em terraços está representada através da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, considerando e como o menor valor entre a largura b ou duas vezes a altura do edifício h . Os respectivos coeficientes variam conforme o tipo de cobertura aplicada e área carregada como se pode ver na tabela2 do anexoC.

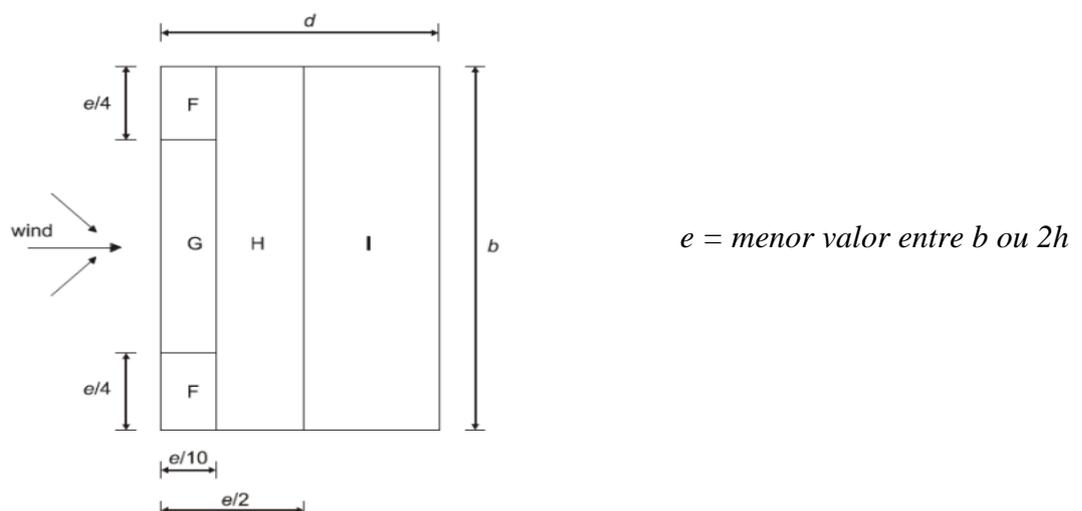


Figura 3.1 - Zonas do terraço segundo EC1

4 Modelo Calibração

4.1 Introdução

A aplicação *FLUENT* oferece uma grande variedade de ferramentas desde a construção de malhas (*ICEM-CFD*) até poderosos modelos de turbulência tornando possível uma análise o mais realista possível.

Este capítulo promove a aproximação aos programas que irão ser utilizados bem como a aquisição de sensibilidade relativamente a cada um deles. Foi usado neste modelo de calibração apenas o edifício sem nenhum painel fotovoltaico de modo a ser perceptível os fenómenos que ocorrem em redor do mesmo. Para a resolução de um estudo com recurso a uma análise fluido dinâmica é necessário considerar determinados parâmetros e previamente defini-los para se proceder a uma análise estruturada. Podemos estruturar este capítulo da seguinte maneira:

- Definição das variáveis em estudo: altura do edifício, comprimento da cobertura, direção e velocidade do vento;
- Modelação do volume de controlo: modelação do volume de controlo em 2D usando o software Rhinoceros 4.0;
- Tipo de malha: geração de malha em *ICEM CFD*, efeito da dimensão da malha e diversos refinamentos nos resultados obtidos;
- Condições de fronteira: definição das condições de fronteira no domínio;
- Modelo de turbulência: escolha do modelo de turbulência;
- Análise de resultados: campos de velocidades e pressões

4.2 Pré-Processamento

4.2.1 Direção e Intensidade vento

Os ventos incidentes sobre o edifício no modelo de calibração apresentam uma velocidade de $V = 35 \text{ m/s}$ com uma direção de $\psi = 0^\circ$ representada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

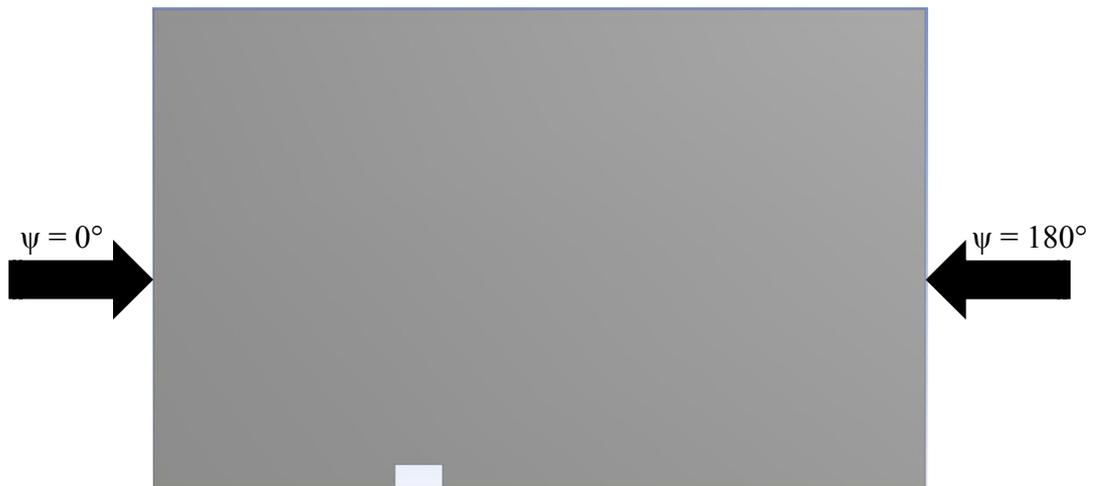


Figura 4.1 - Sentido de escoamento

4.2.2 Volume de Controlo e Condições de Fronteira

A dimensão do volume de controlo é um dos parâmetros que mais influencia o custo computacional pois em excesso levará tempo desnecessário. De modo a criar parâmetros variáveis conforme cada análise diminuindo assim esse mesmo custo computacional, foi definido o comprimento de entrada como dez vezes a altura do edifício e o de saída como vinte vezes. O comprimento de saída é superior ao de entrada devido à esteira ter espaço suficiente para se desenvolver no escoamento e não existindo deste modo 'reversed flow'. O comprimento do telhado foi assumido como duas vezes a altura do edifício e a altura do volume de controlo como vinte vezes.

Alguns modelos anteriores ao de calibração foram realizados de modo a garantir que estas dimensões do volume de controlo não interferissem as condições de escoamento que desejamos. Apesar desta pré-definição inicial de valores face ao volume de controlo que criamos é possível que o mesmo volume tenha de ser alterado devido a condições de escoamento diferentes e às diversas inclinações do painel. Isto torna o nosso processo mais iterativo sendo necessário verificar com especial atenção o desenvolvimento do escoamento ao longo do nosso volume de controlo.

Tabela 4.1 - Dimensões do volume de controlo

Zona	Dimensões(m)
<i>S</i>	$10 * h$
<i>h</i>	3
<i>L</i>	$20 * h$
<i>T</i>	$20 * h$
<i>R</i>	$2 * h$

O Ansys Fluent exige a definição das condições de fronteira para cada análise a realizar de modo a obter o escoamento o mais adaptado a cada situação de estudo. Para a superfície de entrada 'Inlet' optou-se por definir a velocidade de entrada do escoamento como Velocity-Inlet atribuindo um perfil de velocidades uniforme. Em termos de fronteira de saída 'Outlet' admitiu-se como Outflow sendo assim as condições extrapoladas a partir de interior do volume escolhido. As restantes zonas como a altura do edifício, zona a barlavento e sotavento do edifício foram definidas como Wall onde se verifica condição de escorregamento é nula. O teto foi admitido como Symmetry devido à geometria de interesse e o padrão de fluxo da solução já ser o esperado obtendo-se assim um espelho de simetria da zona interior. O modelo de turbulência utilizado foi o modelo $k-\varepsilon$ standart associado a uma formulação estacionária, isto é, independente do tempo.

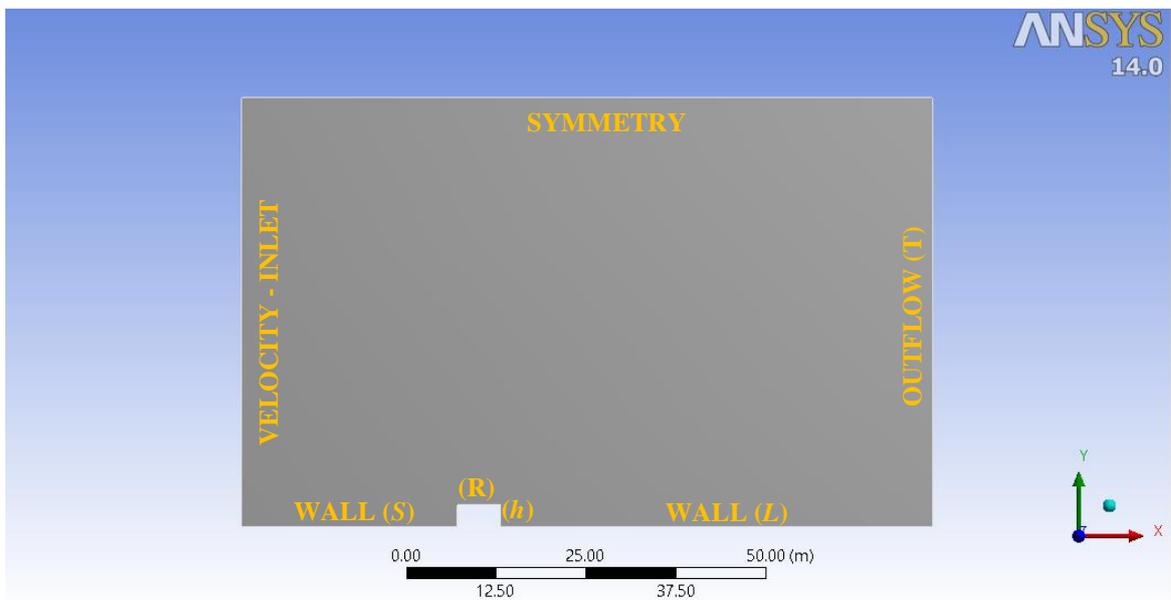


Figura 4.2 - Condições de fronteira

4.2.3 Tipo de malha e critério de convergência

Para a escolha do tipo de malha a utilizar sem esquecer o benefício do refinamento/custo computacional foi realizada uma calibração para o modelo em que o edifício não apresenta nenhum painel fotovoltaico. O tipo de malha utilizada foi isotrópica não estruturada onde foram feitos refinamentos locais de modo a obter a melhor precisão tendo sempre como principal preocupação as limitações do computador utilizado. A justificação do refinamento a montante do edifício deve-se ao desenvolvimento do escoamento desde a entrada até ao obstáculo e a jusante devido aos efeitos de esteira presentes. Durante este processo foram estudadas várias variáveis de modo a verificar a interveniência de cada uma nos resultados finais. Os valores da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** são referentes às dimensões dos elementos de malha usados tanto a nível do domínio geral como local.

O critério de convergência geral para os valores residuais foi de 10^{-5} podendo em alguns casos prolongarem-se até 10^{-7} .

Tabela 4.2 - Dimensão dos elementos de malha

<i>Malha</i>	<i>Domínio Geral</i> (<i>m</i>)	<i>R</i> (<i>m</i>)	<i>H</i> (<i>m</i>)	<i>S</i> (<i>m</i>)	<i>L</i> (<i>m</i>)	<i>Nós</i>
1	1	0.03	0.03	0.03	0.03	44620
2	0.3	0.06	0.06	0.3	0.3	68794
3	0.3	0.01	0.01	0.3	0.3	80428
4	0.3	0.01	0.01	0.1	0.1	85196
5	0.3	0.01	0.01	0.03	0.03	109528

4.2.4 Distância Adimensional Wall y^+

O valor de y^+ é um número adimensional como o número de Reynolds Re , que verifica a influência das células junto à parede se estas são laminares ou turbulentas. Este valor indica a parte da camada limite turbulenta que resolve na primeira camada de volume junto da parede.

Podemos definir a equação relativa ao y^+ como:

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad (4.1)$$

onde ν é a viscosidade cinemática, y é a distância do centro do elemento à parede e u^* é a velocidade de fricção.

Os valores de y^+ para o caso de escoamentos turbulentos como se sucede neste caso de estudo localizam-se entre $30 < y^+ < 300$ tendo por base o estudo realizado por Salim et. Al [14].

4.2.5 Intensidade da Turbulência

Podemos caracterizar a intensidade turbulenta, I , como a razão do desvio quadrático médio da flutuação da velocidade, u' , com a velocidade média do escoamento, u . Um valor de aproximadamente 1% é usado para definir intensidade da turbulência baixa e para intensidades elevadas são usados valores superiores a 10 %. Podemos caracterizar a intensidade de turbulência como:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (4.2)$$

O valor usado para a intensidade de turbulência foi de 10% assumido por defeito pelo Ansys Fluent.

4.2.6 Rácio de Viscosidade de Turbulenta

Segundo [16], o rácio de viscosidade turbulenta, u_t/u , é directamente proporcional ao número de Reynolds turbulento. Este rácio relaciona a viscosidade turbulenta, u_t , com a viscosidade laminar u . Tipicamente os parâmetros de turbulência são definidos entre:

$$1 < \frac{u_t}{u} < 10 \quad (4.3)$$

O rácio pré-assumido pelo *Fluent* foi de 10%.

4.3 Pós-Processamento

4.3.1 Análise de malha

É possível verificar através do presente estudo de malha e com base em estudos anteriores como o de Raciti Castelli et. al [11] que a variação do tamanho dos respectivos elementos da malha e refinamentos locais pouco alteram o resultados finais. Através desta análise podemos concluir que um maior refinamento a montante, local e a jusante do edifício não influencia os valores da força resultante aumentando o tempo entre iterações e de convergência. Apesar de esse refinamento não influenciar a partir de um certo nível a solução é importante considerá-lo devido à forma como o escoamento se irá desenvolver como pudemos ver na seção 4.2.3.

Tabela 4.3 - Refinamento de malha vs custo computacional

<i>Iterações</i>	<i>F_{res}</i>	<i>Tempo</i>
	(<i>N</i>)	(<i>MIN</i>)
4729	-3810	51
3844	-4030	52
3984	-3979	118
4313	-3914	120
7463	-3995	204

4.3.2 Análise de y^+

Este valor de y^+ permite uma orientação na escolha do tipo de modelo de turbulência bem como a verificação de se a malha escolhida apresenta o rigor correto. Nas malhas que não cumprem estes requisitos foram obtidos valores y^+ na ordem dos 10^3 . Considera-se a malha 4 rigorosa pois na zona onde o refinamento foi elaborado os resultados estão compreendidos entre $40 < y^+ < 150$. O Ansys Fluent permite a regular este critério automaticamente através da sua função Adapt Yplus sendo que faz automaticamente a adaptação da malha em questão. Esta função não foi utilizada sendo cada malha e refinamento realizado manualmente no software *ICEM CFD*[®] permitindo assim uma maior sensibilização e controlo dos vários parâmetros em análise.

Tabela 4.4 - Verificação de y^+

<i>Malha</i>	$30 < y^+ < 300$
1	<i>Não cumpre</i>
2	<i>Não cumpre</i>
3	<i>Pouco rigoroso</i>
4	<i>Rigoroso</i>
5	<i>Rigoroso</i>

4.3.3 Contornos de Velocidade e pressão

Após o estudo anterior dos vários parâmetros estamos aptos para proceder à análise do escoamento do vento sobre as várias zonas mais com especial atenção para a cobertura do edifício. **A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** a) demonstra que a zona de separação da camada limite está bem definida afectando principalmente a zona envolvente e posterior à qual se procedeu a um refinamento mais cuidado e correto na seção 4.1.3. As linhas de velocidade da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** b) demonstram a zona de recirculação junto à coberta onde a velocidade é muito baixa ou quase nula

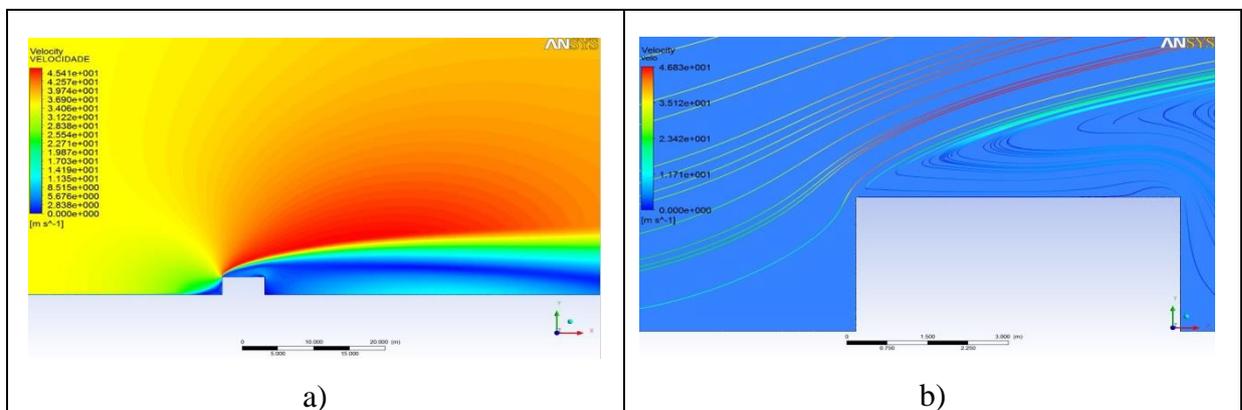


Figura 4.3 - Contorno dos valores da velocidade a) Linhas de velocidade b)

A pressão estática relativa no topo do edifício sofre uma inversão de valores face à zona frontal do edifício não se verificando na cobertura forças de pressão mas forças ascendentes de arrancamento. Através dos contornos de pressão do edifício constata-se que a pressão sofre pequenas flutuações de valor mantendo-se praticamente constante. É visível um ligeiro aumento no final da cobertura devido à zona de recirculação que se encontra assinalada com um círculo a vermelho.

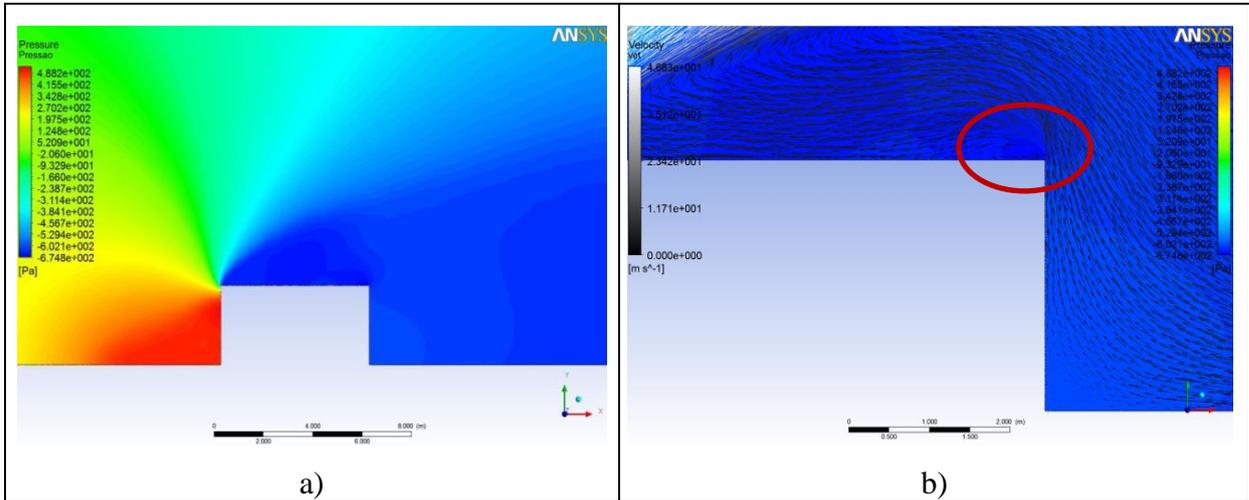


Figura 4.4 - Contornos da pressão em torno do edifício a) Zona de recirculação no final da cobertura b)

Com base na análise computacional, o Fluent permite a extracção de resultados sobre a forma de um relatório sendo possível uma análise recorrendo a gráficos mais detalhados sobre cada zona. **A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** demonstra a distribuição da pressão que ocorre na cobertura face à velocidade de incidência do vento a 35 m/s. Verifica-se a ocorrência do ponto de estagnação na parte inicial onde a pressão se torna mais elevada e a velocidade do fluido é nula. Essa diferença de pressões provoca uma diminuição da velocidade do fluido.

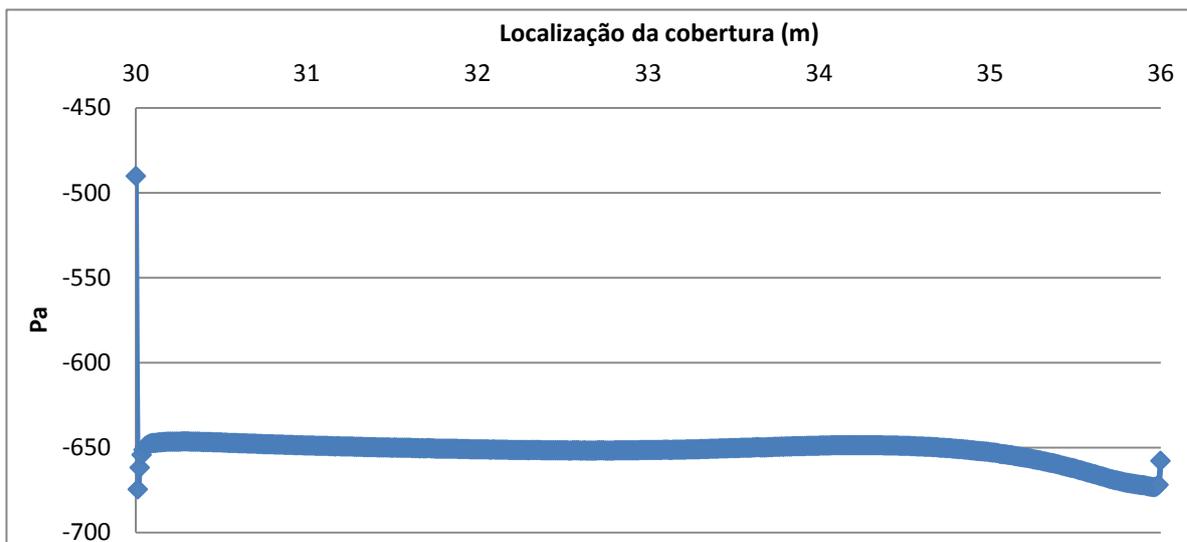


Figura 4.5 - Distribuição da Pressão Estática na Cobertura

4.4 Conclusões

O estudo dos vários parâmetros permitiu o ganho de sensibilidade face aos programas bem como a ajuda imprescindível na criação dos vários protótipos. É possível verificar que o volume de controlo é um ponto extremamente importante pois caso não seja bem definido poderá levar à ocorrência de erros expressivos bem como um elevado tempo de simulação. O uso do Ansys Fluent Help [15], permitiu definir as condições de fronteira mais apropriadas ao nosso caso.

As várias simulações contemplando malhas com níveis de refinamento diferentes permitiram concluir que um refinamento excessivo não se reflecte em melhoria de resultados mas em tempo de convergência mais elevados. Apesar disso, é fundamental um refinamento bem localizado nas zonas envolventes ao obstáculo de modo a respeitar os valores de y^+ . O critério de convergência geral para os resíduos foi estabelecido em 10^{-5} .

Os resultados que o Ansys Fluent nos fornece permitem verificar graficamente os vários fenómenos que ocorrem no edifício e se os vários parâmetros previamente definidos estão correctamente aplicados.

5 Modelação Final

5.1 Introdução

A seção presente consiste na análise concreta do nosso caso de estudo colocando-se o painel fotovoltaico com vários ângulos de inclinação na cobertura de um edifício sujeito à incidência do vento segundo diferentes direcções e intensidades.

Podemos dividir esta seção em duas partes principais:

- A fase de pré-processamento tem por base a definição e escolha correta de todas as variáveis que influenciam a solução final servindo o modelo de calibração com uma importante ferramenta de auxílio nesta etapa;
- A fase de pós-processamento que consiste primeiramente na verificação correta dos inputs considerados na fase de pré-processamento sendo de seguida analisada a força resultante e localização do seu centro de gravidade tanto na cobertura como no painel fotovoltaico. O uso de platibanda foi também alvo de estudo mas apenas para uma inclinação do painel fotovoltaico e velocidade do vento, de modo a verificar as vantagens e desvantagens da sua integração. Por fim, foram comparados os resultados obtidos na cobertura livre através das simulações numéricas (*FLUENT*) com os valores do EC1.

5.2 Pré-processamento

5.2.1 Descrição do Problema

As simulações do escoamento sobre a cobertura e painel englobam as direções do vento a 0 e 180 graus para um edifício com a altura de três metros. O painel fotovoltaico apresenta as dimensões de 1639 x 982 x 35 mm e irá ser testado com inclinações de 10°, 20° e 30° quando a velocidade do vento atinge velocidades de pico de 19.21 m/s, 32.01 m/s, 44.82 m/s definidas conforme os cálculos baseados no EC1.

5.2.2 Definição do volume de controlo

O domínio em estudo será conforme o referido no modelo de calibração em que a altura do edifício é de três metros e a cobertura duas vezes esse valor. O comprimento a montante do edifício é de dez vezes a altura do obstáculo e a jusante de vinte vezes.

5.2.3 Definição de malha e critério de convergência

A malha usada é a que apresenta o número 4 conforme o modelo de calibração sendo obtido um refinamento para o domínio geral e local segundo os valores da tabela 2 da seção 4.3. O critério de convergência geral assumido para os valores residuais foi de 10^{-5} .

5.2.4 Definição das condições de fronteira

As condições de fronteira do volume de controlo usadas na modelação final seguem os mesmos contornos das usadas no modelo de calibração visível na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** da seção 4.1.2.

5.2.5 Localização do painel fotovoltaico na cobertura

A localização do painel fotovoltaico no telhado tem em conta o ângulo de sombreamento de $\beta = 15^\circ$ existente entre obstáculos. Para definir a localização do referido painel na cobertura assumimos a existência de um obstáculo com uma altura de um metro na zona inicial do telhado. Essa distância assume um valor de 3.73 m tendo em conta este procedimento.

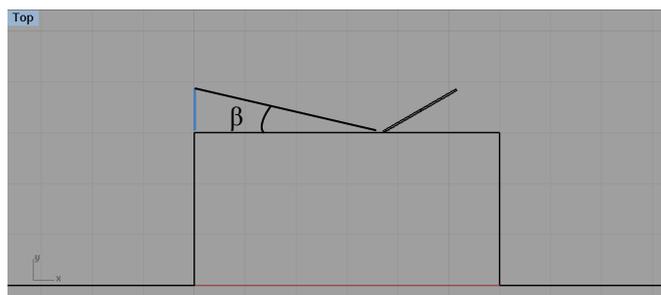


Figura 5.1 - Localização do painel fotovoltaico segundo o ângulo de sombreamento

5.2.6 Força Resultante e Centro de Gravidade

A orientação da força resultante obtida é sempre perpendicular às superfícies que estão a ser alvo de análise. De modo a uniformizar a localização do centro de gravidade da força resultante, todos os valores obtidos tanto para a incidência do vento a 0° e 180° são contabilizados tendo em conta o início da cobertura assumindo esse ponto as coordenadas $O(0,0)$. Ver anexo B.

5.2.7 Perfil de velocidades

De modo a controlar a variação da velocidade em altura obtendo esta um perfil logarítmico como está caracterizado no EC1 a definição da condição de parede Wall no Fluent é extremamente importante. A consideração da rugosidade K_s baixa permite um aumento de velocidade segundo o perfil logarítmico e a obtenção da correta velocidade de pico no topo do edifício.

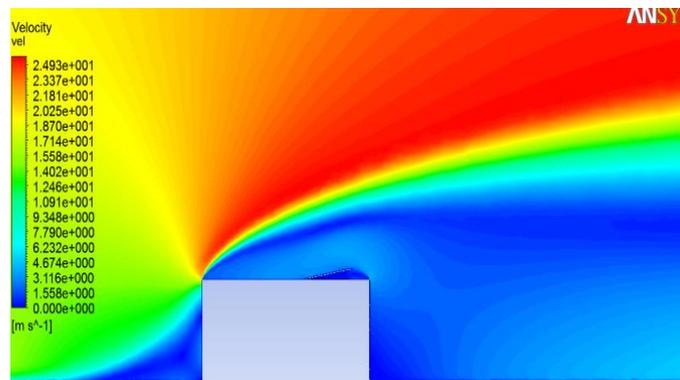


Figura 5.2 - Perfil de velocidades para $V = 19.21$ m/s

5.3 Pós-Processamento

5.3.1 Análise do volume de controlo

O volume de controlo mostrou-se correctamente definido para o caso extremo em que a velocidade assume valores de 44.82 m/s.. Essa afirmação baseia-se no facto domínio a jusante do obstáculo ser suficientemente longo para o escoamento se poder desenvolver.

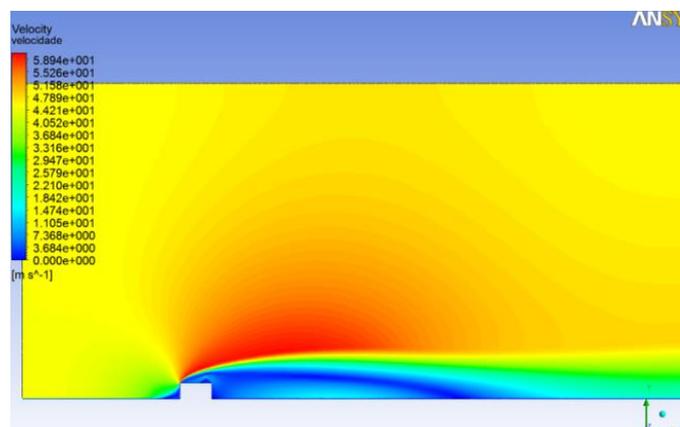


Figura 5.3 - Contorno da velocidade para $v = 44.82$ m/s

5.3.2 Verificação de y^+ e critério de convergência

Os valores de y^+ situam-se entre $70 < y^+ < 250$ na totalidade das análises sendo as diferenças pouco significativas entre diferentes situações de escoamento e inclinação de painel. O critério de convergência geral para os residuais de 10^{-5} mostrou estabilidade tendo sido beneficemente ultrapassado em algumas análises como demonstra a **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** As soluções na sua generalidade convergiram ao final de 4000 iterações tendo demorado aproximadamente 4 horas cada uma.

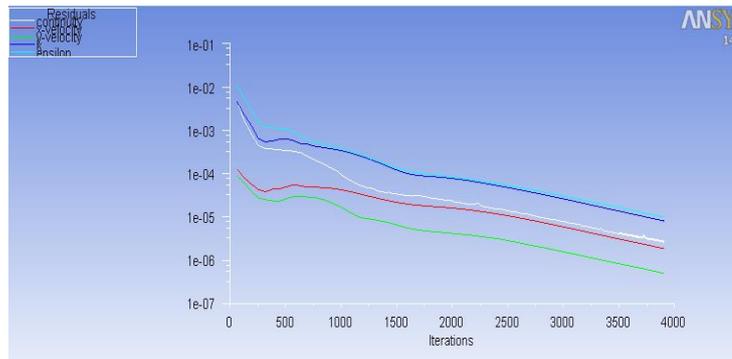


Figura 5.4 - Convergência da solução

5.3.3 Fenómenos na Cobertura

- *Direção do vento 0° e 180°*

Através da análise de resultados em Ansys Fluent podemos obter a força resultante que existe na cobertura face à variação da velocidade do vento sendo igual tanto para a direção de 0° e 180° quando não existem painéis. Toda a zona da cobertura é composta por forças verticais com o sentido ascendente, isto é, forças de sucção. Pode-se constatar que o aumento da força resultante no telhado com o aumento de velocidade assume uma linha de tendência linear como se pode ver na Figura 8. A localização do centro de gravidade da força foi determinada de modo a ter uma percepção se o mesmo varia em função da velocidade e da inserção do painel fotovoltaico na cobertura.

Tabela 5.1 - Força Resultante na cobertura livre

<i>Velocidade do Escoamento</i>	<i>Força Resultante</i>
<i>m/s</i>	<i>N</i>
19.21	-1187
32.01	-3274.60
44.82	-6724.35

Tabela 5.2 - Localização da Força Resultante na Cobertura

<i>Velocidade do Escoamento</i> <i>m/s</i>	<i>Localização da força resultante na cobertura livre</i> <i>m</i>
19.21	3.01
32.01	3.01
44.82	3.01

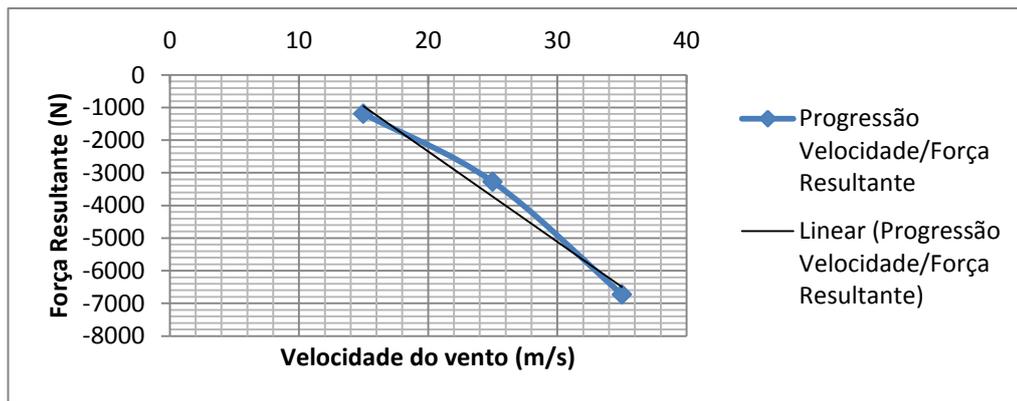


Figura 5.5 - Força Resultante face à velocidade na cobertura

Os contornos da velocidade nos três casos permitem verificar que a forma do escoamento segue um padrão semelhante bem como a presença de uma enorme bolha de separação a jusante do obstáculo provocada pela separação da camada limite. Nessa zona da esteira verifica-se que o escoamento inverte o seu sentido direccionando-se novamente para a zona de entrada devido à acção de um gradiente de pressão adverso (pressão cresce no sentido do escoamento). A extensão da bolha de separação está dependente da altura do edifício como da velocidade de escoamento assumindo um comprimento na ordem de quinze vezes a altura do edifício.

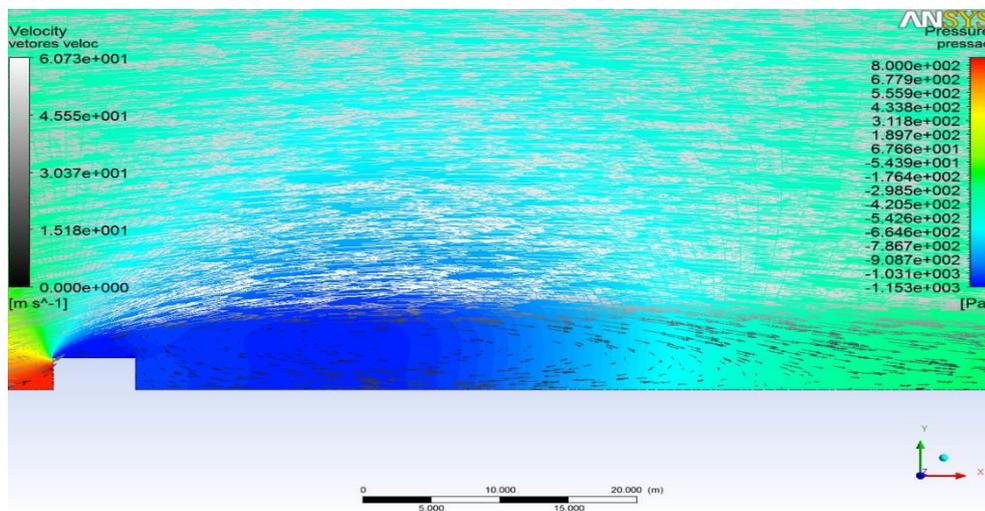


Figura 5.6 - Vetores da velocidade para $v = 44.82$ m/s face à pressão

- Vento a 0° com a presença do painel fotovoltaico

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** caracteriza a força resultante na cobertura quando está presente um painel fotovoltaico. Denota-se que esta não sofre aumento de valores para a mesma velocidade tendo em conta as várias inclinações do painel fotovoltaico quando comparado com a cobertura sem nenhum painel. Com um aumento da inclinação do painel fotovoltaico o centro de gravidade da força resultante mantém-se quase imóvel como se pode verificar através dos valores representados na Tabela 5.5.

Tabela 5.3 - Força Resultante (N) na cobertura com um painel – vento 0°

<i>m/s / °</i>	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>
19.21	-1199	-1196	-1222
32.01	-3299	-3304	-3355
44.82	-6755	-6765	-6784

Tabela 5.4 - Divergência (%) da força resultante na cobertura com a inserção de um painel face à cobertura sem nenhum painel – vento 0°

<i>m/s / °</i>	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>
19.21	1 %	0.8	2.9
32.01	0.8	0.9	2.4
44.82	0.5	0.6	0.9

Tabela 5.5 - Localização (m) da Força resultante na cobertura com a inserção de um painel – vento 0°

<i>m/s / °</i>	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>
19.21	3.01	2.98	2.92
32.01	3.01	2.99	2.94
44.82	3.01	2.99	2.96

- Vento 180° com a presença painel fotovoltaico

A força resultante na cobertura do edifício quando o vento tem a direção de 180° resulta num aumento ligeiro da divergência de valores até 16 % principalmente quando o painel fotovoltaico se encontra com uma inclinação de 20°. Devido a essa inclinação, o painel interfere com uma zona da camada limite onde a velocidade do escoamento é superior dando-se assim uma passagem de fluido para a parte inferior do painel. Gera-se um perfil de velocidades próprio que acompanha a forma entre a cobertura e o painel resulta num aumento da força nessa zona do telhado como é visto na Figura 5.7 b). Este aumento provoca um deslocamento do centro de gravidade da cobertura em 0.40 m para uma zona mais próxima ao painel.

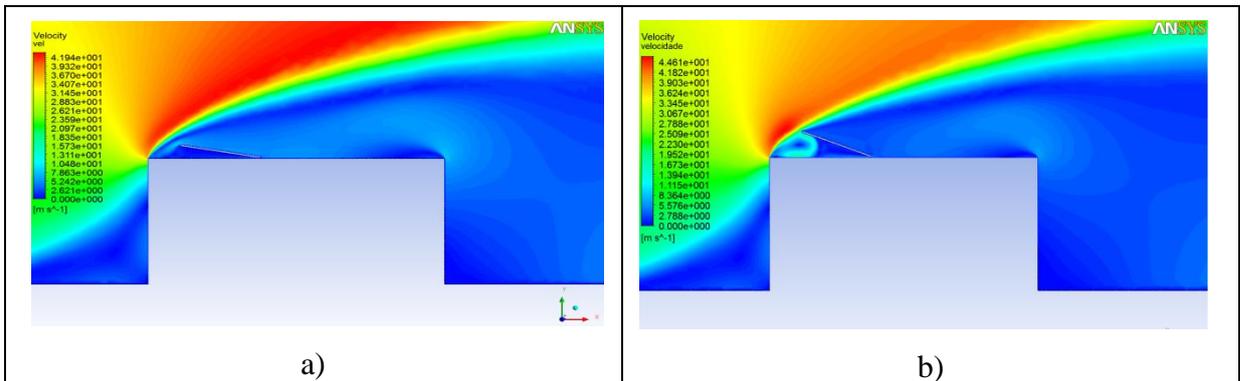


Figura 5.7 - Campo de velocidades para $v=32.01$ m/s na presença de um painel fotovoltaico a 10° a) e 20° b)

Tabela 5.6 - Força Resultante (N) na cobertura com um painel - vento 180°

$m/s / ^\circ$	10	20	30
19.21	-1240	-1356	-1085
32.01	-3376	-3891	-3076
44.82	-6592	-7711	-6109

Tabela 5.7 - Divergência em (%) na cobertura com a inserção de um painel – vento 180°

$m/s / ^\circ$	10	20	30
19.21	4	12	9
32.01	3	16	6
44.82	2	13	9

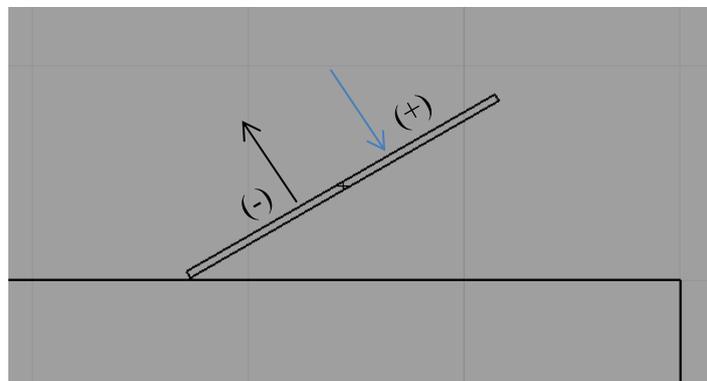
Tabela 5.8 - Localização (m) da Força resultante na cobertura com painel – vento 180°

$m/s / ^\circ$	10	20	30
19.21	3.1	3.32	2.85
32.01	3.07	3.38	2.9
44.82	3.06	3.40	2.93

5.3.4 Fenómenos no Painel Fotovoltaico

Estudados os fenômenos ocorridos na cobertura passa-se ao ponto mais importante que é o cálculo das forças ocorridas na parte superior e inferior do painel fotovoltaico. Esses valores permitem caracterizar a força resultante sendo depois definida a localização do centro de gravidade.

É necessário uma correta compreensão da orientação da força resultante que atua sobre o painel fotovoltaico. Seguindo a orientação da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, considerou-se que a presença de uma força resultante como a orientação da azul (sinal positivo), provoca uma pressão descendente ao painel empurrando este no sentido da cobertura. A força resultante com sinal negativo provoca por sua vez forças ascendentes no painel, isto é, cria um efeito de arrancamento.

**Figura 5.8 - Orientação da força resultante**

- Painel Fotovoltaico com incidência do vento a 0°

Quando o painel fotovoltaico se encontra com uma inclinação de 10° verifica-se que as forças na zona frontal e retaguarda são muito semelhantes sendo que esse equilíbrio leva a uma força resultante quase inexistente. Com o aumento da inclinação do painel e da variação da velocidade, a força entre a zona frontal e da retaguarda torna-se mais expressiva provocando um aumento gradual da resultante. O centro de gravidade da força resultante apresenta-se na generalidade a um metro da zona inicial do painel existindo poucas flutuações de valores.

Tabela 5.9 - Força no topo do painel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	-331	-338	-356
m/s 32.01	-911	-933	-972
44.82	-1865	-1903	-1944

Tabela 5.10 - Força na base do painel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	-330	-321	-313
m/s 32.01	-912	-891	-873
44.82	-1869	-1841	-1795

Tabela 5.11 - Força resultante (N) no painel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	-1	-17	-43
m/s 32.01	1	-41	-99
44.82	4	-62	-150

Tabela 5.12 - Localização da Força resultante no painel – vento 0°

<i>m</i>	10°	20°	30°
19.21	1.1	0.95	0.9
m/s 32.01	1.12	0.95	0.92
44.82	1.4	1	0.95

- Resultados no Pannel Fotovoltaico - Vento 180°

Para inclinações de 10° e 20° o valor da força resultante sobre o pannel fotovoltaico apresenta-se positivo provocando um carregamento caracterizado de uma força descendente. Analisando os resultados obtidos é perceptível que o pannel fotovoltaico com uma inclinação de 30° está numa zona de transição apresentando um comportamento diferente face aos restantes. Este pannel sofre forças ascendentes, arrancamento, pois o valor da pressão na parte superior torna-se superior ao da retaguarda do pannel estando bem visível na demonstração dos contornos da velocidade e pressão da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** A localização do centro de gravidade quando vento incide com uma direção de 180° apresenta valores mais inconstantes próprios da mudança do comportamento da força resultante.

Tabela 5.13 - Força no topo do pannel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	-323	-309	-325
m/s 32.01	-891	-844	-898
44.82	-1749	-1646	-1757

Tabela 5.14 - Força na base do pannel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	-373	-470	-240
m/s 32.01	-998	-1420	-721
44.82	-1929	-2863	-1480

Tabela 5.15 - Força Resultante no Pannel

<i>N</i>	10°	20°	30°
19.21	50	162	-85
m/s 32.01	107	576	-178
44.82	180	1216	-276

Tabela 5.16 - Localização da Força resultante no pannel – vento 180°

<i>m</i>	10°	20°	30°
19.21	0.77	0.9	0.7
m/s 32.01	0.76	0.85	0.64
44.82	0.76	0.83	0.58

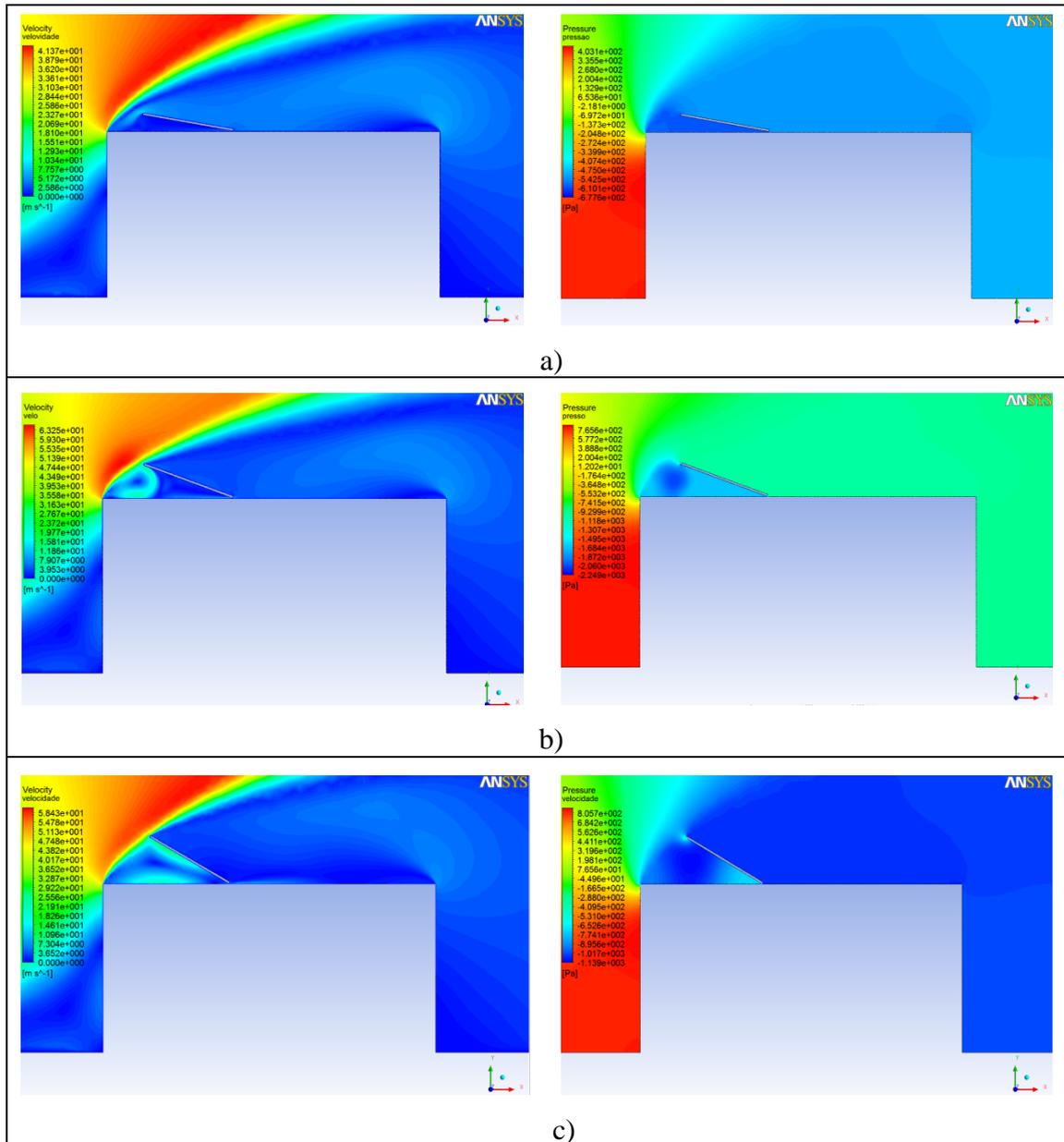


Figura 5.9 - Contorno de velocidade e pressão para uma $v = 32$ m/s com painel a 10° a) 20° b) e 30° c)

5.3.5 Inserção de Platibanda

Com o intuito de estudar o efeito da platibanda no modelo final admitiu-se uma velocidade do vento, $V = 32.01$ m/s, com o painel fotovoltaico inclinado a 30° . A platibanda foi dimensionada segundo o EC1 com $h_p/h = 0.1$, sendo assim criada com uma altura de 0.3 m perceptível no Anexo B.

Tabela 5.17 - Análise de resultados com platibanda

	<i>Sentido do vento</i> (°)	<i>Inclinação Painel F.</i> (°)	<i>Topo do Painel F.</i> (N)	<i>Base do Painel F.</i> (N)	<i>Força Res. Painel F.</i> (N)	<i>Força Cobertura</i> (N)
SEM PLATIBANDA						
Cobertura livre	0/180	-	-	-	-	-3274.6
Cobertura com Painel	0	30	-972	-873	-99	-3355
Cobertura com Painel	180	30	-898	-721	-178	-3076
COM PLATIBANDA						
Cobertura livre	0/180	-	-	-	-	-3371.1
Cobertura com Painel	0	30	-1017.3	-1001	-16.3	-3455
Cobertura com Painel	180	30	-895.8	-1826.6	930.8	-4275.4

O uso de platibanda mostra-se vantajoso quando o vento tem uma direção de 0° ocorrendo uma redução do valor da força resultante no painel fotovoltaico em 84%. Neste caso, os valores na cobertura sofrem pequenas alterações podendo mesmo ser desprezáveis.

A incidência do vento a 180° no modelo com platibanda provoca uma variação do sentido da força resultante no painel fotovoltaico e um aumento brusco do valor da mesma. A platibanda provoca uma elevação da zona da camada limite e por conseguinte do ponto de estagnação, Figura 5.10 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** b), originando efeitos muito semelhantes aos que ocorrem quando temos um painel fotovoltaico com uma inclinação de 20° demonstrados na Figura 5.7 b).

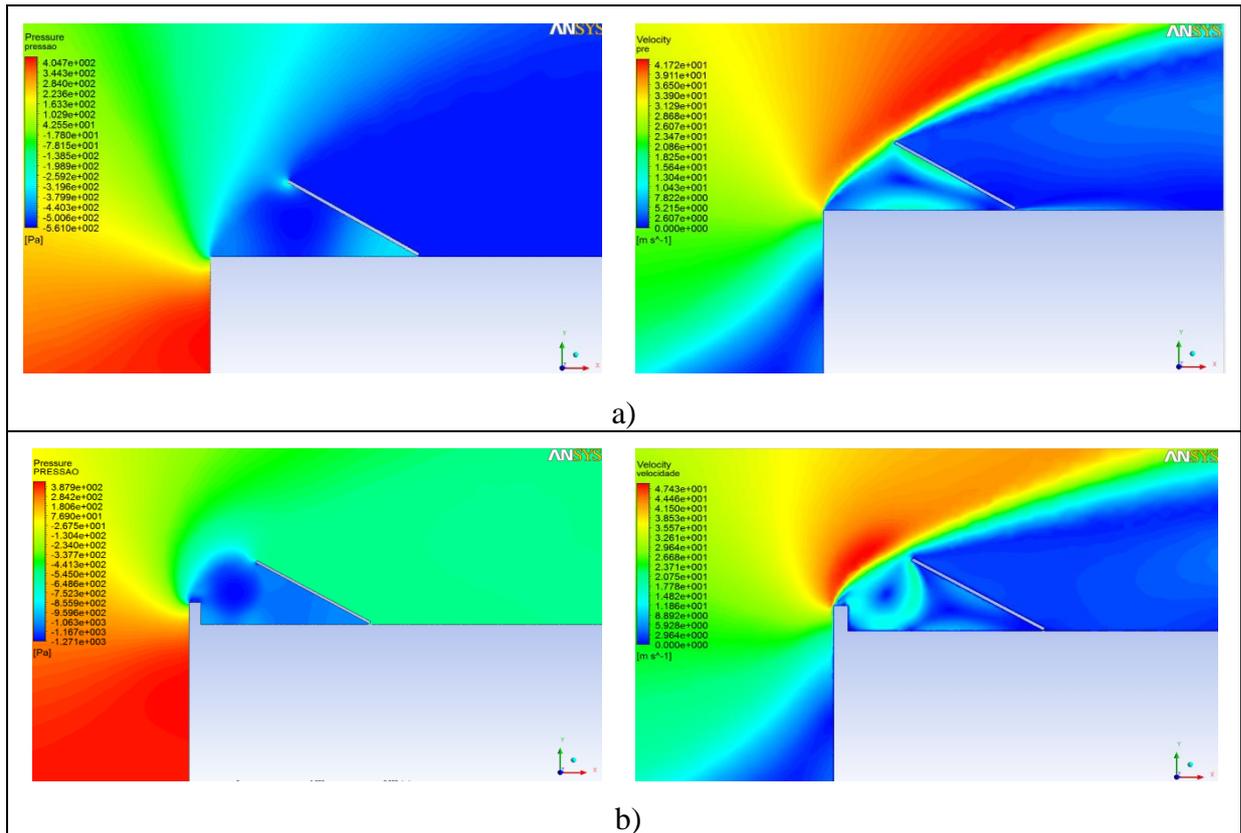


Figura 5.10 - Contorno da pressão e velocidade no modelo com platibanda e sem platibanda - vento 180°

A variação do centro de gravidade da força resultante na cobertura sofre pouca ou quase nenhuma alteração com a inserção da platibanda. Já no caso do painel fotovoltaico, esta tende a deslocar-se para parte superior devido a zonas onde existe acumulação de maiores pressões podendo-se verificar através dos contornos da pressão na Figura 5.10 b).

Tabela 5.18 - Centro de gravidade da força resultante na cobertura com platibanda e sem platibanda

<i>m</i>	30° (platibanda)	30°
Cobertura livre	3.01	3.01
Cobertura c/ painel - vento 0°	3	2.9
Cobertura c/ painel - vento 180°	3.5	2.94

Tabela 5.19 - Centro de gravidade da força resultante no painel fotovoltaico numa cobertura com platibanda e sem platibanda

<i>m</i>	30° (platibanda)	30°
Painel fotovoltaico - vento 0°	1.05	0.92
Painel fotovoltaico - vento 180°	0.84	0.64

5.3.6 *Fluent vs Eurocódigo*

O EC1 que caracteriza a acção dos ventos sobre estruturas em terraços, não permite a comparação das pressões exercidas pelo vento sobre o painel fotovoltaico. Apenas se pode recorrer à análise da cobertura livre. Devido à realização do modelo ser em $2D$ e os fenómenos do EC1 serem descritos em $3D$ são necessárias fazer algumas suposições para ser possível essa comparação. Devido à largura b do nosso modelo ser considerada infinita, automaticamente o valor de e considera-se duas vezes a altura do edifício sendo os coeficientes de pressão, $c_{pe,10}$ usados para a comparação.

Os coeficientes da zona F apenas são possíveis comparar quando obtemos uma análise $3D$. No modelo criado apenas é possível representar as zonas G, H, I em que:

- $0 \text{ m} < G < 0.6 \text{ m}$;
- $0.6 \text{ m} < H < 3 \text{ m}$;
- $3 \text{ m} < I < 6 \text{ m}$

Os coeficientes de pressão, $c_{pe,10}$, na zona I do EC1 no anexo C, apresentam tanto valor positivo como negativo pois localiza-se junto da esteira e os valores podem apresentar-se um pouco imprevisíveis.

Para o cálculo da pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores, w_e , a expressão a usar pode ser definida como:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (5.1)$$

em que:

$q_p(z_e)$ pressão dinâmica de pico;

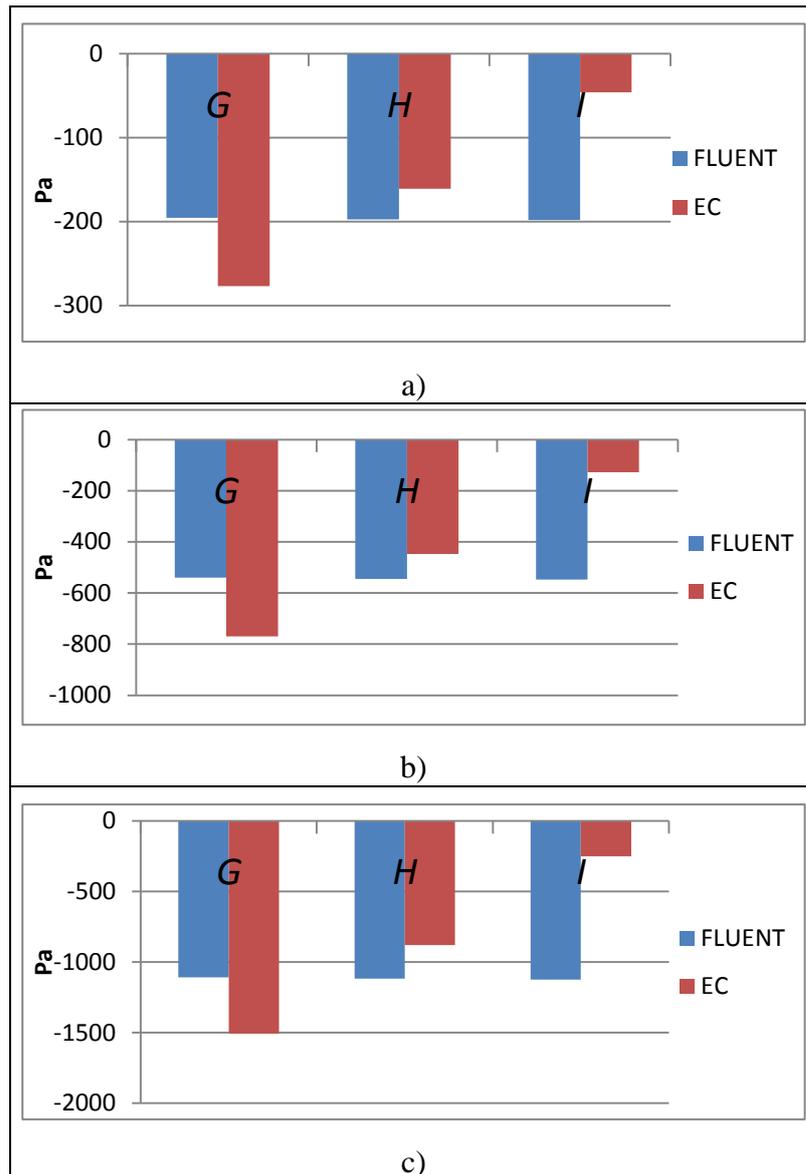
z_e altura de referência para a pressão exterior, considerada h ;

c_{pe} coeficiente de pressão para a pressão exterior.

Os resultados alcançados através do Ansys Fluent na zona *G* tendo em conta as várias velocidades do vento mostraram-se menos conservativos que o EC1.

Na zona *H*, apesar de as diferenças serem baixas os resultados numéricos apresentam-se ligeiramente superiores face ao respectivo Eurocódigo.

A zona *I*, onde os efeitos gerados pela esteira são importantes, existe uma maior divergência de valores numericamente obtidos face ao EC1.



**Figura 5.11 - Comparação EC1 com resultados do modelo final a) $v=19.21$ m/s
b) $v=32.01$ c) $v=44.82$ m/s**

6 Conclusões e perspectivas de trabalho

Esta dissertação apresenta os resultados de uma modelação *2D* criada para o estudo do vento sobre painéis fotovoltaicos em coberturas de edifícios usando a aplicação comercial Ansys Fluent. Uma das principais vantagens do uso deste tipo de aplicações de análise CFD é a melhor percepção dos fenómenos que ocorrem no painel fotovoltaico e em seu redor.

O estudo do volume de controlo permitiu concluir que é necessário o uso de um domínio de dimensão alargada tanto a montante como a jusante, de modo que o fluido não sofra o efeito de ‘reversed flow’ provocando alterações nas condições de escoamento. Verificou-se também que uma malha excessivamente refinada não induzia melhores resultados mas tempos de convergência substancialmente superiores devido ao custo computacional envolvido. Em contrapartida, malhas com tamanhos de elementos superiores resultavam em distâncias adimensionais y^+ elevadas não respeitando a gama de valores pretendida sendo por isso optado por uma malha intermédia.

Pode-se afirmar que a cobertura livre (sem a presença do painel fotovoltaico) tanto para um valor de $\alpha = 0^\circ$ ou $\alpha = 180^\circ$, está apenas sujeita a forças ascendentes de sucção em toda a sua extensão. Conclui-se com base no estudo da cobertura que o caso em que $\alpha = 180^\circ$ e o painel fotovoltaico se encontra com uma inclinação de 20° é o que causa maior influência nos resultados aumentando a força resultante em 16% e deslocando o seu centro de gravidade em 0.4 m.

Analisando as forças resultantes obtidos para no painel fotovoltaico, constata-se que a incidência do vento $\alpha = 180^\circ$ é a que provoca novamente maior instabilidade nos resultados. A variação do ângulo de 20° para 30° demonstra essa instabilidade nos valores obtidos.

O uso de platibanda apenas se mostrou benéfico para $\alpha = 0^\circ$ reduzindo o valor da força resultante no painel em 84 %.

Na comparação com o EC1, as simulações numéricas com o uso do modelo $k-\varepsilon$ apenas se mostraram menos conservadores na zona *I*, onde a influência dos efeitos de esteira são predominantes.

Como trabalho futuro propõe-se o estudo recorrendo a um modelo *3D* de modo a verificar a influência do escoamento pelas zonas laterais do edifício nos resultados finais.

O ensaio em túnel de vento é um dos métodos mais utilizados neste tipo de casos devido à sua precisão quando bem calibrado. Os seus resultados são um apoio incondicional permitindo um reajuste tanto da aplicação numérica como do próprio túnel de vento.

O uso do modelo *LES* (Large Eddy Simulation) pode ser visto como um modelo vantajoso no estudo deste tipo de escoamentos turbulentos por apresentar uma melhor modelação na zona de separação e dos vórtices criados pelo obstáculo. Apesar da sua precisão, ela é conseguida devido a um tempo computacional extremamente elevado e com recurso a meios computacionais avançados.

7 Referências e Bibliografia

- [1] <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>, último acesso: outubro 2012,
- [2] http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf, último acesso: novembro 2012
- [3] <http://www.ptvis.com/o-que-e-energia-fotovoltaica-electricidade-a-partir-do-sol/>, último acesso: novembro 2012
- [5] http://www.apisolar.pt/images/stories/ER_Jun12.pdf, último acesso: dezembro 2012
- [6] http://www.lnec.pt/qpe/eurocodigos/seminario_lisboa/Situacao_Portugal_PORTO2010_CP.pdf, último acesso: outubro 2012
- [7] White, Frank M. (2002), “Fluid Mechanics – Fifth Edition”, McGraw-Hill, University of Rhode Island;
- [8] Bruce R. Munson, Donald F. Young e Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics 4th ed.”, Edgard Blücher, Iowa – Estados Unidos da América;
- [9] Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles, Mehrdad Shademan, Horia Hangan²
1Ph.D. student, mshadema@uwo.ca, 2Professor and Director hmh@blwtl.uwo.ca,
The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario,
London, N6A 5B9, Ontario, Canada
- [10] Numerical Simulation of the Aerodynamic Loads acting on top of the SMART Centre for PV Applications, M. Raciti Castelli, S. Toniato, E. Benini
- [11] Modeling Strategy and Numerical Validation of the Turbulent Flow over a two-Dimensional Flat Roof, Marco Raciti Castelli, Alberto Castelli, Ernesto Benini
- [12] Ricardo M. de Matos Camarinha e João Sérgio N. D. Cruz
Acção Longitudinal do Vento em Edifícios Altos
- [14] Mohd ARIFF, Salim M. SALIM e Siew Cheong CHEAH (2009), “WALL Y+ APPROACH FOR DEALING WITH TURBULENT FLOW OVER A SURFACE MOUNTED CUBE: PART 2 – HIGH REYNOLDS NUMBER”, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Austrália
- [15] R. Yoshiea, A. Mochidab, Y. Tominagac, H. Kataokad, K. Harimotoe, T. Nozufe, T. Shirasawa, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan

[16] FLUENT[®] User's Guide (2011), USA;

ANEXO A: Soluções Martifer Solar



Instalações em Solo



Cobertura



BIPV



Micro e
Minigeração



Offgrid

Figura 1. Soluções Fotovoltaicas Martifer Solar

ANEXO B: Orientação de eixos e modelos de apoio

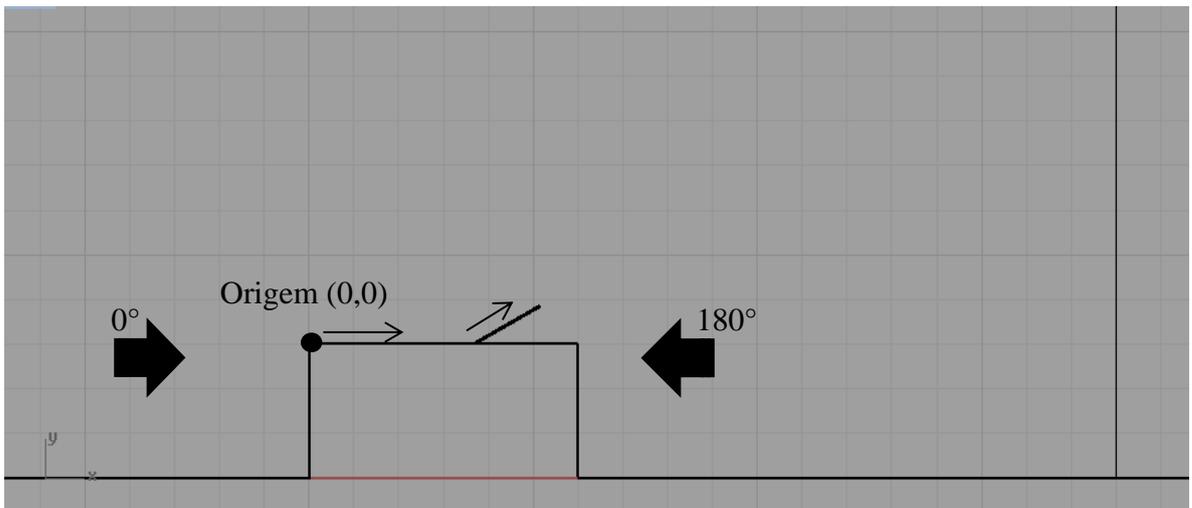


Figura 2. Orientação dos eixos para o centro de gravidade da força resultante na cobertura e no painel fotovoltaico

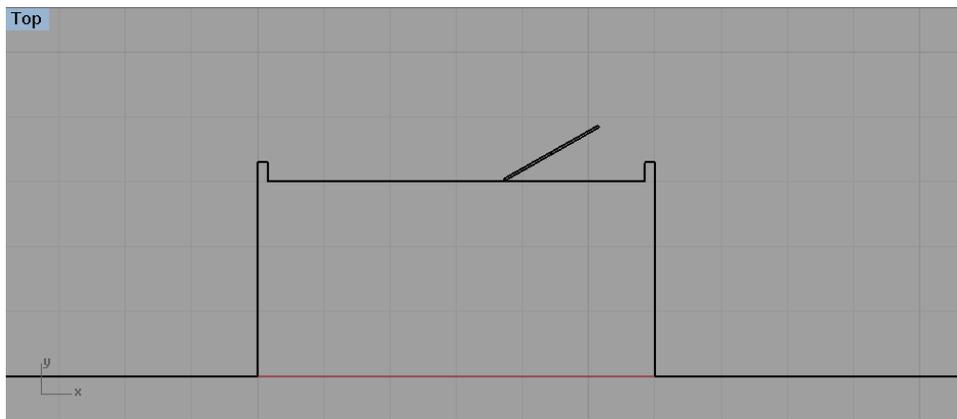
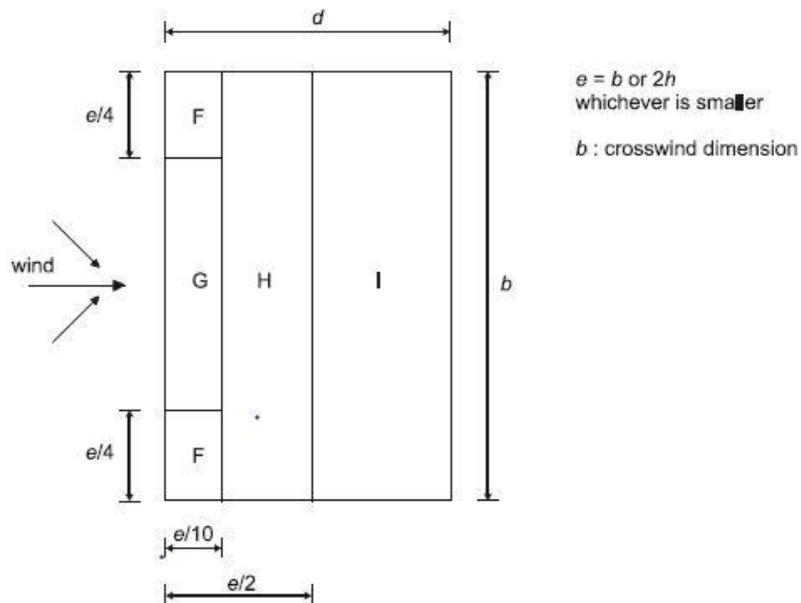
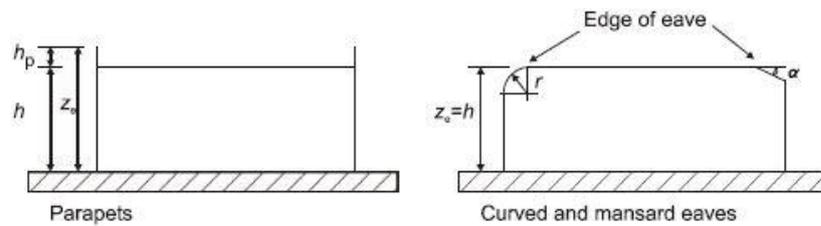


Figura 3. Modelo final com platibanda

ANEXO C: Eurocódigo

NP
EN 1991-1-4
2010

p. 43 de 162



Legenda:

parapets	platibandas
edge of eave	topo do bordo
curved and mansard eaves	bordos arredondados ou amansardados
$e=b$ or $2h$, whichever is smaller	e = menor valor de entre b e $2h$
crosswind dimension	dimensão transversal à direcção do vento

Figura 7.6 – Zonas em coberturas em terraço

Tipo de cobertura		Zona							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Bordos em aresta viva		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Com platibanda	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Bordos arredondados	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2
Bordos amansardados	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		+0,2	-0,2

NOTA 1: Para coberturas com platibandas ou com bordos arredondados, poderá ser efectuada uma interpolação linear para valores intermédios de h_p/h e de r/h .

NOTA 2: Para coberturas com bordos amansardados, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$. Para $\alpha > 60^\circ$, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre os valores para $\alpha = 60^\circ$ e os valores para coberturas em terraço com bordos em aresta viva.

NOTA 3: Na Zona I, para a qual são fornecidos valores positivos e negativos, devem ser considerados ambos os valores.

NOTA 4: Para o bordo amansardado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são fornecidos no Quadro 7.4a "Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes: direcção do vento 0", Zonas F e G, em função da inclinação do bordo.

NOTA 5: Para o bordo arredondado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são calculados, ao longo do bordo, por interpolação linear entre os valores relativos à parede e à cobertura.

Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar	0,003	1
I Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos	0,01	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	2
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	5
IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	10

8 Anexo D: Contornos da velocidade e Pressão