



Estudo do Impacto da Ação do Vento sobre Painéis Fotovoltaicos

JOSÉ PEDRO RODRIGUES MONTEIRO

setembro de 2025

Estudo do Impacto da Ação do Vento sobre os Painéis Fotovoltaicos

José Pedro Rodrigues Monteiro

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Energia

Orientador: Professor Adriano A. Santos

Co-orientador: Professor Ferreira da Silva

Júri:

Presidente:

Rui de Araújo Rego, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

António José Ramos Silva, Professor Auxiliar, FEUP

Adriano Manuel de Almeida Santos, Professor Adjunto, ISEP

Dedicatória

“Não é que eu seja tão inteligente, é que eu fico mais tempo nos problemas.”
— Albert Einstein

Dedico este trabalho a todos os que acreditam que a consistência, a dedicação e a fé num propósito são mais fortes do que qualquer obstáculo.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento ao Professor Adriano Santos por ter aceite orientar este trabalho, mesmo numa fase já avançada do ano letivo, após a reformulação do tema inicialmente proposto. A sua orientação rigorosa, disponibilidade e os conselhos valiosos que me transmitiu foram fundamentais para a concretização desta dissertação.

Agradeço também ao Engenheiro Ferreira da Silva pela supervisão final e pelo feedback construtivo que me permitiu melhorar a qualidade do trabalho desenvolvido.

Gostaria também de agradecer ao Engenheiro Lopes da Costa e à Engenheira Rafaela Casais pelo apoio prestado durante a fase inicial do ano letivo, na orientação do tema anteriormente proposto, bem como a todos os colegas da empresa onde estive integrado, pelo apoio e colaboração que me ofereceram nesse período.

Estendo o meu agradecimento a todos os docentes que lecionaram ao longo do meu percurso académico, tanto na licenciatura como no mestrado, pois contribuíram de forma decisiva para a minha formação técnica e pessoal. Ao ISEP, agradeço não só a formação de excelência, mas também as oportunidades que me proporcionou para crescer enquanto estudante e pessoa, bem como por me ter permitido conhecer profissionais e colegas notáveis.

A minha mais sincera gratidão vai para a minha família, pelo apoio incondicional, pelo exemplo, pela paciência e por todo o suporte oferecido ao longo destes anos exigentes de formação.

À minha namorada, agradeço por estar sempre presente, pelo incentivo constante e por me ter acompanhado, com compreensão e carinho, nos momentos mais desafiantes deste percurso.

Por fim, um agradecimento especial a todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo destes anos. A vossa amizade, companheirismo e boa disposição tornaram cada etapa mais leve e todos os desafios mais fáceis de ultrapassar.

A todos, o meu muito obrigado.

Resumo

A presente dissertação desenvolve um estudo sobre o impacto da ação do vento em painéis solares. Tendo em conta o crescimento acelerado do aproveitamento da energia solar e a necessidade de garantir a segurança estrutural das instalações fotovoltaicas, o trabalho procura avaliar, de forma detalhada, as forças aerodinâmicas resultantes do escoamento atmosférico sobre painéis. A metodologia assenta na aplicação de técnicas de simulação numérica com recurso à Dinâmica dos Fluidos Computacional, utilizando o software ANSYS Fluent para analisar o comportamento do vento na interação com estruturas. Foram realizados modelos em duas e três dimensões, considerando diferentes direções e velocidades de vento, e procedeu-se à comparação dos resultados obtidos com os valores recomendados pelas normas técnicas vigentes. A análise centrou-se na determinação dos campos de pressão e velocidade, na identificação de zonas críticas de recirculação e na quantificação das forças atuantes sobre os painéis. Os resultados obtidos revelaram uma forte dependência da força do vento relativamente à inclinação do painel e à direção do escoamento, bem como a relevância dos efeitos tridimensionais na distribuição das pressões. Verificou-se uma boa concordância com os princípios teóricos da aerodinâmica, validando a aplicação da simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD) como ferramenta de apoio ao dimensionamento estrutural. Apesar das limitações associadas à simplificação dos modelos e aos recursos computacionais disponíveis, a investigação apresenta-se como um contributo sólido para o estudo da interação vento-estrutura em sistemas fotovoltaicos.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação CFD, Painéis Fotovoltaicos, Ação do Vento, Aerodinâmica

Abstract

This dissertation presents a study on the impact of wind action on solar panels. Given the rapid growth of solar energy exploitation and the need to ensure the structural safety of photovoltaic installations, the work aims to evaluate in detail the aerodynamic forces resulting from atmospheric flow over solar panels. The methodology is based on the application of numerical simulation techniques using CFD, with ANSYS Fluent software employed to analyze wind behaviour over structures. Two- and three-dimensional models were developed, considering various wind directions and velocities, and the results were compared with values recommended by the applicable technical standards. The analysis focused on determining pressure and velocity fields, identifying critical zones of recirculation, and quantifying the forces acting on the panels. The results revealed a strong dependency of wind forces on the panel inclination and flow direction, as well as the significance of three-dimensional effects on pressure distribution. Good agreement was found with theoretical aerodynamic principles, validating CFD as a reliable tool to support structural design. Despite limitations arising from model simplification and available computational resources, the study represents a solid contribution to the understanding of wind-structure interaction in photovoltaic systems.

KEYWORDS: CFD Simulation, Photovoltaic Panels, Wind Load, Aerodynamics

Índice

Índice Figuras	xii
Índice de Tabelas	xiii
Acrónimos e Símbolos	xv
Lista de Símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.1.1 Crescimento internacional da energia solar	1
1.1.2 A energia solar em Portugal: metas e evolução recente	2
1.1.3 Autoconsumo e geração descentralizada	3
1.1.4 Desafios estruturais: dimensionamento e ação do vento	4
1.2 Motivação do Estudo	4
1.3 Objetivos do Estudo	5
1.4 Metodologia Adotada	6
1.5 Organização da Dissertação	6
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Importância da Análise Aerodinâmica em FV	7
2.1.1 Abordagem da Análise Aerodinâmica e Diretrizes de Projeto	9
2.2 Efeito do Vento em Estruturas - Conceitos Fundamentais	11
2.2.1 Natureza Física do Vento	11
2.2.2 Parâmetros Característicos do Vento	13
2.2.3 Tipos de Cargas de Vento	15
2.2.4 Coeficientes Aerodinâmicos	17
2.2.5 Fenómenos de Turbulência e Separação do Escoamento	19
2.3 Métodos de Cálculo Convencionais (Normas Eurocódigo, etc.)	21
2.3.1 Introdução ao Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas	22
2.4 Aplicação de CFD na Engenharia	27
2.4.1 O que é CFD	27
2.4.2 Equações Fundamentais	29
2.4.3 Discretização e Métodos Numéricos na Resolução de Equações	30
2.4.4 Definição e Convergência de Malha	32
2.4.5 Modelação de Fenómenos de Turbulência	33
2.4.6 Aplicações Típicas de CFD em Engenharia	38
2.4.7 Vantagens e Limitações de CFD	40
2.5 Software e Ferramentas de Modelação e Simulação	41
2.5.1 SolidWorks e Ansys Fluent	41

3 Métodos e Aplicação	43
3.1 Definição do Caso de Estudo	43
3.1.1 Descrição da Estrutura de Painel Solar	43
3.1.2 Objetivos da Simulação CFD	45
3.2 Pré-Processamento	47
3.2.1 Geometria do Modelo e Definição do Domínio de Fluido	47
3.2.2 Criação da Malha	49
3.2.3 Definições Físicas do Problema	56
3.2.4 Condições de Fronteira	57
3.3 Módulo de Resolução (Solver)	57
3.3.1 Configuração Geral do Solver	57
3.3.2 Modelos Ativados	59
3.3.3 Inicialização e Monitorização	60
3.3.4 Estratégia de Simulação	61
3.4 Pós-Processamento	63
3.4.1 Resultados de Velocidade e Pressão	63
3.4.2 Linhas de Corrente e Escoamento	70
3.4.3 Cálculo de Forças	72
4 Resultados e Discussão	75
4.1 Apresentação dos Resultados	75
4.2 Análise e Comparação dos Resultados	77
4.2.1 Consistência com princípios físicos	77
4.2.2 Comparação entre Resultados 2D e 3D	80
5 Conclusão	83
5.1 Conclusões Principais	83
5.2 Contributos e Limitações do Estudo	84
5.3 Sugestões de Trabalhos Futuros	85
Referências	87
Apêndice A - Primeiro apêndice	97
.1 Secção A.1 - Contornos de Velocidade e Pressão	97
.2 Secção A.2 - Resultados de Forças e Coeficientes	103
Anexo A - Excertos da NP EN 1991-1-4 2010	107
.3 Capítulo 4 – Velocidade do vento e pressão dinâmica págs. 22–29	107
.4 Capítulo 7 - Coeficientes de pressão e força págs. 59–62	108
.5 Anexo A.1 - Efeitos do terreno pág. 97	109
.6 Anexo Nacional NA.2.3 - Princípios e Regras de Aplicação com pres- crições a nível nacional págs. 155-156	110
Anexo B - Informações Técnicas do Painel SILK PLUS	111
.7 Ficha técnica	111

Lista de Figuras

2.1 Danos causados por tempestades em St. Croix após o furacão Maria (em cima) e após o furacão Fiona (em baixo). Fotografias de Gerald Robinson, Lawrence Berkeley National Laboratory (em cima) e Schneider Electric (em baixo).	8
2.2 Ensaio de estrutura da Solar Group em túnel de vento	9
2.3 Vários tipos de configurações de instalação de painéis FV	10
2.4 Modelo aproximado do comportamento do vento no planeta Terra	12
2.5 Exemplo de rosa-dos-ventos e histograma (%) das classes de velocidade do vento (m/s) da Estação Meteorológica SBGL para o período 2003–2013.	14
2.6 Escoamento laminar e turbulento em tubo	19
2.7 Exemplificação de um padrão Vórtice de Von Kármán	20
2.8 Aceleração e mudança de direção do vento em terrenos de orografia complexa	24
2.9 Perfil vertical do vento e efeito do relevo/obstáculo	24
2.10 Gráfico do Coeficiente de Exposição relativamente à altura e ao tipo de terreno	25
2.11 Quadro-tipo com os passos para abordagem CFD	28
2.12 Exemplo de análise CFD aplicado a painel solar	28
2.13 Cadeia de desenvolvimento: da formulação física à solução algébrica	31
2.14 Malha de modelo de Fórmula 1	32
2.15 Exemplo analítico da convergência de resultados numa malha	33
2.16 (a) modelos de turbulência em CFD e o seu custo computacional; (b) comparação gráfica dos três métodos de modelação.	34
2.17 Simulação em Ansys Fluent da aerodinâmica exterior num avião comercial.	39
2.18 Parâmetros passíveis de estudo com CFD em avião Boeing 787	40
3.1 Estrutura de painéis solares agrovoltaica	44
3.2 Casos de estudo e altura de referência considerada (P2)	45
3.3 Parte frontal do modelo simplificado	46
3.4 Parte traseira do modelo simplificado	46
3.5 Domínio 2D da simulação do painel a 30° com vento a escoar na direção de 0°	48
3.6 Domínio 3D da simulação do painel a 30° com vento a escoar na direção de 0°	49
3.7 Malha 2D final	51
3.8 Detalhes próximos ao painel da Malha 2D	52
3.9 Distribuição dos parâmetros métricos da malha 2D obtidos através do Ansys	52

3.10 Malha 3D final	54
3.11 Detalhes próximos ao painel da malha 3D	55
3.12 Distribuição dos parâmetros métricos da malha 3D obtidos através do Ansys	55
3.13 Gráfico de resíduos para 2D	61
3.14 Gráfico de resíduos para 3D	61
3.15 Gráfico de velocidades para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s	64
3.16 Gráfico de pressões para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s	65
3.17 Gráfico de velocidades para simulação 3D com vento de 0° e $v=27$ m/s	66
3.18 Gráfico de pressões com visualização frontal dos efeitos no painel para simulação 3D com vento de 0° e $v=27$ m/s	67
3.19 Gráfico de pressões com visualização traseira dos efeitos no painel para simulação 3D com vento de 0° e $v=27$ m/s	68
3.20 Gráfico de pressões e linhas de escoamento para simulação 3D do modelo simplificado com vento de 0° e $v=27$ m/s	69
3.21 Gráfico de linhas de escoamento para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s	70
3.22 Gráfico de vetores de escoamento para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s	70
3.23 Gráfico de linhas de escoamento (vista da frente) para simulação 3D com vento de 0 graus e $v=27$ m/s	71
3.24 Gráfico de linhas de escoamento (vista isométrica) para simulação 3D com vento de 0 graus e $v=27$ m/s	72
3.25 Exemplo da criação de relatório de força para a configuração de simulação apresentada	73
1 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 10$ m/s, 2D	97
2 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 27$ m/s, 2D	97
3 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 40$ m/s, 2D	98
4 $\alpha = 30^\circ, \theta = 180^\circ, U = 10$ m/s, 2D	98
5 $\alpha = 30^\circ, \theta = 180^\circ, U = 27$ m/s, 2D	99
6 $\alpha = 30^\circ, \theta = 180^\circ, U = 40$ m/s, 2D	99
7 $\alpha = 90^\circ, \theta = 0^\circ, U = 27$ m/s, 2D	100
8 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 10$ m/s, 3D	100
9 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 27$ m/s, 3D	101
10 $\alpha = 30^\circ, \theta = 180^\circ, U = 10$ m/s, 3D	101
11 $\alpha = 30^\circ, \theta = 180^\circ, U = 27$ m/s, 3D	102
12 $\alpha = 90^\circ, \theta = 0^\circ, U = 27$ m/s, 3D	102
13 $\alpha = 30^\circ, \theta = 0^\circ, U = 27$ m/s, 3D (pressão no painel superior)	103

Lista de Tabelas

2.1	Influência da forma da estrutura nos coeficientes aerodinâmicos	18
3.1	Resumo dos casos de simulação CFD.	47
3.2	Resumo da malha 2D.	51
3.3	Resumo da malha 3D.	54
3.4	Especificações do computador utilizado nas simulações.	62
3.5	Resultados das forças obtidas na simulação 3D para vetor (0, -0.866, -0.5).	73
4.1	Resumo das forças e coeficientes totais por zona para todas as simulações CFD.	75
4.2	Validação força-velocidade	78
4.3	Comparação entre resultados CFD e Eurocódigo para painel a 30° com vento de 0° e 180°, considerando $A = 2,5855 \text{ m}^2$ e excluindo o coeficiente de exposição (c_e).	79
4.4	Comparação entre simulações 2D e 3D para painéis a 30° com vento de 0°, em diferentes velocidades.	81
1	Resumo das forças e coeficientes totais por zona para todas as simulações CFD.	103

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

- AVAC** Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- BEM** *Boundary Element Method*
- CAD** *Computer Aided Design*
- CFD** *Computational Fluid Dynamics*
- CLA** Camada Limite Atmosférica
- DNS** *Direct Numerical Simulation*
- FDM** *Finite Difference Method*
- FEM** *Finite Element Method*
- FVM** *Finite Volume Method*
- IPQ** Instituto Português da Qualidade
- ISEP** Instituto Superior de Engenharia do Porto
- ITCZ** *Intertropical Convergence Zone*
- LES** *Large Eddy Simulation*
- NASA** *National Aeronautics and Space Administration*
- P.PORTO** Instituto Politécnico do Porto
- PNEC** Plano Nacional de Energia e Clima
- RANS** *Reynolds Averaged Navier-Stokes*
- SEN** Sistema Elétrico Nacional
- SIMPLE** *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*
- SST** *Shear Stress Transport*
- UPAC** Unidades de Produção para Autoconsumo

Lista de Símbolos

- α constante empírica associada ao termo de produção de ω adimensional
- \bar{U} velocidade média longitudinal do vento $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

β	constante empírica associada ao termo de dissipação na equação de ω	adi- dimensional
β^*	constante empírica do termo de dissipação no transporte de k	adimensional
λ	condutividade térmica	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
μ	viscosidade dinâmica do fluido	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_t	viscosidade turbulenta	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
∇	operador diferencial vetorial (nabla): gradiente	adimensional
∇^2	operador laplaciano	adimensional
ω	frequência específica de dissipação da energia cinética turbulenta	s^{-1}
Φ	termo de dissipação viscosa	$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ	densidade do ar	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ_ω	número de Prandtl turbulento para a equação de ω	adimensional
σ_ε	Coefficiente empírico de difusividade turbulenta de ε	adimensional
σ_k	Coefficiente empírico de difusividade turbulenta de k	adimensional
σ_k	número de Prandtl turbulento para a equação de k	adimensional
σ_u	desvio padrão da componente longitudinal da velocidade do vento	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$\sigma_{\omega 2}$	número de Prandtl turbulento modificado para ω na formulação SST	adi- dimensional
τ_w	tensão de corte na parede	Pa
ε	Taxa de dissipação da energia turbulenta	m^2 $\cdot\text{s}^{-3}$
\vec{f}_b	vetor de forças por unidade de volume (p. ex., gravidade)	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
\vec{u}	vetor velocidade do fluido	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A	área de referência	m^2
A_{ref}	área de referência (projetada) da estrutura	m^2
$c_0(z)$	coeficiente de orografia (influência da topografia)	adimensional
C_d	coeficiente de arrasto	adimensional
c_d	coeficiente dinâmico associado à resposta da estrutura	adimensional

$c_e(z)$	Coeficiente de exposição ao vento	adimensional
C_f	coeficiente de força de atrito	adimensional
c_f	coeficiente de forma global (ou coeficiente de força)	adimensional
c_f	coeficiente de forma global da estrutura (também designado força)	coeficiente de adimensional
C_p	coeficiente de pressão	adimensional
$c_r(z)$	coeficiente de exposição ao vento	adimensional
$c_s c_d$	coeficiente estrutural global (produto dos efeitos estatísticos e dinâmicos)	adimensional
c_s	coeficiente de simultaneidade espacial das pressões	adimensional
$C_{1\varepsilon}$	Coeficiente empírico do termo de produção de ε	adimensional
$C_{2\varepsilon}$	Coeficiente empírico do termo de dissipação de ε	adimensional
c_{dir}	coeficiente de direção do vento	adimensional
c_{season}	coeficiente de sazonalidade do vento	adimensional
C_{pe}	coeficiente de pressão externa	adimensional
C_{pi}	coeficiente de pressão interna	adimensional
D	comprimento característico da estrutura	m
F	Força aerodinâmica	N
f	frequência de <i>shedding</i> (desprendimento de vórtices)	Hz
F_1	função de transição entre o modelo $k-\omega$ e o $k-\varepsilon$	adimensional
F_d	força de arrasto total	N
f_s	frequência de desprendimento de vórtices	Hz
F_w	força global do vento sobre a estrutura	N
h_{tot}	entalpia total específica (por unidade de massa)	$J \cdot kg^{-1}$
I	intensidade de turbulência	adimensional
$I_v(z)$	intensidade de turbulência ao nível z	adimensional
k	Energia cinética turbulenta	m^2 $\cdot s^{-2}$

k_r	coeficiente dependente da rugosidade	adimensional
L	comprimento característico da estrutura	m
p	pressão estática	Pa
p	pressão local	Pa
P_k	Termo de geração de energia cinética turbulenta .s ⁻³	m ²
p_∞	pressão de referência longe do corpo	Pa
q	pressão dinâmica	Pa
q_b	pressão dinâmica de referência	Pa
$q_p(z)$	pressão dinâmica de pico à altura z	Pa
Re	número de Reynolds	adimensional
S_E	fonte volumétrica de energia	W·m ⁻³
St	número de Strouhal	adimensional
T	temperatura absoluta	K
t	tempo	s
U	velocidade média do escoamento	m·s ⁻¹
u_τ	Velocidade de fricção	m·s ⁻¹
u_j	Componente da velocidade na direção j	m·s ⁻¹
V	velocidade do vento	m·s ⁻¹
V	velocidade do vento	m·s ⁻¹
v	velocidade do vento	m·s ⁻¹
v_b	velocidade básica do vento	m·s ⁻¹
v_b	velocidade básica do vento ajustada	m·s ⁻¹
$v_m(z)$	velocidade média do vento à altura z	m·s ⁻¹
$v_{b,0}$	velocidade básica do vento antes de ajustamentos	m·s ⁻¹
w_e	pressão externa exercida pelo vento	Pa
w_i	pressão interna exercida pelo vento	Pa

x_j	Coordenada espacial na direção j	m
y	Distância normal desde a parede até ao centro do primeiro elemento da malha	m
z	altura em relação ao solo	m
z_0	comprimento de rugosidade do solo	m
z_{\min}	altura mínima para validade do perfil logarítmico	m

1 Introdução

A presente dissertação centra-se na análise do impacto da ação aerodinâmica do vento sobre painéis solares.

Com o crescimento acentuado do aproveitamento da energia solar em Portugal, e a conseqüente disseminação de sistemas fotovoltaicos em coberturas de edifícios e espaços residenciais, torna-se essencial garantir a segurança e eficiência estrutural dessas instalações, sobretudo face a ações ambientais críticas como o vento.

Neste contexto, ganha relevância o recurso a ferramentas de simulação numérica, nomeadamente a dinâmica de fluidos computacional, como meio de apoio à avaliação detalhada dos esforços aerodinâmicos atuantes.

Este capítulo introdutório apresenta os principais fundamentos do trabalho desenvolvido.

A Secção 1.1 estabelece a contextualização do tema, com uma análise do panorama internacional e nacional da energia solar, salientando a relevância crescente do autoconsumo e os desafios estruturais associados.

Na Secção 1.2 é apresentada a motivação do estudo, destacando a necessidade de criação de estruturas seguras num mercado em constante crescimento em energias renováveis.

A Secção 1.3 define o objetivo geral e os objetivos específicos que orientam o desenvolvimento da dissertação.

Na Secção 1.4 será descrita a metodologia adotada, incluindo as etapas principais do trabalho, desde a modelação geométrica até à análise dos resultados das simulações CFD.

Por fim, a Secção 1.5 apresentará a organização da dissertação, explicando a estrutura global do documento e a sequência lógica dos capítulos que o compõem.

1.1 Contextualização do Tema

1.1.1 Crescimento internacional da energia solar

A transição energética global tem impulsionado a adoção de fontes de energia renovável, com destaque para a energia solar fotovoltaica, devido à sua abundância, sustentabilidade e viabilidade económica.

A energia solar fotovoltaica tem registado um crescimento acelerado a nível mundial nas últimas décadas. Em 2023, observou-se um aumento recorde na capacidade renovável instalada globalmente, impulsionado sobretudo pela expansão da energia

solar. Cerca de 75% de toda a nova potência renovável adicionada nesse ano foi fotovoltaica, num total estimado de centenas de gigawatts instalados [1]. Relatórios recentes projetam uma continuação desta tendência: segundo a BloombergNEF, as novas instalações solares poderão atingir 700 GW anuais em 2025, um salto face aos 444 GW instalados em 2023 [2]. Este crescimento exponencial tem sido liderado pela China que sozinha instalou em 2023 tanto solar quanto o resto do mundo em 2022, mas também foi acompanhada por fortes incrementos na Europa, Estados Unidos e Índia [1,2].

Este contexto internacional evidencia que a energia solar se tornou um pilar central da transição energética global, impulsionada pela queda dos custos tecnológicos, por políticas de incentivo e pela necessidade urgente de descarbonização em prol de um planeta mais saudável.

1.1.2 A energia solar em Portugal: metas e evolução recente

Portugal tem vindo a afirmar-se como um dos países europeus com maior potencial de crescimento no setor da energia solar fotovoltaica. Com uma exposição solar privilegiada, com mais de 300 dias de sol por ano, o país recebe uma radiação solar média anual entre 1600 e 2200 kWh/m² no território continental, valores significativamente superiores à média europeia [3].

O Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 estabelece metas ambiciosas para as renováveis com destaque para a solar sendo que numa revisão recente, o Governo antecipou para 2026 a meta de 80% de eletricidade de origem renovável e traçou objetivos mais arrojados para 2030, ou seja, alcançar 49% de fontes renováveis no consumo final de energia até 2030 (acima da meta anterior de 47%) [4]. Para tal, O PNEC prevê um aumento substancial da capacidade solar fotovoltaica de cerca de 9 GW para 20,4 GW. [5]. Esta meta representa mais do que triplicar o parque solar nacional na presente década e inclui que cerca de 5,5 GW dessa potência, em 2030, venham de instalações distribuídas (autoconsumo). Tais objetivos alinham-se com a estratégia de neutralidade carbónica para 2045 e refletem a confiança no potencial solar do país, pelo que, os resultados recentes confirmam a trajetória de crescimento acelerado da energia solar em Portugal [4].

No ano de 2023, a produção elétrica solar atingiu cerca de 3,6 TWh, representando aproximadamente 8% da geração elétrica nacional nesse ano [6]. Este valor, inédito até então, foi rapidamente ultrapassado em 2024 pelo facto de, nos primeiros nove meses, se terem gerado 3,99 TWh de eletricidade solar, superando o total do ano anterior.

Com efeito, 2024 tornou-se um ano recorde para a energia solar em Portugal, contribuindo com cerca de 10% do consumo elétrico nacional entre janeiro e setembro. Também a potência instantânea atingiu novos máximos, registando-se, a 14 de agosto de 2024, um pico de 2640 MW de produção solar (bem acima do recorde de 1822 MW obtido em 2023). Estes números demonstram a rápida integração da fonte solar no Sistema Elétrico Nacional (SEN), que no acumulado de 2024 já obteve mais de 73% do consumo coberto por renováveis [7,8].

Paralelamente, a capacidade solar instalada tem crescido de forma notável. Portugal encerrou 2022 com cerca de 2,6 GW fotovoltaicos acumulados [6] e em 2023 adici-

onou um volume sem precedentes de nova capacidade. Estimativas oficiais indicam que foram instalados cerca de 1,23 GW de nova potência solar em 2023, o maior crescimento anual de sempre, elevando o total nacional para aproximadamente 3,8 GW, nesse ano [6]. Importa salientar que este aumento não se deve apenas a grandes centrais pois, mais de metade da capacidade de 2023 proveio de instalações de autoconsumo (pequenos sistemas em telhados de residências, empresas e outros) [9]. Essa distribuição reflete uma mudança estrutural no setor elétrico português, com a energia solar a disseminar-se tanto em parques solares de grande escala quanto em sistemas descentralizados espalhados pelo território.

Outro aspeto relevante é a distribuição geográfica das instalações solares em Portugal. As regiões do sul e interior, graças à elevada irradiação solar e disponibilidade de espaços, concentram alguns dos maiores empreendimentos fotovoltaicos. O Alentejo, em particular, tem-se afirmado como polo de energia solar. Em 2024 foi inaugurada a central fotovoltaica de Santas (181 MWp) nos concelhos de Monforte, Borba e Estremoz, uma das maiores do país [10]. Esta central, com vários outros projetos em desenvolvimento (por exemplo, em Portel/Vidigueira e Moura), confirma a forte implantação de parques solares de grande porte no Alentejo e Ribatejo. Também o Algarve e o vale do Tejo têm recebido novas centrais, empresas como a Iberdrola e a EDP instalaram recentemente parques solares em Palmela, Setúbal e Albufeira, reforçando a capacidade a sul do país [11].

Em contraste, no litoral norte e zonas urbanas densas, a expansão solar assume maioritariamente a forma de pequenas instalações distribuídas. Ainda assim, mesmo em cidades menos ensolaradas tem-se observado crescimento: por exemplo, o Porto triplicou a sua produção solar em 2024 face a 2023, evidenciando a adoção crescente de painéis fotovoltaicos em contexto urbano residencial [12].

Em síntese, a energia solar em Portugal caminha para um papel central na matriz elétrica, complementando a geração eólica e hídrica tradicionalmente mais fortes, e espalhando-se desde as grandes centrais em planícies ensolaradas, até aos painéis em telhados de moradias por todo o país.

1.1.3 Autoconsumo e geração descentralizada

Um dos fenómenos mais marcantes no setor solar português é o crescimento do autoconsumo fotovoltaico. A instalação de painéis solares em moradias, edifícios, comércio e indústrias para consumo próprio e eventual injeção de excedentes na rede tem aumentado, impulsionada pela descida dos custos tecnológicos e pelos incentivos regulatórios.

No primeiro semestre de 2023, mais de 80% da nova potência solar instalada em Portugal correspondeu a Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC). Até junho, o país acumulava 2,98 GW de capacidade fotovoltaica, dos quais 338 MW foram instalados em pequenos sistemas descentralizados. Esta evolução reflete uma tendência de geração distribuída, estimulada também pela subida dos preços da eletricidade e pela simplificação dos processos de licenciamento. Estima-se que cerca de metade da capacidade solar atual já se encontre em sistemas de autoconsumo, e o PNEC 2030 prevê que 5,5 dos 20 GW solares projetados venham desta via.

Apesar dos benefícios, como redução de perdas e maior autonomia energética, este

crescimento levanta desafios técnicos, sobretudo ao nível do dimensionamento das estruturas de suporte. As instalações, especialmente em coberturas urbanas, devem respeitar critérios rigorosos de segurança, tendo em conta as cargas de vento e outras ações ambientais [13].

1.1.4 Desafios estruturais: dimensionamento e ação do vento

Com a disseminação de painéis solares um pouco por todo o lado, desde extensos parques fotovoltaicos a coberturas de edifícios, a questão da segurança estrutural dessas instalações assume grande importância. As estruturas de suporte dos painéis (tais como pórticos metálicos, estruturas inclinadas de telhado, fixações, etc.) devem ser projetadas de forma adequada para assegurar a estabilidade e longevidade do sistema.

Estudos documentados têm demonstrado que falhas estruturais relacionadas com cargas de vento são uma das principais causas de danos em instalações fotovoltaicas a nível global. Experiências internacionais, como as documentadas após tempestades severas em Espanha e na China, revelaram que os danos mais comuns ocorrem nas estruturas de montagem e não nos próprios painéis [14]. Estas falhas resultam frequentemente de um dimensionamento inadequado das estruturas face às condições reais de vento, ou da não consideração de fenómenos aerodinâmicos específicos que afetam os painéis solares. Se o projeto estrutural for insuficiente, os painéis podem não ficar na inclinação ótima (comprometendo a produção) e, mais grave, a estrutura pode colapsar sob cargas ambientais, causando danos materiais ou acidentes. Por isso, normas técnicas rigorosas (como os Eurocódigos estruturais e regulamentação nacional) e boas práticas de engenharia devem ser seguidas desde a fase de conceção [15].

Entre estas, o vento destaca-se como uma das cargas mais críticas, dada a grande área exposta dos módulos, que atuam como superfícies aerodinâmicas sujeitas a pressões e sucções. Rajadas intensas podem gerar esforços significativos nas ligações e apoios, especialmente em sistemas elevados ou inclinados. Casos reais em Portugal, como os danos em instalações solares em Seia e Famalicão em 2024, demonstram o risco de falhas estruturais associadas a ventos fortes [16,17].

Embora normas como o Eurocódigo 1 forneçam diretrizes para cálculo de cargas de vento, é essencial considerar as condições específicas do local, já que a variabilidade geográfica e orográfica influencia fortemente os esforços atuantes. Diferenças de altitude, rugosidade do terreno e exposição ao vento podem resultar em cargas muito superiores às previstas por valores médios. Para uma avaliação mais precisa, recorre-se frequentemente a simulações numéricas de vento (CFD), que permitem antecipar comportamentos aerodinâmicos complexos como pressões diferenciais, vórtices e sucções nos bordos dos painéis [18].

Em suma, garantir o dimensionamento adequado das estruturas fotovoltaicas face à ação do vento é essencial para a segurança, fiabilidade e longevidade das instalações.

1.2 Motivação do Estudo

O presente estudo surge da necessidade crescente de garantir a segurança, eficiência e durabilidade das instalações fotovoltaicas, num contexto em que a energia solar

assume um papel cada vez mais relevante na matriz energética nacional e internacional. O rápido aumento do número de sistemas solares instalados em Portugal, aliado à diversidade de condições climáticas e topográficas do território, coloca novos desafios ao dimensionamento estrutural dos painéis solares, especialmente no que diz respeito à ação do vento.

Apesar da existência de normas e regulamentos para o dimensionamento estrutural, vários estudos recentes apontam para limitações significativas destes métodos quando aplicados a sistemas fotovoltaicos, nomeadamente devido à complexidade das interações aerodinâmicas e à influência de fatores locais. A ocorrência de danos estruturais em instalações solares, tanto em Portugal como internacionalmente, evidencia a necessidade de abordagens mais rigorosas e adaptadas à realidade dos projetos.

Neste contexto, surge a oportunidade de aplicar ferramentas de simulação avançadas, como CFD, para estudar com maior rigor o impacto do vento em instalações fotovoltaicas. Esta abordagem permite obter resultados mais próximos da realidade e identificar zonas críticas de pressão e esforço, contribuindo assim para o desenvolvimento de soluções estruturais mais seguras e eficientes.

A presente dissertação pretende dar resposta a essa necessidade, propondo um estudo aplicado, com base em simulações CFD, sobre o efeito do vento em painéis solares fixos. Este trabalho reveste-se de utilidade prática, podendo ser usado como base para o dimensionamento otimizado de estruturas de suporte em contextos semelhantes, contribuindo para uma implementação segura e sustentável da energia solar em Portugal.

1.3 Objetivos do Estudo

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da ação do vento sobre painéis FV, através da aplicação de simulações numéricas em CFD. Pretende-se, com este estudo, contribuir para uma melhor compreensão dos esforços aerodinâmicos atuantes nestes sistemas e apoiar o dimensionamento mais preciso e seguro das estruturas de suporte.

Objetivos específicos

- Analisar e adaptar a modelação *Computer Aided Design* (CAD) da configuração representativa de um sistema agrivoltaico de painéis solares e respetiva estrutura de suporte;
- Realizar simulações CFD para avaliar o comportamento do escoamento do vento sobre a estrutura em diferentes direções e magnitudes;
- Determinar os campos de pressão e os esforços induzidos pelo vento na superfície dos painéis;
- Analisar os resultados obtidos e discutir a sua implicação no dimensionamento estrutural dos sistemas fotovoltaicos;
- Comparar, quando aplicável, os resultados obtidos via simulação com os valores recomendados pelas normas técnicas em vigor e estudos semelhantes.

1.4 Metodologia Adotada

A metodologia seguida neste trabalho assentou na aplicação de simulações numéricas de escoamento atmosférico sobre painéis solares, com o objetivo de avaliar as forças aerodinâmicas resultantes.

Para tal, iniciou-se com a adaptação geométrica da estrutura representativa de um sistema agrovoltaico, utilizando o software SolidWorks.

Posteriormente, a geometria foi importada para o ANSYS Fluent, onde se definiram os domínios de simulação, as malhas computacionais e as condições de fronteira.

Foram realizadas simulações em regime estacionário, em 2D e 3D, considerando diferentes direções e velocidades do vento.

Os resultados obtidos foram analisados em termos de campos de pressão e velocidade, e as forças atuantes/coeficientes de força sobre os painéis foram comparadas com os valores de referência estabelecidos no Eurocódigo 1-1-4 [19], presentes também no Anexo A - secção 4.

A metodologia combinou, assim, uma abordagem computacional rigorosa com uma análise crítica dos resultados face à normativa vigente.

1.5 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, o enquadramento da problemática, os objetivos do estudo e as motivações subjacentes.

No Capítulo 2 é desenvolvida a revisão bibliográfica, abordando os conceitos fundamentais da aerodinâmica em estruturas fotovoltaicas, ação do vento e modelação CFD.

O Capítulo 3 descreve a metodologia seguida, detalhando os modelos utilizados, as simulações realizadas e os parâmetros adotados.

Segue-se o Capítulo 4, onde são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, bem como os contributos, limitações identificadas e sugestões para estudos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo visa enquadrar e sustentar teoricamente o trabalho desenvolvido nesta dissertação, abordando os principais conceitos relacionados com os sistemas fotovoltaicos, a ação do vento sobre as estruturas, os métodos de cálculo normativos e as ferramentas de simulação computacional utilizadas.

Inicialmente, na Secção 2.1, efetua-se uma descrição geral da importância da aerodinâmica nos painéis FV para garantir segurança e eficiência, incluindo uma análise das diretrizes de projeto que vêm a ser implementadas neste sentido.

Seguidamente, na Secção 2.2, são introduzidos os conceitos fundamentais associados ao efeito do vento em estruturas, com a abordagem às pressões aerodinâmicas e às principais grandezas envolvidas na análise destas ações.

Na Secção 2.3, descreve-se a metodologia de cálculo convencional das cargas de vento segundo o Eurocódigo 1 através das respetivas fórmulas, parâmetros e correções necessárias à determinação das pressões atuantes em superfícies expostas.

Posteriormente, na Secção 2.4, é apresentada a aplicação da CFD na análise do comportamento do vento em estruturas, destacando-se as vantagens e limitações desta abordagem relativamente aos métodos normativos tradicionais.

Por fim, a Secção 2.5 explicita as ferramentas de modelação e simulação utilizadas, nomeadamente os softwares SolidWorks e ANSYS Fluent, bem como os modelos e estratégias de simulação adotados para a realização das análises numéricas.

Esta revisão bibliográfica visa, assim, fornecer o enquadramento teórico e prático necessário para o desenvolvimento do estudo apresentado nesta dissertação.

2.1 Importância da Análise Aerodinâmica em FV

A análise aerodinâmica desempenha um papel fundamental na segurança e eficiência de sistemas fotovoltaicos (FV).

Instalações FV expõem grandes superfícies planas ao vento, tornando-as suscetíveis a pressões de sucção e esforços de levantamento (*uplift*) que podem comprometer a integridade estrutural se não forem devidamente consideradas.

Estudos de casos em eventos climáticos extremos evidenciam falhas estruturais em sistemas FV devido a ventos intensos – por exemplo, parques solares e painéis em edifícios sofreram danos significativos sob furacões, mesmo quando as instalações cumpriam as normas vigentes, o que indica possíveis lacunas nos critérios de projeto. De fato, análises pós-tempestade em instalações no Caribe mostraram perda total de alguns painéis apesar de estarem dentro do código, revelando a necessidade de

requisitos mais rigorosos para ventos extremos [20]. Como se observa na Figura 2.1, os danos sofridos em instalações fotovoltaicas após eventos de vento extremo são significativos. Estas imagens, recolhidas por Robinson (LBNL) e Schneider Electric, documentam a diferença no impacto total de sistemas sob diferentes furacões em St. Croix, reforçando a necessidade de uma análise aerodinâmica rigorosa no dimensionamento de projetos solares em regiões expostas [20].



Figura 2.1: Danos causados por tempestades em St. Croix após o furacão Maria (em cima) e após o furacão Fiona (em baixo). Fotografias de Gerald Robinson, Lawrence Berkeley National Laboratory (em cima) e Schneider Electric (em baixo).

Em geral, a literatura destaca a vulnerabilidade dos painéis FV a condições ambientais severas, apontando não só riscos de falha estrutural, mas também queda de desempenho e interrupções operacionais em cenários de vento forte [21].

Além dos eventos catastróficos, ventos moderados no dia a dia também impactam os painéis FV. Mesmo rajadas de vento relativamente comuns podem gerar forças de pressão e sucção alternadas na superfície do painel, provocando vibrações e fadiga. Essas cargas dinâmicas levam ao agravamento de microfissuras nas células fotovoltaicas e no vidro, acelerando a degradação dos módulos [22].

Estudos do NREL salientam que, com a tendência de utilização de módulos cada vez maiores e mais finos, esse efeito é exacerbado – painéis de grande área e espessura reduzida “captam” mais vento e sofrem maiores deformações, aumentando o risco de danos [22].

Em suma, a ação do vento pode reduzir a vida útil e a confiabilidade das instalações solares, tornando imprescindível uma análise aerodinâmica cuidadosa durante a fase de projeto. Vale notar que a própria disposição física dos painéis influencia os esforços: por exemplo, uma instalação mal orientada ou com inclinação inadequada em relação à cobertura de um edifício pode comprometer a segurança das estruturas

de suporte devido à maior exposição ao vento [23].

Há casos em que painéis instalados com inclinação diferente da do telhado atuaram como “asas”, aumentando a sucção e resultando em danos ou até desprendimento dos módulos. Tais incidentes reforçam a importância de considerar criteriosamente os aspectos aerodinâmicos em qualquer tipo de montagem – seja em telhados, em solo ou estruturas elevadas – assegurando que os esforços nos painéis (e consequentemente transmitidos às estruturas) permaneçam dentro de limites seguros.

2.1.1 Abordagem da Análise Aerodinâmica e Diretrizes de Projeto

Dada a criticidade do vento, engenheiros e pesquisadores têm desenvolvido diversas abordagens para analisar as cargas aerodinâmicas em sistemas FV.

Os ensaios em túnel de vento são uma técnica consagrada para medir coeficientes de pressão atuantes em painéis solares, reproduzindo diferentes ângulos de incidência do vento e configurações de instalação. A Figura 2.2 [24] permite demonstrar um teste de estrutura FV da empresa Solar Group, por forma a enriquecer a base de dados que sustenta o seu dimensionamento de soluções [20].

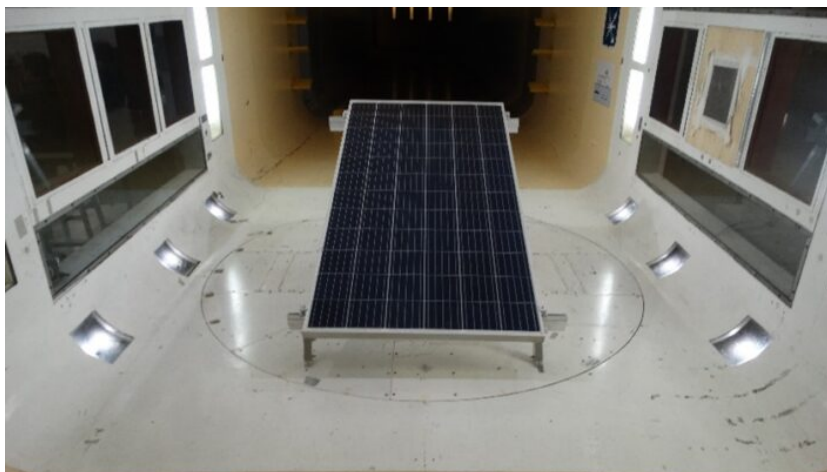


Figura 2.2: Ensaio de estrutura da Solar Group em túnel de vento

Em paralelo, o avanço da dinâmica dos fluidos computacional permite simular o escoamento do ar em torno de módulos FV, estimando distribuições de pressão com grande detalhe – informação que depois é usada em modelos de elementos finitos para avaliar tensões em painéis e suportes [25].

Essas análises mostram que os carregamentos de vento dependem de múltiplos fatores, entre eles: ângulo de inclinação do painel, direção do vento incidente, altura em relação ao solo ou telhado, geometria do módulo, e efeitos de sombreamento aerodinâmico entre fileiras de painéis.

Por exemplo, a distância (*gap*) entre painéis adjacentes e entre o painel e a superfície de montagem pode alterar significativamente a distribuição de pressões nas faces superior e inferior.

Estudos indicam que aumentar o espaçamento entre módulos tende a reduzir as cargas líquidas de vento, devido à redução de efeitos de canalização e vórtices entre os painéis [25].

Por outro lado, painéis instalados muito próximos da superfície (como telhados planos) podem experimentar maiores coeficientes de sucção nas bordas expostas. Dessa forma, a configuração ótima – em termos aerodinâmicos – muitas vezes envolve compromissos entre eficiência energética (inclinação ideal, densidade de módulos) e estabilidade ao vento.

No que toca às normas e diretrizes de projeto, tem havido uma evolução para incorporar as especificidades das estruturas fotovoltaicas. Historicamente, os códigos de construção (como o Eurocódigo 1 ou normas ASCE) tratavam os painéis solares de forma genérica, equiparando-os a elementos acessórios de coberturas ou placas planas, o que podia subestimar ou superestimar as cargas reais. Estudos evidenciam que a aplicação direta de normas generalistas, sem ajustes, pode levar a erros de projeto – seja por falta de segurança ou por sobredimensionamento dispendioso [26].

Nas últimas revisões, organismos internacionais têm desenvolvido orientações específicas: por exemplo, fatores de pressão em painéis FV para diferentes cenários de montagem, coeficientes de ressalto para painéis em beirais e recomendações para arranjos em parques solares expostos.

Ainda assim, face à diversidade de situações (instalações em telhados inclinados, planos, isoladas no solo, com seguidores solares, etc.) com exemplo de algumas configurações presentes na Figura 2.3, persiste a necessidade de avaliações aerodinâmicas pormenorizadas em projetos de maior envergadura ou localizados em zonas de ventos extremos [27-30]. Muitos projetos recorrem a ensaios dedicados ou ferramentas computacionais para prever fenómenos como instabilidades aeroelásticas e vibrações induzidas pelo vento.

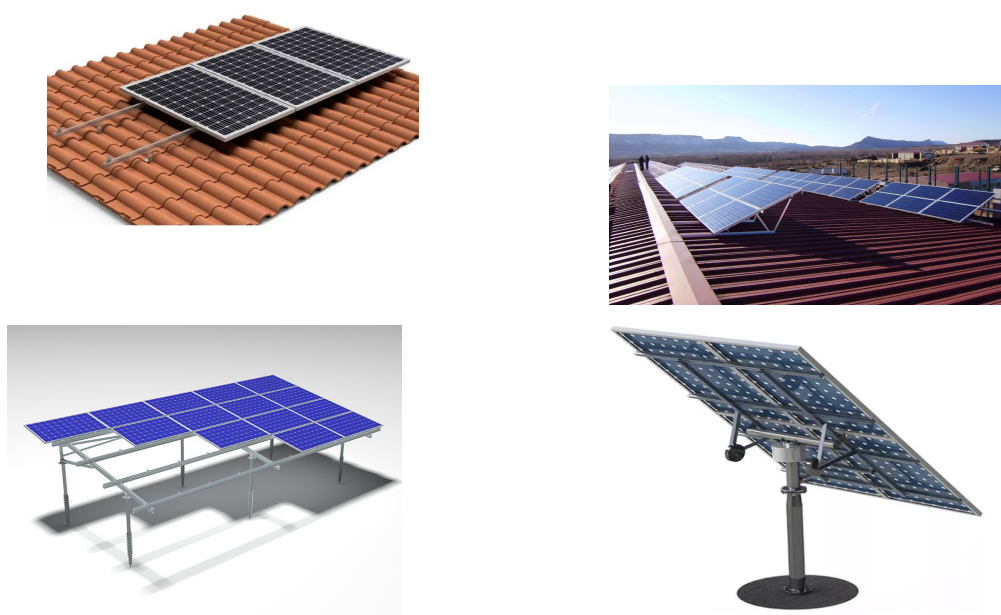


Figura 2.3: Vários tipos de configurações de instalação de painéis FV

Em resumo, a análise aerodinâmica em sistemas fotovoltaicos é indispensável para garantir que os painéis e as suas estruturas de suporte resistam aos esforços do vento ao longo de toda a sua vida útil.

A combinação de estudos experimentais, simulações computacionais e o cumprimento (e melhoria) das normas técnicas permite identificar estratégias de mitigação, como otimização do espaçamento entre módulos, uso de defletores ou perfis aerodinâmicos, e escolhas adequadas de fixação e inclinação. Com tais medidas, busca-se não apenas evitar falhas catastróficas em eventos extremos, mas também minimizar a degradação gradual dos painéis, assegurando desempenho e segurança duradoura do sistema FV [20].

Em última instância, ao incorporar a análise aerodinâmica desde as fases iniciais de concepção e projeto, aumenta-se a resiliência das instalações solares frente ao vento, protegendo o investimento, a produção de energia e a integridade estrutural, mesmo sob condições atmosféricas adversas.

Tendo em conta os diversos fatores que condicionam o impacto do vento em sistemas fotovoltaicos, nesta dissertação recorre-se à utilização de ferramentas de simulação computacional (CFD) para avaliar os esforços aerodinâmicos atuantes sobre um painel específico, permitindo retirar ilações quanto às cargas efetivas aerodinâmicas a considerar no seu dimensionamento.

2.2 Efeito do Vento em Estruturas - Conceitos Fundamentais

2.2.1 Natureza Física do Vento

O vento é essencialmente o movimento de ar originado por diferenças de pressão na atmosfera. De forma geral, o ar desloca-se das regiões de alta pressão para as de baixa pressão, num fenómeno impulsionado pelo aquecimento solar desigual da superfície terrestre. Em escala global, esse aquecimento diferencial gera padrões de ventos predominantes, influenciados pela rotação da Terra (efeito de Coriolis) que desvia os fluxos de ar [31].

Perto do equador, o sol incide quase na vertical durante a maior parte do ano, o que faz com que o ar quente suba e se desloque em direção aos polos. Nas regiões polares, o ar mais frio desce e move-se de volta para o equador. No entanto, este movimento não é direto, devido à rotação da Terra, que gera o efeito de Coriolis: no Hemisfério Norte, os ventos desviam-se para a direita e no Hemisfério Sul para a esquerda.

Junto ao equador, os alísios (ou *trade-winds*) convergem numa zona de ventos fracos chamada *doldrums*, localizada na *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ), onde se regista intensa atividade meteorológica. Esta zona, situada aproximadamente a 10°N, coincide com a latitude da temperatura média anual mais elevada, resultado da maior massa terrestre no Hemisfério Norte.

Cerca de 30° de latitude norte e sul, o ar que subiu no equador arrefece e desce, formando regiões de céu limpo e pouca precipitação conhecidas como latitude dos cavalos. Aqui, parte do ar move-se de volta para o equador, originando os ventos alísios, quentes e constantes. Este movimento global de ar entre o equador e os 30° é designado por célula de Hadley. Entre os 40° e os 60° de latitude, o ar mais frio e

descendente move-se para norte e sul sob a forma de ventos de oeste predominantes *westerlies*. Já entre os 50° e 60°, estes ventos encontram massas de ar extremamente frias vindas dos polos, formando as *easterlies* polares, que sopram do leste e contribuem para fechar a circulação atmosférica global [31].

A Figura 2.4 providenciada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ilustra uma representação esquemática do modelo aproximado de comportamento do vento gerado pela Terra [31].

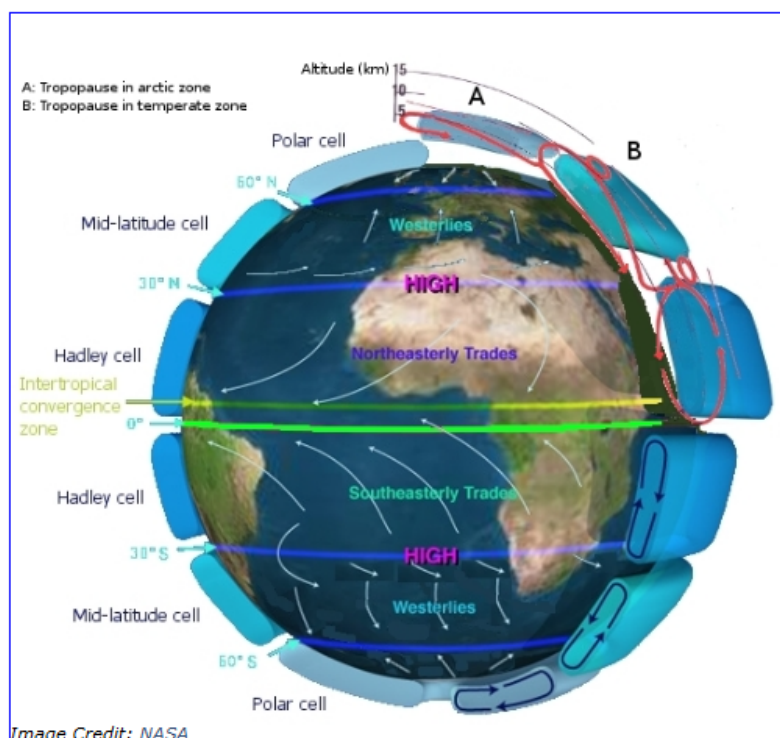


Figura 2.4: Modelo aproximado do comportamento do vento no planeta Terra

Em escalas regionais e locais, outros fatores como relevo, variação diurna de temperatura e presença de massas de água também contribuem para a modulação da direção e intensidade dos ventos.

No nível próximo ao solo, a Camada Limite Atmosférica (CLA) desempenha um papel crucial. Nesta camada de algumas centenas de metros, o atrito do ar com a superfície terrestre desacelera o escoamento, tornando-o altamente turbulento e irregular [32]. Isso significa que a velocidade do vento próximo ao terreno é menor do que em altitudes mais elevadas e apresenta flutuações rápidas (rajadas). Obstáculos naturais e artificiais como edificações, árvores ou montanhas, aumentam essa rugosidade e intensificam a turbulência do vento. Em consequência, o vento real observado numa dada localização é uma grandeza extremamente variável no tempo e no espaço. Mesmo a velocidade média anual de uma região pode diferir significativamente de um ano para o outro, dificultando as previsões precisas de longo prazo. A título de exemplo, medições evidenciam que medir o vento por 1 ano pode induzir erros consideráveis na estimativa do recurso eólico o que reflete a natureza estocástica e oscilatória do regime de ventos.

Adicionalmente, a interação do vento com a orografia produz efeitos característicos. O escoamento tende a acelerar ao contornar obstáculos e relevos: é comum observar velocidades de vento mais altas no topo de colinas e morros, pois o relevo atua como "mini-funil" concentrando as linhas de fluxo numa área menor o que faz aumentar a velocidade. Em contraste, no lado oposto (sotavento) destes obstáculos, a corrente de ar pode separar-se e formar regiões de recirculação. Um gradiente de pressão adverso na encosta sotavento pode inclusive forçar o escoamento a deslocar-se e gerar remoinhos estacionários (bolsas de ar parado ou em sentido inverso).

Esses fenómenos ilustram que o vento sentido por uma estrutura civil resulta de uma combinação complexa de processos físicos, desde a circulação atmosférica em grande escala até interações locais de escoamento em torno da própria estrutura e do terreno circundante [33].

2.2.2 Parâmetros Característicos do Vento

A caracterização do vento é um passo essencial na análise e no dimensionamento de estruturas, assumindo particular importância em áreas como a engenharia civil, a energia eólica e a avaliação de impactos ambientais. Entre os parâmetros fundamentais para descrever o vento encontram-se a sua velocidade, direção, intensidade e turbulência, sendo cada um determinante para avaliar a forma como este interage com edifícios, infraestruturas e sistemas de conversão de energia.

A velocidade do vento descreve a taxa de deslocamento do ar numa direção específica e pode ser expressa em unidades como metros por segundo (m/s), quilómetros por hora (km/h) ou nós (1 nó = 1,852 km/h). Em contextos de engenharia, é comum a utilização de valores médios horários obtidos a uma altura de referência (frequentemente 10 metros acima do solo), embora também se considerem rajadas de curta duração, que representam picos instantâneos de velocidade. Esta grandeza tende a aumentar com a altura, devido à redução do atrito exercido pelo solo, sendo igualmente influenciada pela rugosidade da superfície, pela existência de obstáculos e pela topografia local. O conceito de velocidade base do vento, por exemplo, constitui um parâmetro normativo utilizado no dimensionamento estrutural e é normalmente obtido a partir de análises estatísticas considerando períodos de retorno de 50 anos, tal como previsto no Eurocódigo.

A direção do vento refere-se ao ponto de origem do escoamento atmosférico e pode ser indicada em graus — considerando 0° para Norte, 90° para Este, e assim sucessivamente — ou através de designações cardeais como Norte (N), Nordeste (NE), entre outras [34]. A direção predominante do vento é relevante para a orientação de edifícios, painéis solares, turbinas eólicas e para a previsão de fenómenos meteorológicos locais, como a «Nortada» na costa portuguesa, que ocorre principalmente de Norte–Noroeste durante o verão [35]. A análise estatística da direção, frequentemente apresentada sob a forma de rosas-dos-ventos, permite identificar padrões sazonais e adaptar projetos às condições reais do local, como ilustrado na Figura 2.5, onde se apresenta uma rosa-dos-ventos e o histograma com as respetivas classes de velocidade para a Estação Meteorológica SBGL num dado período [36].

A intensidade do vento pode ser classificada qualitativamente através da Escala de Beaufort, que associa intervalos de velocidade a descrições dos efeitos observáveis em terra e no mar. Esta escala, composta por 13 níveis (de 0 a 12), vai desde “calmo”

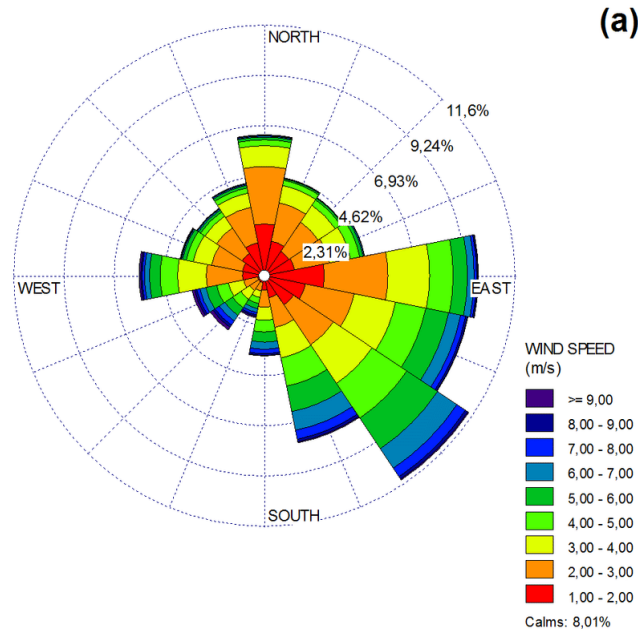


Figura 2.5: Exemplo de rosa-dos-ventos e histograma (%) das classes de velocidade do vento (m/s) da Estação Meteorológica SBGL para o período 2003–2013.

(velocidade inferior a 0,2 m/s) até “furacão” (superior a 32,6 m/s), permitindo uma avaliação rápida do potencial impacto do vento em pessoas, objetos e estruturas [37]. Em engenharia, para além da escala de Beaufort, a intensidade é quantitativamente avaliada através da pressão dinâmica, calculada pela expressão [2.1]:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.1)$$

Equação simplificada da pressão dinâmica, onde: q representa a pressão dinâmica (Pa), ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V corresponde à velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) [19].

A turbulência do vento refere-se às flutuações rápidas e irregulares da velocidade e direção do escoamento, resultantes da interação do vento com obstáculos naturais ou artificiais, variações de temperatura e instabilidades atmosféricas [38]. A intensidade de turbulência, é definida como o rácio entre o desvio padrão das flutuações da velocidade do vento e a sua velocidade média através da Equação [2.2]:

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad (2.2)$$

Equação da intensidade de turbulência, onde: I representa a intensidade de turbulência (adimensional), σ_u corresponde ao desvio padrão da componente longitudinal da velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), \bar{U} representa a velocidade média longitudinal do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) [38].

A turbulência pode aumentar significativamente as cargas dinâmicas sobre as estruturas, sendo um fator crítico na análise de estabilidade e conforto. Valores típicos

de intensidade de turbulência variam entre 0,10 (zonas costeiras expostas) e 0,30 (áreas urbanas densas).

A turbulência é especialmente relevante para o dimensionamento de estruturas flexíveis, como pontes ou torres, pois pode induzir esforços dinâmicos significativos e aumentar a probabilidade de fenômenos como o desprendimento de vórtices [38].

Além dos parâmetros mencionados, outros fatores influenciam o comportamento do vento e a sua interação com as estruturas:

- Densidade do ar: afeta a pressão dinâmica exercida pelo vento sobre as superfícies.
- Perfil vertical do vento: a velocidade do vento geralmente aumenta com a altura devido à diminuição da influência da rugosidade do terreno.
- Topografia e obstáculos: elementos como edifícios, árvores e relevo do terreno podem alterar significativamente o fluxo do vento, criando zonas de aceleração ou abrigo.
- Tipo de escoamento: o vento pode apresentar escoamento laminar ou turbulento, dependendo das condições atmosféricas e das características do terreno.

A compreensão e quantificação destes parâmetros são essenciais para a modelação precisa das ações do vento em estruturas, garantindo a segurança e eficiência no seu dimensionamento.

Nos capítulos seguintes desta dissertação, estes parâmetros serão analisados com maior profundidade e rigor, particularmente através da descrição detalhada da norma Eurocódigo EN 1991 Parte 1-4, que estabelece metodologias padronizadas para a quantificação das ações do vento em estruturas. Esta norma, fundamental para o dimensionamento estrutural na União Europeia, fornece os procedimentos de cálculo e os coeficientes aerodinâmicos necessários para traduzir os parâmetros físicos do vento em forças de dimensionamento aplicáveis a diferentes tipologias estruturais, incluindo sistemas fotovoltaicos.

2.2.3 Tipos de Cargas de Vento

A interação entre o vento e uma estrutura resulta em diferentes tipos de cargas aerodinâmicas, cuja natureza depende do regime de escoamento, da geometria da estrutura e das suas características dinâmicas. Estas ações podem ser classificadas, de forma geral, como cargas estáticas, cargas dinâmicas e cargas aeroelásticas, todas relevantes no dimensionamento seguro de edifícios, pontes, torres ou sistemas solares expostos [39].

Cargas Estáticas

As cargas estáticas representam a ação média do vento ao longo do tempo, assumindo um regime permanente. São habitualmente determinadas a partir da velocidade média do vento, considerada a uma determinada altura de referência [19]. A pressão de referência (ou pressão dinâmica média) é dada por [2.1], onde ρ é a densidade do ar (tipicamente $1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ao nível do mar). Esta pressão é depois ajustada

por coeficientes de forma e exposição para calcular a carga final sobre a estrutura, segundo o Eurocódigo 1-4 [19].

Em estruturas rígidas como edifícios ou painéis solares fixos, estas cargas são predominantes e utilizadas para avaliar forças de arrasto e levantamento em condições estacionárias.

Cargas Dinâmicas

As cargas dinâmicas surgem devido à turbulência atmosférica e às rajadas — flutuações rápidas e irregulares da velocidade e direção do vento. Ao contrário das cargas estáticas, estas induzem esforços temporais variáveis, capazes de excitar modos vibratórios das estruturas.

A resposta dinâmica depende da frequência natural da estrutura, da sua massa e rigidez, e da intensidade das flutuações do vento. Em estruturas esbeltas ou flexíveis, como passagens aéreas ou postes altos, a resposta dinâmica pode conduzir a amplificação significativa das cargas e deslocamentos.

A descrição estatística do vento instável é normalmente feita por espectros de potência, como o espectro de Davenport ou Kaimal, que relacionam a energia das flutuações com a frequência [39].

Vibrações Induzidas pelo Vento

Fenómenos de interação fluido-estrutura podem resultar em vibrações sustentadas ou instáveis, mesmo sob vento de intensidade moderada:

- Desprendimento de vórtices (*vortex shedding*): Ocorre quando o escoamento alternado de vórtices em torno da estrutura induz forças oscilantes transversais [39]. A Equação da frequência de *shedding* [2.3] é dada por:

$$f_s = St \cdot \frac{v}{D} \quad (2.3)$$

Equação da frequência de desprendimento de vórtices, onde: f_s representa a frequência de desprendimento de vórtices (Hz), St corresponde ao número de Strouhal (adimensional, tipicamente $St \approx 0,2$), v representa a velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D corresponde ao comprimento característico da estrutura (m).

Quando f_s coincide com a frequência natural da estrutura, podem ocorrer fenómenos de vibração ressonante [39].

- *Flutter*: Instabilidade aeroelástica que combina torção e flexão, especialmente perigosa em pontes ou painéis solares móveis. É autoexcitada e pode conduzir à falha estrutural mesmo em ausência de crescimento progressivo da velocidade do vento [39].
- Galope: Oscilação transversal a baixa frequência, comum em estruturas não simétricas, como cabos ou perfis com geometria assimétrica. Requer análise de estabilidade não linear [39].

Cargas Globais vs. Locais

- Cargas globais afetam a estrutura como um todo, como o arrasto horizontal total sobre uma fachada ou os momentos fletores gerados pelo vento em torres e postes [40].
- Cargas locais concentram-se em zonas específicas da estrutura, como a sucção em cantos vivos de coberturas ou painéis inclinados, onde a separação do escoamento induz pressões negativas elevadas (ex: coeficiente de pressão $C_p < -3.0$) [40].

Estas últimas são particularmente importantes em estruturas modulares, como painéis solares, onde a má fixação localizada pode conduzir a falhas catastróficas.

2.2.4 Coeficientes Aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos são grandezas adimensionais fundamentais para quantificar as ações do vento sobre estruturas. Ao relacionarem pressões ou forças com valores de referência, permitem generalizar resultados experimentais e numéricos, facilitando a comparação entre diferentes geometrias, orientações e condições de escoamento. São amplamente utilizados em normas de dimensionamento e estudos de engenharia do vento [41]. As Equações 2.4, 2.5 e 2.6 representam as fórmulas para três coeficientes importantes do decorrer deste trabalho.

Definição dos Coeficientes

Coeficiente de Pressão (C_p):

Relaciona a pressão local p com a pressão dinâmica de referência q :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q} \quad \text{onde} \quad q = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.4)$$

Nesta expressão: C_p representa o coeficiente de pressão (adimensional), p corresponde à pressão local (Pa), p_∞ corresponde à pressão de referência medida fora da zona perturbada pelo escoamento (Pa), q é a pressão dinâmica (Pa), ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V é a velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Valores positivos de C_p indicam sobrepressão (face exposta ao vento), enquanto valores negativos indicam sucção (regiões de sotavento ou laterais) [41].

Coeficiente de Força (C_f):

Quantifica a tensão de corte na superfície devido ao atrito:

$$C_f = \frac{\tau_w}{q} \quad (2.5)$$

Nesta equação: C_f representa o coeficiente de força (adimensional), τ_w corresponde à tensão tangencial na parede (Pa), q é a pressão dinâmica (Pa). Este coeficiente é utilizado para quantificar os efeitos do atrito do escoamento na superfície e é especialmente relevante em estudos de resistência aerodinâmica [41].

Coeficiente de Arrasto (C_d):

Representa a resistência aerodinâmica total:

$$C_d = \frac{F_d}{q \cdot A} \quad (2.6)$$

Neste caso: C_d corresponde ao coeficiente de arrasto (adimensional), F_d representa a força total de arrasto (N), A é a área de referência (m^2), q é a pressão dinâmica (Pa). Este coeficiente é amplamente utilizado para quantificar a resistência aerodinâmica total de um corpo, englobando tanto o arrasto de forma como o arrasto de atrito [41].

Influência da Geometria

A geometria da estrutura influencia fortemente os coeficientes aerodinâmicos, refletindo-se na interação com o escoamento do vento. Formas planas ou com cantos vivos tendem a gerar separações de escoamento e zonas de recirculação, aumentando o arrasto e a sucção. Já formas arredondadas favorecem o escoamento aderente, reduzindo os esforços. Estes coeficientes são essenciais para o dimensionamento de estruturas expostas, como edifícios, chaminés ou painéis solares. A Tabela 2.1 apresenta exemplos típicos para diferentes configurações geométricas [19, 42].

Tabela 2.1: Influência da forma da estrutura nos coeficientes aerodinâmicos.

Tipo de Estrutura	Características	Coefficientes Típicos
Prismas Retangulares	Faces frontais sujeitas a pressão direta do vento. Faces laterais e traseiras sofrem separação do escoamento.	$C_p \approx +0,7$ (frontal), $C_p \approx -1,2$ (laterais e traseiras)
Superfícies Inclinadas (ex.: painéis solares)	Inclinações comuns entre 10° e 30° provocam forte sucção na face inferior.	$C_p \approx -2,0$ a $-3,0$ (face inferior)
Estruturas Esbeltas (ex.: chaminés)	Escoamento ao redor de superfícies cilíndricas ou com perfil aerodinâmico.	$C_d \approx 0,7$ (cilindros), $C_d \approx 0,04-0,1$ (perfis aerodinâmicos)

Pressão Interna vs. Externa

Coeficiente de Pressão Externa (C_{pe}):

Corresponde à ação direta do vento sobre a superfície exterior de uma estrutura. C_{pe} depende, essencialmente, da orientação da superfície face ao escoamento e da rugosidade do terreno envolvente [43].

Coeficiente de Pressão Interna (C_{pi}):

Está associado às diferenças de pressão que se estabelecem no interior de estruturas com aberturas, como portas, janelas ou vãos técnicos. C_{pi} tende a ser reduzido em edifícios bem vedados; no entanto, em estruturas permeáveis, pode amplificar significativamente as cargas atuantes. Por exemplo, em hangares industriais com aberturas assimétricas, um C_{pi} negativo intensifica a sucção nas fachadas expostas. Valores de referência fornecidos por normas, como o Eurocódigo 1, baseiam-se em

geometrias padronizadas, o que justifica, em certos casos, a utilização de simulações CFD para obtenção de estimativas mais rigorosas [43].

2.2.5 Fenómenos de Turbulência e Separação do Escoamento

A interação entre o vento e as estruturas envolve fenômenos físicos complexos, entre os quais a turbulência e a separação do escoamento assumem particular relevância. Estes fenômenos afetam diretamente a distribuição das pressões sobre as superfícies e, conseqüentemente, as forças exercidas pelas ações do vento, sendo elementos-chave no dimensionamento estrutural e na avaliação da estabilidade e durabilidade de construções expostas.

Escoamento Laminar e Turbulento

O escoamento atmosférico pode apresentar dois regimes principais: laminar e turbulento. O regime laminar caracteriza-se por linhas de corrente paralelas e organizadas, com transporte previsível de massa e energia. Este regime ocorre a baixos números de Reynolds ($Re < 2000$), típicos de condições de escoamento lento ou superfícies extremamente lisas [36,44].

Por oposição, o escoamento turbulento manifesta-se por flutuações caóticas da velocidade e da pressão, induzindo mistura transversal intensa e formação de estruturas vorticosas. É o regime dominante na maioria das situações práticas de engenharia civil e ambiental, sobretudo para $Re > 4000$ [36,44].

A equação do número de Reynolds [2.7], que permite caracterizar o regime do escoamento (laminar ou turbulento), é dada por:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (2.7)$$

Nesta equação: Re (adimensional) é o número de Reynolds, ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), U é a velocidade média do escoamento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), L é o comprimento característico da estrutura (m), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

A Figura 2.6 exemplifica a diferença no comportamento de um escoamento em regime laminar e turbulento [44].

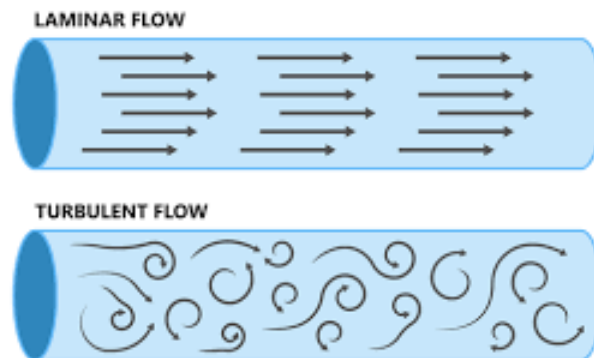


Figura 2.6: Escoamento laminar e turbulento em tubo

Separação do Escoamento e Formação de Vórtices

Quando o escoamento encontra uma superfície curva, um obstáculo ou uma descontinuidade geométrica, poderá ocorrer separação da camada limite, isto é, o fluido deixa de acompanhar a superfície. Isto acontece frequentemente em regiões de gradiente de pressão adverso, onde a energia cinética do escoamento não é suficiente para vencer a resistência ao avanço [45].

A jusante do ponto de separação formam-se zonas de recirculação e vórtices, cujos efeitos podem incluir:

- Redução local da pressão ($C_p < 0$),
- Flutuações periódicas de forças sobre a estrutura,
- Riscos de vibração induzida e ressonância estrutural.

Um caso paradigmático é o rasto de vórtices de Kármán em que vórtices se destacam alternadamente da traseira de um corpo, criando forças oscilatórias [45] cuja representação gráfica se encontra ilustrada na Figura 2.7 [45]. A frequência de desprendimento desses vórtices é dada por:

$$f = S_t \cdot \frac{V}{D} \quad (2.8)$$

Nesta equação: f representa a frequência de desprendimento de vórtices (Hz), S_t é o número de Strouhal (tipicamente $S_t \approx 0,2$ para cilindros), V é a velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D é a dimensão característica do obstáculo (m).

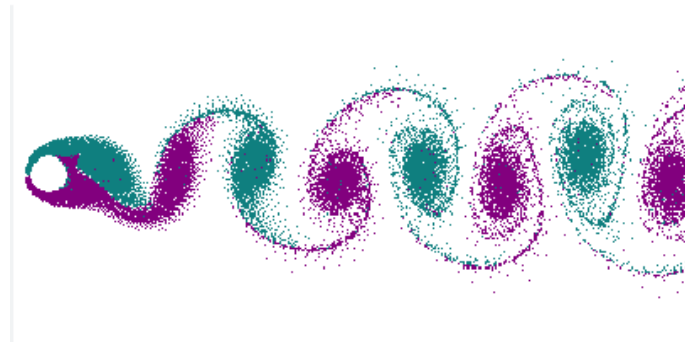


Figura 2.7: Exemplificação de um padrão Vórtice de Von Kármán

Estruturas com formas não convencionais, como painéis solares inclinados, fachadas não ortogonais ou coberturas curvilíneas, intensificam fenômenos de separação e turbulência. Estes provocam pressões negativas intensas em regiões como as bordas, que podem atingir valores de $C_p < -3,0$, afetando a integridade das fixações e suportes [39, 45, 46].

Adicionalmente, a não-uniformidade do campo de pressões nas superfícies e a existência de zonas de recirculação fazem com que os métodos empíricos simplificados não sejam fiáveis nestas condições.

Os métodos normativos (como o Eurocódigo 1–Parte 4) oferecem soluções conservadoras e simplificadas para situações padrão. No entanto, quando se trata de estruturas com geometrias complexas ou em ambiente urbano denso, é imprescindível recorrer a:

- Modelação CFD: utilizando simulações *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) ou *Large Eddy Simulation* (LES), para prever com maior detalhe zonas de separação, gradientes de pressão e forças instáveis.
- Ensaios experimentais em túnel de vento: essenciais para validação dos modelos computacionais e análise do comportamento dinâmico da estrutura.

Em particular, para instalações de painéis solares montados ao solo, a interação entre fileiras pode amplificar significativamente as cargas de vento (até +30% comparado com instalações isoladas), sendo o fenómeno de recirculação entre filas um fator crítico a considerar no dimensionamento estrutural.

2.3 Métodos de Cálculo Convencionais (Normas Eurocódigo, etc.)

As ações do vento constituem um carregamento fundamental no projeto de estruturas, devendo ser avaliadas através de metodologias normativas estabelecidas. Diversas normas internacionais apresentam procedimentos convencionais para o cálculo destas ações, todas baseadas em princípios similares: definir uma velocidade de referência do vento para a região, converter essa velocidade em pressões de projeto e aplicar coeficientes aerodinâmicos que representem os efeitos do vento sobre as superfícies da estrutura.

Entre as normas mais reconhecidas estão o Eurocódigo 1 – Parte 1-4 (EN 1991-1-4) na Europa, a norma norte-americana ASCE/SEI 7 (dos EUA) e a brasileira NBR 6123 (no Brasil), entre outras. Cada uma delas fornece parâmetros e coeficientes para estimar as forças devidas ao vento com base em dados climáticos locais e características da estrutura. Por exemplo, a NBR 6123 é descrita como a norma brasileira que define os parâmetros de cálculo para estruturas sujeitas às forças do vento [47]. De modo análogo, a norma norte-americana ASCE 7-16 inclui procedimentos de cálculo do vento, oferecendo tanto um método simplificado quanto um método analítico para diferentes tipos de edifícios [48]. Em essência, todas essas normas seguem o mesmo conceito geral de tratar o vento como uma pressão dinâmica equivalente atuando nas superfícies da infraestrutura, ajustada por fatores que levam em conta a exposição ao vento, a rugosidade do terreno e a forma da estrutura.

Dada a ampla gama de normas existentes, a presente dissertação focar-se-á no Eurocódigo devido à sua adequação ao contexto português e à necessidade de delimitar o foco do trabalho.

O Eurocódigo 1 (EN 1991) foi adotado em Portugal como referência obrigatória para ações em estruturas, incluindo vento, tendo sido publicado em versão portuguesa pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ) em 2010. Isto significa que, para um projeto localizado em Portugal, as cargas de vento devem ser determinadas de acordo com o Eurocódigo e o seu Anexo Nacional. Além disso, concentrar a análise no Eurocódigo permite aprofundar os procedimentos normativos mais relevantes para

o local de estudo, evitando uma comparação extensa entre normas internacionais que exigiria um tempo de investigação alargado. Embora outras normas como a ASCE 7 e a NBR 6123 apresentem metodologias semelhantes, a escolha do Eurocódigo justifica-se por ser a norma europeia harmonizada, adotada em Portugal, refletindo as condições climáticas locais e as práticas de engenharia correntes no país. Vale mencionar que Portugal possui parâmetros nacionais próprios dentro do Eurocódigo – por exemplo, o território continental é dividido em zonas de vento (A e B) com velocidades básicas recomendadas de 27 m/s e 30 m/s, respetivamente, conforme o Anexo Nacional (para consulta no Anexo [.6](#)).

Assim, o Eurocódigo 1–1-4 fornece um enquadramento adequado para calcular as ações do vento, garantindo que o projeto estrutural atenda aos requisitos de segurança e desempenho estabelecidos para o contexto português [\[19\]](#).

2.3.1 Introdução ao Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas

O Eurocódigo 1 – Parte 1-4 (EN 1991-1-4) estabelece um procedimento detalhado para a determinação das ações do vento em edifícios e outras obras de engenharia civil. Esse procedimento segue uma série de passos lógicos, desde a caracterização do vento regional até a obtenção das pressões de projeto nas superfícies da estrutura [\[19\]](#). Abaixo apresentam-se os principais passos e conceitos definidos pela norma, incluindo as fórmulas relevantes para maior clareza:

1. Velocidade Básica do Vento

O ponto de partida é a velocidade básica do vento $v_{b,0}$, definida como a velocidade característica com período de retorno de 50 anos, medida a 10 m de altura em terreno plano aberto (categoria II), durante um intervalo de 10 minutos. Este valor é normalmente obtido a partir de mapas ou tabelas climáticas; por exemplo, o Anexo Nacional do Eurocódigo, presente no Anexo [.6](#), indica $v_{b,0} = 27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para grande parte de Portugal.

Posteriormente, $v_{b,0}$ é ajustada com dois coeficientes: o coeficiente de direção c_{dir} e o coeficiente de sazonalidade c_{season} . O primeiro considera variações estatísticas na intensidade do vento consoante a direção, enquanto o segundo permite ajustar o valor em função da época do ano, considerando períodos com menor probabilidade de ocorrência de ventos extremos. Na ausência de dados específicos, ambos são frequentemente tomados como 1,0 por convenção.

A velocidade de referência do vento v_b é então obtida através da Equação [2.9](#):

$$v_b = c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0} \quad (2.9)$$

2. Rugosidade do terreno e perfil de velocidades

A velocidade do vento varia com a altura e com a rugosidade do terreno. O Eurocódigo classifica os terrenos em cinco categorias (0 a IV), representando desde zonas litorais planas ou mar aberto (rugosidade muito baixa) até centros urbanos densos (rugosidade muito elevada), como evidenciado no Anexo [.5](#). A cada categoria está associado um comprimento de rugosidade z_0 e uma altura mínima z_{min} , a partir da

qual o perfil vertical de velocidade do vento é considerado válido até uma altura máxima z de aproximadamente 200 m, isto é, no intervalo em que a camada limite atmosférica próxima do solo domina e um modelo simples é ainda representativo para efeitos de engenharia. Nesta faixa de alturas, e em particular nas aplicações de projeto estrutural, a descrição média do escoamento revela-se suficiente para captar tendências e ordens de grandeza relevantes.

A velocidade média do vento em função da altura z é obtida através de um perfil logarítmico, ajustado por um coeficiente de rugosidade $c_r(z)$, cuja expressão é dada pela Equação [2.10](#). Este fator traduz, de forma compacta, a influência do tipo de terreno na variação vertical da velocidade, refletindo que perfis mais rugosos fazem crescer a velocidade mais lentamente com a altura.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.10)$$

A Equação é válida para $z_{\min} \leq z \leq 200$ m, onde k_r é um fator empírico dependente da categoria do terreno e z_0 é o comprimento de rugosidade. Para alturas muito próximas do solo, abaixo de z_{\min} , assume-se convencionalmente $c_r(z) = c_r(z_{\min})$, evitando extrapolações onde a formulação logarítmica perde representatividade e a incerteza cresce.

Adicionalmente, pode incluir-se um coeficiente de orografia $c_0(z)$ para considerar efeitos de topografia de grande escala (encostas, cumes ou obstáculos naturais marcados). Em situações de terreno praticamente plano ou sem relevos significativos, toma-se $c_0(z) = 1,0$, o que corresponde à ausência de correções topográficas.

Com estes fatores, a velocidade média do vento a uma dada altura z , considerando a exposição e a orografia, é calculada por:

$$v_m(z) = v_b \cdot c_r(z) \cdot c_0(z) \quad (2.11)$$

Nesta expressão, v_b representa a velocidade básica de referência definida normativamente, enquanto $c_r(z)$ e $c_0(z)$ modulam a variação vertical e os efeitos do relevo, respetivamente. Em termos práticos, o perfil resultante significa que, em terrenos planos e abertos, a velocidade cresce de forma logarítmica com a altura, ao passo que ambientes urbanos ou florestados (maior rugosidade) produzem perfis mais “cheios”, isto é, com valores menores junto ao solo e gradientes menos acentuados [\[49\]](#). Esta leitura será usada adiante para contextualizar o cálculo de pressões e as simplificações adotadas a este respeito.

As Figuras [2.8](#) e [2.9](#) ilustram estes aspetos, evidenciando, de forma qualitativa, a aceleração do escoamento em zonas elevadas e a diferença entre perfis para terrenos de orografia simples e complexa.

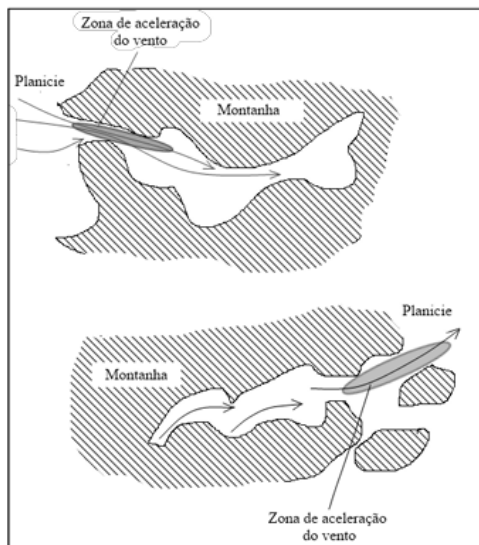


Figura 2.8: Aceleração e mudança de direção do vento em terrenos de orografia complexa

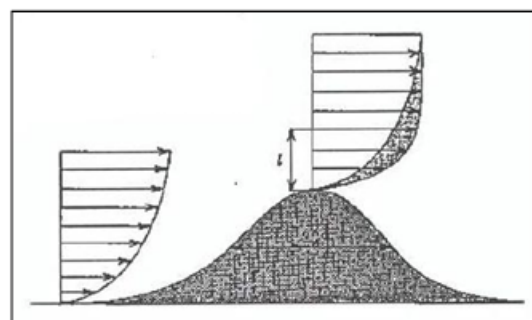


Figura 2.9: Perfil vertical do vento e efeito do relevo/obstáculo

3. Pressão dinâmica de pico do vento

A ação do vento em estruturas é normalmente tratada como uma pressão estática equivalente. O Eurocódigo calcula essa pressão através da pressão dinâmica de pico $q_p(z)$, que combina a pressão correspondente à velocidade média com os efeitos flutuantes de curta duração (rajadas). A expressão recomendada (Eurocódigo 1-1-4, Eq. 4.8), apresentada na Equação 2.12, é:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) \quad (2.12)$$

Nesta expressão: $q_p(z)$ é a pressão dinâmica de pico à altura z (Pa), $v_m(z)$ é a velocidade média do vento à altura z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $I_v(z)$ é a intensidade de turbulência ao nível z , definida como o desvio padrão da componente flutuante da velocidade dividido pela velocidade média nesse nível (adimensional), e ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), que, na ausência de valor nacional específico, é considerada como $1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

O termo $[1 + 7I_v(z)]$ atua como um fator estatístico de pico, derivado de um fator de rajada típico de aproximadamente 3,5, multiplicando a componente média da pressão dinâmica. Assim, $q_p(z)$ representa a pressão máxima esperada, integrando o efeito médio e a variabilidade associada à turbulência do escoamento atmosférico.

Observa-se que, a uma altura z , $q_p(z)$ está relacionado à pressão dinâmica de referência q_b (associada à velocidade básica v_b) pelo chamado coeficiente de exposição $c_e(z)$, traduzido pela Equação 2.13:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (2.13)$$

sendo q_b a pressão dinâmica de referência definida como $q_b = \frac{1}{2}\rho \cdot v_b^2$, onde v_b é a velocidade básica do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Em terreno plano horizontal sem obstáculos ($c_0 = 1$), $c_e(z)$ depende apenas da rugosidade e da altura, podendo ser obtido graficamente (Figura 4.2 do EC1-1-4) para cada categoria de terreno.

Onde: $c_e(z)$ é o coeficiente de exposição ao vento a uma altura z (adimensional), $q_p(z)$ é a pressão dinâmica de pico à altura z (Pa), e q_b é a pressão dinâmica de referência (Pa).

Por exemplo, na Figura 2.10, demonstra-se a obtenção do coeficiente de exposição para uma dada estrutura a 12 metros do solo, tendo por base o tipo de terreno associado, no caso II [50].

Estas informações relativamente à velocidade e à pressão dinâmica encontram-se para consulta no Capítulo 4 do Eurocódigo 1991-1-4 2010, presente no Anexo A [3].

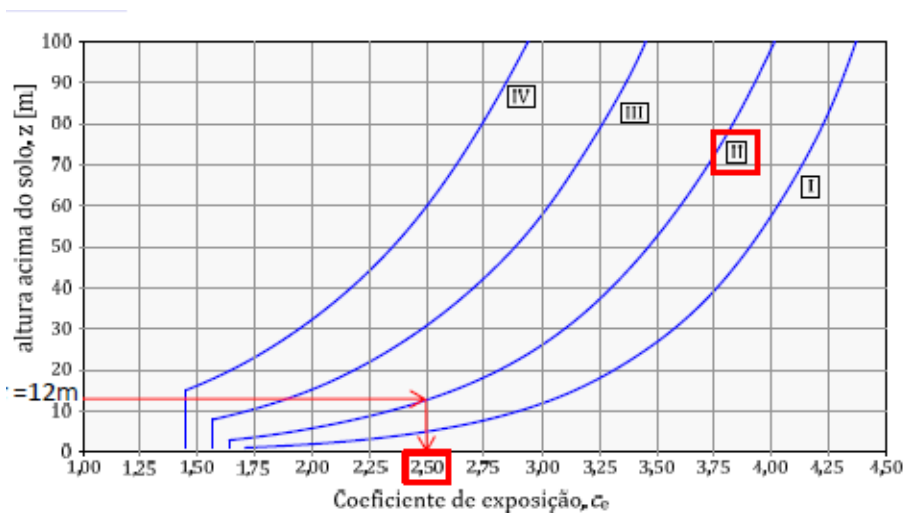


Figura 2.10: Gráfico do Coeficiente de Exposição relativamente à altura e ao tipo de terreno

4. Força do vento na estrutura

O Eurocódigo distingue entre pressões localizadas em elementos estruturais, como painéis, chapas de revestimento ou ligações, e forças globais aplicadas à estrutura no seu todo, utilizadas para verificar a estabilidade global, os sistemas de contraventamento e as fundações. Para o cálculo das forças globais de projeto, são indicadas duas abordagens principais:

- **Método das pressões superficiais:** consiste em aplicar as pressões externas w_e e internas w_i nas diferentes superfícies da estrutura (paredes, coberturas, etc.), integrando essas pressões (Pa) sobre as respetivas áreas (m^2) para obter forças resultantes (N) e momentos globais ($\text{N}\cdot\text{m}$). Este método considera explicitamente a distribuição espacial das pressões.
- **Método do coeficiente de forma global:** aplica-se a geometrias simples e permite calcular diretamente a força total exercida pelo vento sobre a estrutura. A força global do vento F_w é obtida pela expressão recomendada pelo Eurocódigo (Eq. 5.3 da EN 1991-1-4) na Equação 2.14:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (2.14)$$

onde: c_f é o coeficiente de forma associado à geometria da estrutura (adimensional), $q_p(z_e)$ é a pressão dinâmica de pico a uma altura representativa z_e (Pa), A_{ref} corresponde à área projetada perpendicular à direção do vento (m^2), e o produto $c_s c_d$ agrega os efeitos da não simultaneidade de pressões e da resposta dinâmica da estrutura (adimensional).

Embora o Eurocódigo preveja também a utilização de coeficientes de pressão externa e interna (C_{pe} , C_{pi}) para o dimensionamento localizado de elementos, estes não foram aplicados na presente dissertação, dado que a abordagem adotada baseia-se na estimativa da força global do vento sobre a estrutura, tendo por base a Equação [2.14](#).

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ (adimensional) resulta do produto de dois fatores: - c_s considera que as pressões de pico não ocorrem de forma simultânea em toda a superfície (adimensional), ou seja, uma rajada não atinge toda a fachada ao mesmo tempo; - c_d representa o efeito da excitação dinâmica causada pela turbulência do vento (adimensional).

Outro parâmetro fundamental na avaliação da força global do vento é o coeficiente de forma global c_f , o qual depende da geometria da estrutura e da sua orientação face à direção do vento. Este coeficiente traduz a relação entre a força aerodinâmica total exercida pelo vento e a pressão dinâmica de referência (adimensional). Os seus valores são fornecidos no Eurocódigo 1-1-4 sob a forma de tabelas específicas para diferentes tipologias estruturais (por exemplo, edifícios retangulares, chaminés, silos, tanques, coberturas inclinadas, entre outros). A correta seleção de c_f deve considerar fatores como a forma, a esbelteza, a orientação e a exposição da estrutura ao vento incidente.

Para estruturas rígidas ou de pequenas dimensões, onde os efeitos dinâmicos são pouco relevantes, o Eurocódigo permite adotar $c_s c_d = 1,0$, assumindo uma resposta essencialmente estática e pressões totalmente correlacionadas. No entanto, em edifícios esbeltos, torres altas ou estruturas muito flexíveis, a avaliação de $c_s c_d$ deve ser feita com base nas diretrizes da Secção 6.3 ou do Anexo D do Eurocódigo 1-1-4, podendo mesmo exigir análise dinâmica detalhada ou ensaios em túnel de vento.

No contexto desta dissertação, centrada na análise do comportamento estrutural de painéis fotovoltaicos fixos sujeitos à ação do vento, é pertinente referir que tais estruturas, devido à sua geometria plana e inclinada, podem ser assimiladas, para efeitos normativos, a superfícies equivalentes a paredes ou coberturas inclinadas.

Embora existam especificidades aerodinâmicas associadas, tal como a existência de espaçamentos entre painéis ou variações de inclinação conforme o tipo de instalação, o método normativo permite uma análise preliminar adequada. A aplicação dos coeficientes de pressão definidos no Eurocódigo para superfícies planas assegura uma avaliação coerente das forças atuantes, e podem ser consultados no Anexo A [.4](#).

Nos capítulos seguintes, estas diretrizes são adaptadas ao caso das estruturas de suporte de painéis solares, permitindo o dimensionamento e a verificação das ações do vento com base em critérios de segurança e estabilidade estrutural.

2.4 Aplicação de CFD na Engenharia

2.4.1 O que é CFD

A dinâmica de fluidos computacional é um ramo da mecânica dos fluidos que emprega métodos numéricos para resolver e analisar problemas relacionados com escoamentos. Trata-se essencialmente de usar a capacidade computacional para prever o comportamento de fluidos (líquidos e gases) com base nas leis de conservação de massa, do momento e da energia. Em vez de depender apenas de soluções analíticas ou de ensaios físicos, o CFD traduz as equações diferenciais dos fluidos em formatos numéricos que o computador pode manipular, permitindo obter distribuições detalhadas de grandezas físicas no domínio de estudo (como velocidade, pressão ou temperatura).

O objetivo principal do CFD é reproduzir numericamente o escoamento real de fluidos em domínios definidos, de forma a antecipar fenômenos dinâmicos complexos e apoiar decisões de projeto [51]. Nesse processo, são utilizados algoritmos avançados de discretização (como o método dos volumes finitos) e de solução iterativa das equações de Navier-Stokes, que regem o movimento dos fluidos, em cada célula de malha de cálculo. Assim, torna-se possível simular virtualmente regimes de fluxo que seriam muito difíceis de estudar apenas por ensaio empírico [52].

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem as suas raízes nas formulações teóricas do século XIX, com destaque para as equações de Navier–Stokes, fundamentais para descrever o escoamento de fluidos. No entanto, apenas com o surgimento dos computadores digitais no século XX se tornou viável resolver numericamente estas equações para problemas reais. Nos anos 1950 e 1960, instituições como o Los Alamos National Laboratory deram os primeiros passos na aplicação computacional de métodos numéricos em escoamentos compressíveis.

Durante as décadas seguintes, desenvolveram-se algoritmos robustos como o método *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE), que permitiram resolver escoamentos incompressíveis de forma eficiente. Em 1981, foi lançado o primeiro software comercial de CFD, o PHOENICS, marcando o início da popularização da tecnologia. Desde então, a evolução do poder computacional e dos métodos numéricos tornou a CFD numa ferramenta essencial em engenharia e investigação científica [53].

Em termos gerais, o CFD opera em três etapas principais:

- **Pré-processamento:** Etapa inicial onde se define a geometria do sistema a simular (geralmente importada de software CAD ou desenhada diretamente na plataforma CFD), cria-se a malha computacional (discretização do domínio em células ou elementos) e aplicam-se as condições de contorno e propriedades físicas do fluido (como viscosidade, densidade, temperatura, etc.). A qualidade da malha tem impacto direto na precisão e estabilidade da solução, sendo comum o uso de malhas refinadas em regiões de gradientes elevados (junto a paredes ou obstáculos) [54].
- **Resolução numérica (*Solve*):** Nesta fase, as equações determinantes do escoamento (como as equações de Navier–Stokes, conservação de massa e energia) são resolvidas em cada célula da malha, utilizando métodos numé-

ricos apropriados. Os métodos mais comuns incluem o *Finite Volume Method* (FVM), amplamente usado em CFD comercial, e o *Finite Element Method* (FEM), frequente em problemas de acoplamento multifísico. O processo envolve iterações sucessivas até à convergência dos resultados, garantindo que os resíduos (erros numéricos) se mantêm abaixo de um valor predefinido [54].

- Pós-processamento:** Após a resolução, os resultados são tratados graficamente para permitir a sua interpretação. As ferramentas de pós-processamento geram representações como campos vetoriais de velocidade, linhas de corrente, iso-superfícies de pressão ou temperatura, perfis de velocidade, entre outros. Esta etapa é fundamental para identificar fenómenos relevantes do escoamento, como a formação de vórtices, zonas de recirculação, camadas-limite, separação do fluxo ou regiões de alta perda de carga. A Figura 2.11 representa uma organização esquemática para abordagem de problemas com a utilização de CFD. Já a Figura 2.12 ilustra um exemplo de grafismo, obtido com simulação CFD, do efeito do vento sobre um painel solar [54, 55].

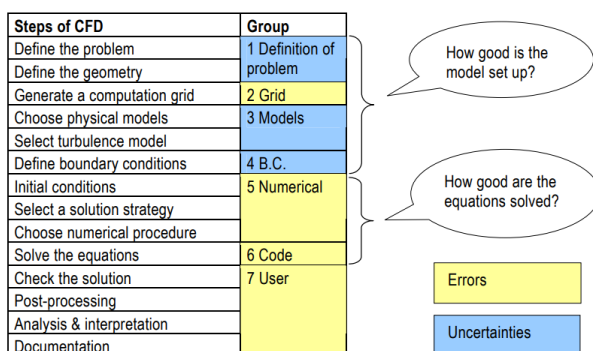


Figura 2.11: Quadro-tipo com os passos para abordagem CFD

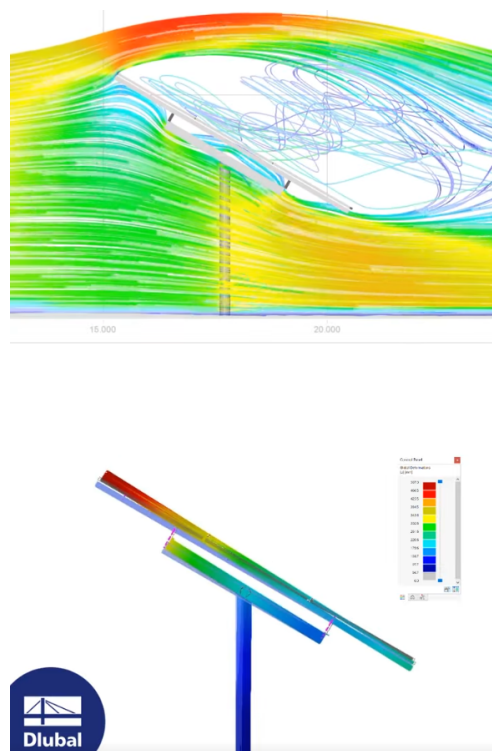


Figura 2.12: Exemplo de análise CFD aplicado a painel solar

A importância da simulação numérica por CFD na engenharia decorre da presença generalizada de fenómenos fluidodinâmicos em sistemas reais. Em praticamente todas as áreas onde intervêm escoamentos de fluidos, esta abordagem tornou-se indispensável, permitindo aos engenheiros conceber e otimizar soluções desde as fases iniciais do projeto. Ao possibilitar a análise de fluxos complexos sem recorrer exclusivamente a ensaios experimentais, a CFD consolidou-se como uma ferramenta fundamental, transformando profundamente a forma como a mecânica dos fluidos é estudada e aplicada na engenharia contemporânea.

2.4.2 Equações Fundamentais

O movimento dos fluidos apresenta-se frequentemente como contraintuitivo, uma vez que estes não se comportam como corpos rígidos. Por exemplo, ao lançar uma bola, esta mantém a sua forma e massa ao longo da trajetória. Já os fluidos, como o ar, não podem ser "lançados" da mesma forma, pois deformam-se, escoam e interagem com obstáculos de maneira complexa.

Esta natureza distinta dos fluidos torna indispensável a utilização de modelos matemáticos e ferramentas numéricas, para descrever e prever com rigor o seu comportamento em diferentes contextos de engenharia.

Acresce ainda que o estudo dos fluidos não se limita à sua movimentação isolada, mas envolve também fenómenos como turbulência, difusão de calor e transporte de massa, que surgem de forma interdependente. A compreensão destes aspetos é essencial para o dimensionamento de sistemas eficientes e seguros, desde aplicações aeronáuticas até ao aproveitamento de recursos energéticos renováveis.

As Equações 2.15, 2.16 e 2.17 [56] que regem CFD, permitem modelar este comportamento, mesmo em geometrias complexas.

As equações fundamentais que descrevem o escoamento dos fluidos são conhecidas como equações de Navier–Stokes, formuladas no século XIX por Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes. Estas equações derivam dos princípios da conservação da massa, do momento linear e da energia, sendo utilizadas em múltiplos domínios, desde a aerodinâmica até ao escoamento interno em turbomáquinas [56].

1. Conservação da Massa (Equação da Continuidade)

Garante que a massa de um fluido num volume de controlo permanece constante ao longo do tempo, exceto em caso de entrada ou saída de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.15)$$

Onde ρ é a densidade do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), \vec{u} é o vetor velocidade do fluido ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), t é o tempo (s), e ∇ é o operador diferencial vetorial (adimensional).

2. Conservação do Momento Linear (Segunda Lei de Newton)

Estabelece que a variação do momento linear de um fluido é igual à soma das forças que atuam sobre ele, como a pressão ou a gravidade. Para um fluido incompressível com viscosidade dinâmica constante:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_b \quad (2.16)$$

Aqui, p representa a pressão estática (Pa), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), \vec{f}_b designa o vetor de forças por unidade de volume ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$), ∇^2 é o operador laplaciano (adimensional), e ∇ é o operador diferencial vetorial (adimensional) já definido acima.

3. Conservação da Energia (Primeira Lei da Termodinâmica)

A variação da energia total do fluido resulta do balanço entre o calor que atravessa as suas fronteiras e o trabalho efetuado pelas forças viscosas internas, refletindo simultaneamente a contribuição dos mecanismos de transferência de calor e da dissipação por viscosidade.

Em termos da 1.^a lei da Termodinâmica aplicada a um volume de controlo em escoamento, tal variação incorpora as componentes interna, cinética e potencial da energia, e é governada pela competição entre convecção (transporte pela velocidade do fluido), difusão térmica (condução) e efeitos dissipativos associados às tensões de cisalhamento.

Esta formulação permite descrever de forma unificada os mecanismos de transporte de energia no fluido, conciliando os efeitos convectivos, difusivos e dissipativos que ocorrem de forma simultânea e acoplada durante o escoamento.

$$\rho \left(\frac{\partial h_{\text{tot}}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla h_{\text{tot}} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E + \Phi \quad (2.17)$$

Onde h_{tot} representa a entalpia total por unidade de massa ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), λ é a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K), S_E representa fontes externas de energia por unidade de volume ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), Φ corresponde ao trabalho dissipado por efeitos viscosos ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), e ∇ é o operador diferencial vetorial (adimensional) já definido acima.

2.4.3 Discretização e Métodos Numéricos na Resolução de Equações

A resolução numérica dos escoamentos fluidos em CFD assenta no princípio da discretização, ou seja, na transformação de um problema contínuo, descrito por equações diferenciais parciais, num sistema de equações algébricas que possa ser resolvido numericamente por um computador. Este processo é indispensável para resolver problemas de engenharia complexos, nos quais não é viável obter soluções analíticas exatas, especialmente em geometrias arbitrárias e condições de fronteira reais.

A discretização divide o domínio físico de simulação em pequenas células ou elementos, constituindo a malha computacional sobre a qual se aplicam métodos numéricos que, de forma controlada, aproximam as derivadas espaciais e temporais das equações de conservação (massa, quantidade de movimento e energia), garantindo uma representação discreta no espaço e no tempo. A precisão da solução depende fortemente da qualidade dessa malha, da resolução numérica adotada e da consistência do modelo físico considerado; em termos práticos, quanto mais adequada for a repartição do domínio e mais coerente a formulação, mais fiel será a aproximação das grandezas conservadas e mais robusta a convergência dos resultados.

A Figura 2.13 evidencia como a qualidade da discretização influencia diretamente a linearização das equações e a capacidade de representar com fidelidade os gradientes das variáveis. 57.

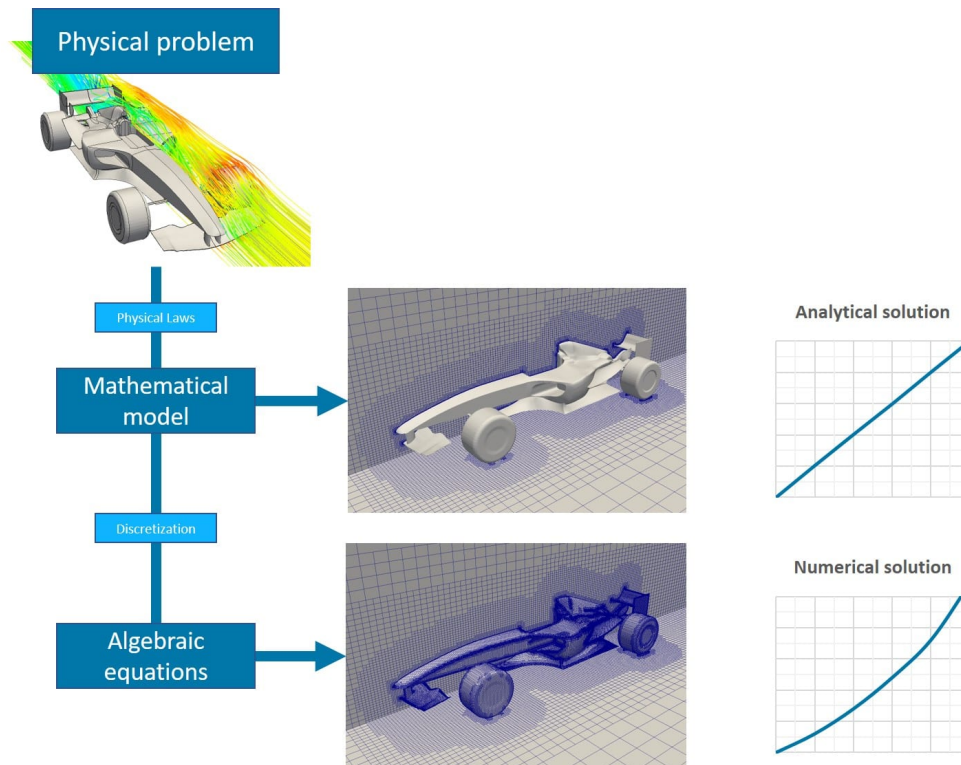


Figura 2.13: Cadeia de desenvolvimento: da formulação física à solução algébrica

Diversos métodos de discretização têm vindo a ser desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Os mais comuns incluem:

- *Finite Difference Method* (FDM): baseia-se na substituição das derivadas por aproximações diferenciais, sendo mais utilizado em domínios com malhas regulares. É simples, mas limitado na aplicação a geometrias complexas [57];
- *Finite Volume Method* (FVM): um dos mais utilizados na engenharia, especialmente em CFD comercial. Neste método, as equações de conservação são integradas em volumes de controlo, garantindo a conservação local das grandezas físicas. É robusto, versátil e compatível com geometrias complexas [57];
- *Finite Element Method* (FEM): muito utilizado na engenharia estrutural, é também aplicável a CFD, sobretudo em simulações multifísicas. Baseia-se na minimização de funcionais e é eficaz para domínios deformáveis [57];
- Métodos Espectrais ou de Elementos Espectrais: utilizam funções de base de ordem elevada, oferecendo grande precisão em malhas regulares, mas são menos eficientes para problemas com descontinuidades ou geometrias irregulares [57];
- *Boundary Element Method* (BEM): reduz o problema a uma discretização apenas das fronteiras, sendo vantajoso para problemas de domínio exterior, embora menos comum em CFD geral [57].

No contexto deste trabalho, será utilizado o software ANSYS Fluent, um dos programas de CFD mais reconhecidos internacionalmente. O Fluent suporta vários métodos numéricos, incluindo FVM, que é o método base em todas as suas simulações.

Esta abordagem garante conservação local, é adequada para malhas não estruturadas e permite simular eficazmente escoamentos externos em torno de geometrias como painéis solares fixos e respectivas estruturas de suporte. Dada a robustez, a fiabilidade e a integração direta com ferramentas de pré e pós-processamento, o método dos volumes finitos será, portanto, o método adotado para este estudo.

2.4.4 Definição e Convergência de Malha

No contexto da simulação numérica de escoamentos, a malha é a base sobre a qual se resolvem as equações governantes da dinâmica dos fluidos.

Esta malha resulta da divisão do domínio em pequenas células, onde se assume que as propriedades do fluido variam de forma linear. Por isso, zonas onde se preveem variações intensas requerem malhas mais finas para capturar com precisão os fenómenos físicos [57].

Este processo de discretização é fundamental para garantir a fiabilidade dos resultados.

A Figura 2.14 ilustra um refinamento variável na malha de um modelo de F1 com o objetivo de detalhar as diferenças do escoamento em zonas críticas.

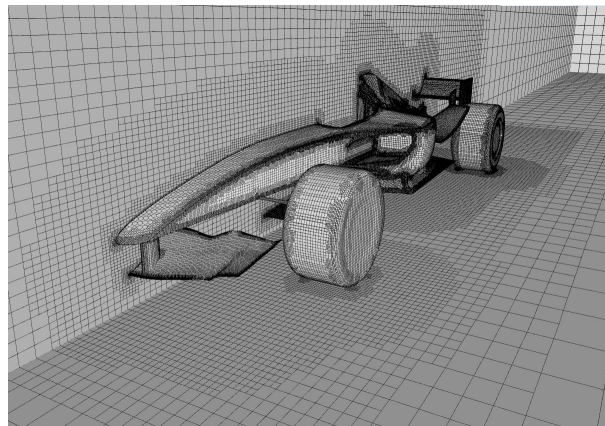


Figura 2.14: Malha de modelo de Fórmula 1

No entanto, uma malha mal dimensionada pode introduzir erros significativos ou mesmo inviabilizar a simulação. Para evitar este problema, realizam-se estudos de independência da malha. Nestes estudos, gera-se uma malha inicial, executa-se a simulação e depois refinam-se progressivamente as zonas críticas do modelo, analisando-se os resultados obtidos (por exemplo, quedas de pressão ou velocidades máximas). A malha é considerada “convergida” quando os resultados estabilizam, ou seja, quando a diferença entre simulações sucessivas se torna irrelevante.

A convergência é também um conceito fundamental nas iterações do próprio processo de cálculo. À semelhança de um escultor que trabalha o seu material até atingir a forma final, o campo de escoamento evolui a partir de uma estimativa inicial até se aproximar de uma solução estável. Esta evolução é medida pelos resíduos (*residuals*), indicadores da diferença entre iterações consecutivas, que devem diminuir até abaixo de um determinado limite.

Tal como se evidencia na Figura 2.15, cerca de 100000 elementos teriam sido suficientes para obter uma solução aproximada e fiável, sendo a partir daí que a mesma estabiliza [57].

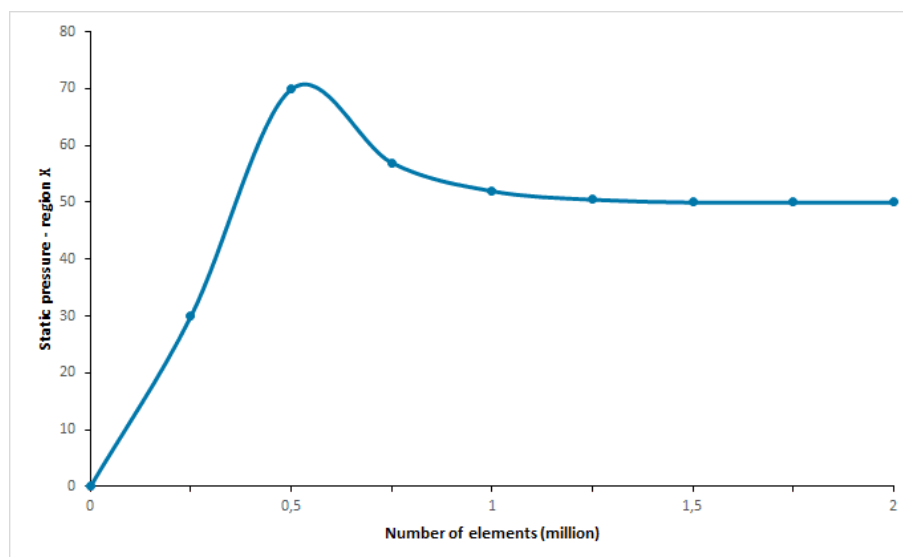


Figura 2.15: Exemplo analítico da convergência de resultados numa malha

É importante referir que, apesar de uma solução poder convergir matematicamente, isso não garante que seja fisicamente correta. Um modelo mal construído ou uma malha de fraca qualidade pode produzir resultados incorretos mas numericamente estáveis. Por isso, é essencial adotar boas práticas como: usar malhas adequadas, ajustar os parâmetros de discretização (ex.: ordem de esquemas) e definir corretamente as condições iniciais e de fronteira. Para simulações transientes, a convergência deve ser garantida a cada passo temporal. Além disso, a análise crítica dos resultados, por comparação com valores de referência, dados experimentais ou correlações empíricas, constitui um passo indispensável para assegurar a credibilidade do estudo. A validação cruzada entre diferentes configurações de malha e a realização de estudos de independência da discretização são igualmente recomendadas, reforçando a confiança na robustez das soluções obtidas.

2.4.5 Modelação de Fenómenos de Turbulência

A turbulência é um fenómeno caracterizado por movimentos caóticos, tridimensionais e altamente instáveis do fluido, frequentemente presente em escoamentos de engenharia. Embora as equações de Navier–Stokes descrevam teoricamente qualquer tipo de escoamento, a sua resolução direta em regimes turbulentos torna-se computacionalmente proibitiva para a maioria das aplicações práticas. Por essa razão, recorre-se à modelação da turbulência, que visa representar os efeitos médios da instabilidade turbulenta sobre o escoamento sem resolver todas as escalas temporais e espaciais [58].

A Figura 2.16(a) demonstra os vários modelos de turbulência e o respetivo custo computacional [59] e, a Figura 2.16(b), compara graficamente o escoamento em 3 modelos diferentes [60].

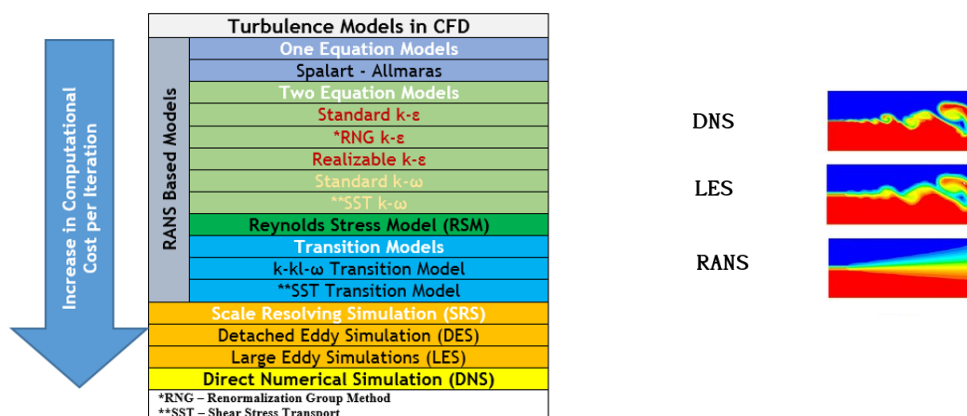


Figura 2.16: (a) modelos de turbulência em CFD e o seu custo computacional; (b) comparação gráfica dos três métodos de modelação.

Existem três grandes abordagens utilizadas em CFD para modelar escoamentos turbulentos:

- **Direct Numerical Simulation (DNS)**: Resolve diretamente todas as escalas da turbulência sem qualquer modelo adicional. Embora forneça resultados extremamente precisos, o custo computacional é elevadíssimo, o que torna esta abordagem impraticável para geometrias reais e domínios extensos. DNS é usado essencialmente para investigação académica ou validação de modelos [58].
- **Large Eddy Simulation (LES)**: Resolve explicitamente os grandes vórtices (*eddies*) do escoamento e modela apenas as estruturas de pequena escala. Oferece um bom compromisso entre fidelidade e realismo, sendo usada em estudos de engenharia avançados (como combustão, aeroacústica ou jatos). Contudo, continua a requerer malhas refinadas e elevada capacidade computacional, sobretudo junto a paredes (*wall-resolved LES*) [58].
- **Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS)**: É o método mais amplamente utilizado na prática industrial. Baseia-se na decomposição estatística das variáveis do escoamento, resolvendo as equações para os valores médios no tempo, enquanto modela os efeitos turbulentos através de termos adicionais. Os modelos RANS são estáveis, eficientes e requerem menos recursos computacionais, sendo particularmente indicados para simular escoamentos externos em torno de objetos como edifícios, veículos ou, no caso desta dissertação, estruturas de painéis solares expostos ao vento [58].

Dentro da família RANS, destacam-se vários modelos, entre os quais:

- **Modelo $k-\epsilon$** : Um dos mais utilizados, é robusto e eficaz em escoamentos completamente desenvolvidos, mas apresenta limitações na vizinhança de superfícies com separação ou gradientes de pressão acentuados [58].
- **Modelo $k-\omega$** : Mais adequado para escoamentos junto a superfícies sólidas, sensível às condições de fronteira [58].
- **Modelo $k-\omega$ com Shear Stress Transport (SST)**: Combina o melhor dos

dois anteriores, sendo eficaz em simulações com separação de escoamento, gradientes elevados e efeitos de parede, características frequentes em estudos de impacto do vento sobre superfícies inclinadas [58].

A seleção do modelo de turbulência constitui uma decisão fundamental em simulações CFD, influenciando significativamente a precisão e a robustez dos resultados. Dada a natureza do escoamento ao redor de superfícies planas (painéis solares) e a necessidade de representar adequadamente os fenômenos de separação e recirculação, foram adotados diferentes modelos consoante a complexidade do domínio (2D ou 3D).

Simulações 2D – Modelo *k-epsilon*

Nas simulações bidimensionais, foi selecionado o modelo *k-epsilon* com duas equações de transporte na sua versão *Standard* [61].

Neste, as equações diferenciais parciais que descrevem a evolução encontram-se definidas através das Equações 2.18 e 2.19:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.19)$$

Onde k representa a energia cinética turbulenta (m^2/s^2), ε é a taxa de dissipação da energia turbulenta (m^2/s^3), u_j corresponde à componente da velocidade na direção j (m/s), x_j é a coordenada espacial nessa direção (m), P_k representa a geração de energia cinética turbulenta (m^2/s^3), μ_t é a viscosidade turbulenta (Pa·s), e os coeficientes empíricos $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k e σ_ε são parâmetros empíricos do modelo *k-ε*.

Este modelo é largamente utilizado devido à sua simplicidade, baixo custo computacional e fiabilidade em escoamentos externos completamente desenvolvidos. Para o tratamento próximo às paredes, foi ativada a opção *Scalable Wall Functions*, garantindo a estabilidade da simulação mesmo em regiões onde o parâmetro adimensional y^+ se afasta do intervalo ideal. O parâmetro y^+ representa a distância adimensional entre o centro do primeiro elemento da malha junto à parede e a própria superfície, sendo definido como:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (2.20)$$

Onde u_τ é a velocidade de fricção ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e y é a distância normal à parede (m). Este número adimensional é fundamental na modelação de escoamentos turbulentos, pois determina a correta resolução da camada limite junto às paredes. Valores baixos de y^+ indicam que a malha resolve diretamente a subcamada laminar viscosa, enquanto valores elevados implicam o uso de funções de parede para modelar esta região. No contexto das simulações com funções de parede escaláveis, é possível manter resultados consistentes mesmo que y^+ não esteja rigorosamente dentro do

intervalo ideal, evitando instabilidades numéricas e garantindo a coerência física do modelo [54].

Simulações 3D – Modelo SST (*Shear Stress Transport*)

Nas simulações tridimensionais, devido à maior complexidade geométrica e à existência previsível de zonas de separação do escoamento, optou-se pela ativação do modelo SST da família *k-omega* [62].

Este modelo combina as vantagens do modelo *k-omega* na proximidade das paredes com a estabilidade do *k-epsilon* nas regiões longe da parede, através de uma função de *blending* dada pela Equação 2.21:

$$\phi = F_1 \cdot \phi_{k-\omega} + (1 - F_1) \cdot \phi_{k-\epsilon} \quad (2.21)$$

Onde F_1 é uma função de ponderação adimensional que assegura a transição suave entre os dois modelos.

Este *blending* assegura uma transição suave entre os dois modelos, garantindo maior robustez em escoamentos com recirculações, separações e elevada anisotropia. A formulação completa do modelo SST é apresentada nas Equações 2.22 e 2.23, que resolvem, respetivamente, o transporte de k (energia cinética turbulenta) e ω (frequência específica de dissipação da energia turbulenta):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.23)$$

Onde:

- β^* é um coeficiente de dissipação específico do modelo SST (adimensional).
- ω representa a taxa à qual a energia cinética turbulenta é dissipada (s^{-1}).
- σ_k é o inverso da razão entre difusão turbulenta e molecular para k (adimensional).
- α controla a influência da produção de turbulência na equação de ω (adimensional).
- β ajusta a taxa de dissipação prevista para ω (adimensional).
- σ_ω é equivalente a σ_k , mas aplicado ao transporte de ω (adimensional).
- $\sigma_{\omega 2}$ é usado no termo de correção cruzada do modelo (adimensional).
- μ_t representa a contribuição turbulenta adicional para a viscosidade efetiva do fluido (Pa·s).

Todos estes coeficientes e parâmetros têm valores recomendados na formulação original do modelo SST proposta por Menter [62], sendo obtidos a partir de calibrações experimentais e validações numéricas para um vasto conjunto de casos de referência. A correta definição destes valores é essencial para assegurar a reprodutibilidade dos resultados e a fiabilidade das previsões do modelo.

Este modelo apresenta um melhor desempenho em situações com separação do escoamento, sendo por isso amplamente recomendado para geometrias com forte interação fluido-superfície, como é o caso dos painéis montados sobre estrutura elevada.

Papel físico dos termos e mapeamento para o ANSYS Fluent

Embora essas equações não tenham sido manipuladas ou re-calibradas manualmente durante as simulações (os parâmetros foram mantidos com as configurações padrão do ANSYS Fluent), a sua presença é relevante porque esclarece o papel físico dos termos e dos coeficientes que o utilizador pode encontrar na interface do software.

Abaixo explicita-se a correspondência útil entre os termos das equações e as opções/controles do Fluent, para que leitores que desejem alterar o modelo percebam exactamente o que estão a modificar e porquê.

- **Termos de produção e dissipação** (ex.: P_k , ε , $\beta^*k\omega$): representam a geração de energia turbulenta pelas tensões de Reynolds e a sua dissipação nas pequenas escalas. No Fluent estes mecanismos surgem como *model constants* nos diálogos de configuração. Alterá-los afecta directamente a viscosidade turbulenta prevista.
Menu: Define → Models → Viscous → [k-epsilon / k-omega SST] → Edit.
- **Termos de difusividade** (ex.: σ_k , σ_ε , σ_ω): controlam a difusão turbulenta das variáveis escalares. No Fluent correspondem aos *turbulent Prandtl numbers*.
- **Funções de transição / blending** (ex.: F_1 no SST): asseguram a passagem entre $k-\omega$ (junto à parede) e $k-\varepsilon$ (regiões externas). No Fluent, aparecem em opções avançadas do modelo SST.
- **Termos de correção cruzada**: usados para melhorar a resposta em regimes com gradientes fortes ou separação. No Fluent surgem como parâmetros adicionais no modelo SST.
- **Tratamento da parede e y^+** : o papel das *wall functions* é explícito nas equações, determinando se a subcamada laminar é resolvida ou modelada. No Fluent definem-se opções como *Scalable Wall Functions* ou *Enhanced Wall Treatment*. O valor concreto de y^+ depende da malha (*inflation layers*) e da escolha do tratamento de parede.

A apresentação destes modelos de turbulência tem aqui um enquadramento essencialmente teórico, permitindo compreender os pressupostos e parâmetros que os regem.

As escolhas específicas de parametrização e a forma como foram implementadas nas simulações encontram-se descritas no Capítulo 3.3.2, dedicado à parte prática do trabalho.

Energia e Outras Propriedades

Tendo em conta que o objetivo do estudo se foca na análise aerodinâmica dos painéis e não em efeitos térmicos, o modelo de energia não foi ativado. O escoamento foi considerado isotérmico e incompressível, o que é válido para velocidades abaixo de Mach 0,3, como é o caso presente.

A seleção diferenciada dos modelos de turbulência para as simulações 2D e 3D permitiu um compromisso entre robustez, precisão e viabilidade computacional, assegurando a obtenção de resultados fiáveis para posterior análise.

2.4.6 Aplicações Típicas de CFD em Engenharia

A aplicação de CFD é importante sempre que exista a necessidade de prever e estudar o comportamento de um fluido e a sua transferência de calor, ou para saber a sua influência em dado produto ou sistema. Permite analisar diferentes tipos de propriedades como a temperatura, pressão, velocidade e densidade, e pode ser aplicada a uma grande variedade de áreas em engenharia.

Para além das áreas específicas de engenharia, as aplicações da CFD podem também ser classificadas de acordo com o tipo de escoamento e fenómeno físico envolvido:

- Escoamentos compressíveis e incompressíveis: Em escoamentos de baixa velocidade, o fluido pode ser considerado incompressível (geralmente em Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) ou hidráulica). No entanto, em regimes de alta velocidade, como na aerodinâmica supersónica, a compressibilidade torna-se significativa, exigindo modelações específicas. A CFD permite tratar ambos os regimes com elevada robustez, mediante modelos e malhas adaptadas [57];
- Escoamentos laminares e turbulentos: A maioria das aplicações industriais envolve escoamentos turbulentos, que são mais caóticos e exigem modelos mais complexos (como os modelos RANS ou LES). Contudo, existem situações, como a convecção natural em torno de fontes de calor fracas, em que o escoamento se mantém laminar. A CFD permite distinguir e tratar cada tipo de regime adequadamente [57];
- Transporte de massa e calor: É amplamente utilizada para estudar processos de convecção e difusão, como o transporte de fumo, gases ou substâncias químicas (ex.: propagação de contaminantes num espaço ventilado), bem como fenómenos de transferência térmica por condução ou convecção. Um exemplo clássico é a simulação de permutadores de calor, onde se estuda simultaneamente o escoamento do fluido e o perfil de temperatura ao longo do sistema [57].

Relativamente à engenharia e indústria, algumas aplicações contemplam:

- Meteorologia e previsão do tempo, através da simulação de escoamentos atmosféricos a larga escala, em diferentes horizontes temporais e espaciais, apoiando a antecipação de fenómenos intensos e a gestão do risco meteorológico [52];
- Energia eólica, nomeadamente no estudo da interação entre o vento e as turbinas, na otimização do *layout* de parques eólicos e na análise de perfis de vento

com base em topografia e rugosidade do solo, visando maximizar produção e reduzir cargas estruturais [52];

- Aerodinâmica e hidrodinâmica, incluindo a análise do escoamento de ar em torno de automóveis e aviões [57] (Figura 2.17), de comboios e mísseis, e o estudo do comportamento da água em torno de navios, submarinos ou torpedos, com enfoque na redução de arrasto, estabilidade e segurança operacional [52];

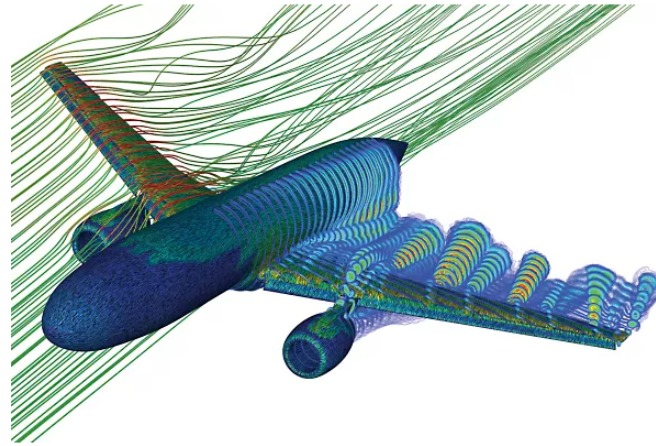


Figura 2.17: Simulação em Ansys Fluent da aerodinâmica exterior num avião comercial.

- Motores e combustão interna, onde a CFD permite modelar a injeção de combustível, a combustão, o arrefecimento e o *design* de escapes com elevada precisão, apoiando a otimização de mistura, desempenho e emissões [52];
- Transferência de calor em equipamentos industriais, tais como queimadores, permutadores de calor, tubagens, bombas, ventiladores e outros componentes críticos para a gestão térmica de sistemas complexos, melhorando a eficiência energética e a fiabilidade [52];
- Indústria de moldes e plásticos, permitindo simular a injeção de polímeros fundidos em moldes, prever a distribuição de temperatura e evitar falhas no enchimento, deformações e defeitos de qualidade, com impacto direto no tempo de ciclo [52];
- Sistemas de climatização (AVAC) e conforto térmico em edifícios, otimizando fluxos de ar, ventilação natural ou artificial e zonas de acumulação térmica, com reflexo na qualidade do ar interior e no consumo energético [52];
- Arrefecimento de dispositivos eletrónicos, como servidores, processadores ou equipamentos de potência, através da simulação do movimento do ar e da dissipação de calor, mitigando pontos quentes e aumentando a durabilidade dos componentes [52].

A título de exemplo, a Figura 2.18 [52] ilustra a modelação em Ansys Fluent do escoamento do ar em torno de aeronaves para prever fenómenos como sustentação e arrasto, simulação de sistemas internos, como a circulação de ar na cabine, ajudando a prever a qualidade do ar e o conforto térmico, arrefecimento de sistemas eletrónicos

(aviônicos), aero-ótica, aerodinâmica externa, climatização de cabines (AVAC) e análise de sistemas de propulsão, entre várias outras.

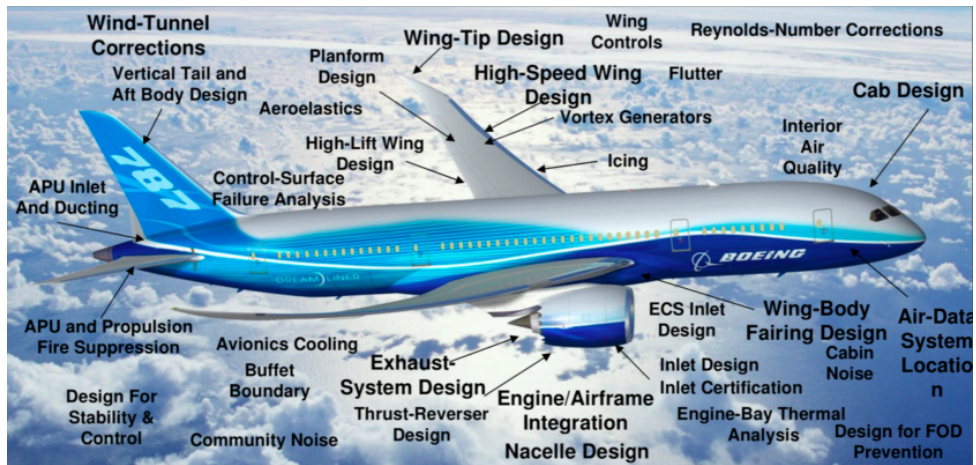


Figura 2.18: Parâmetros passíveis de estudo com CFD em avião Boeing 787

2.4.7 Vantagens e Limitações de CFD

A utilização de CFD tem vindo a ganhar destaque em múltiplas áreas da engenharia, oferecendo uma alternativa poderosa aos métodos experimentais tradicionais. No entanto, apesar das suas amplas aplicações, apresenta também algumas limitações. De seguida, apresentam-se as principais vantagens e desvantagens desta metodologia:

Vantagens

- Visualização detalhada: permite obter uma análise completa dos campos de pressão, velocidade e temperatura, fornecendo uma compreensão aprofundada do comportamento do escoamento.
- Redução de custos: diminui a necessidade de ensaios físicos e protótipos, reduzindo significativamente os custos de desenvolvimento.
- Flexibilidade: aplicável a geometrias complexas e a condições de contorno variadas, difíceis de reproduzir experimentalmente.
- Iteração rápida de projetos: facilita a comparação entre múltiplas configurações e estratégias de design.
- Acesso a regiões inacessíveis: permite a análise de zonas de difícil instrumentação, como áreas internas ou ambientes extremos.

Desvantagens

- Dependência da malha e dos modelos: a qualidade dos resultados depende fortemente da malha utilizada e dos modelos físicos implementados (por exemplo, modelos de turbulência).
- Custo computacional: simulações detalhadas podem requerer elevados recursos computacionais e longos tempos de processamento.

- Complexidade técnica: a interpretação dos resultados exige conhecimentos especializados em fluidodinâmica, modelação numérica e análise computacional.
- Risco de resultados erróneos: uma simulação pode convergir matematicamente para uma solução que não representa corretamente a realidade, se os parâmetros estiverem mal definidos.

2.5 Software e Ferramentas de Modelação e Simulação

Para a realização do presente trabalho recorreu-se a duas ferramentas de engenharia amplamente reconhecidas: o SolidWorks, utilizado para a modelação tridimensional da geometria, e o ANSYS Fluent, aplicado na simulação do escoamento do vento em torno da estrutura estudada.

Embora com finalidades distintas, ambos os softwares desempenham papéis complementares e cruciais no desenvolvimento do modelo e na análise dos fenómenos físicos associados.

2.5.1 SolidWorks e Ansys Fluent

O SolidWorks é um software de CAD paramétrico bastante difundido na indústria e no meio académico, permitindo a criação de modelos 3D detalhados, montagem de componentes e execução de análises mecânicas básicas.

A sua escolha neste projeto justifica-se pela familiaridade adquirida ao longo do curso de Engenharia Mecânica, onde é utilizado como ferramenta base nas disciplinas de desenho técnico e projeto mecânico. Adicionalmente, os estudantes do curso têm acesso gratuito à versão académica (*Student Version*), o que facilitou a sua utilização ao longo deste trabalho. Com o SolidWorks foi possível criar uma representação fiel do painel solar e respetiva estrutura de suporte, que mais tarde serviu de base para as simulações numéricas.

Já o ANSYS Fluent é uma ferramenta de simulação numérica especializada em Dinâmica dos Fluidos Computacional, amplamente reconhecida a nível internacional pela sua robustez e versatilidade. Embora não seja abordado formalmente no plano curricular do curso, o Fluent destaca-se pela vasta documentação técnica e apoio da comunidade científica, o que facilita o seu estudo autónomo. A possibilidade de acesso à *Student Version*, disponibilizada gratuitamente para fins académicos, foi igualmente determinante na sua seleção.

Este software permitiu a análise do escoamento do vento sobre o modelo construído no SolidWorks, possibilitando a obtenção de resultados quantitativos e qualitativos sobre a interação fluido-estrutura.

A utilização combinada destas duas ferramentas reflete uma abordagem integrada e coerente com os objetivos do projeto, tirando partido de softwares acessíveis, educacionais e amplamente utilizados no contexto académico e industrial.

3 Métodos e Aplicação

O presente capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo numérico do escoamento do vento sobre uma estrutura de painel solar fixo.

Inicia-se com a definição do caso de estudo, onde se caracteriza a geometria da estrutura, os materiais e os objetivos da simulação.

Seguidamente, detalha-se o planeamento do estudo CFD, nomeadamente a seleção das condições de vento, os parâmetros físicos envolvidos e o modelo de turbulência adotado. É também apresentada a fase de pré-processamento, que inclui a importação da geometria, a geração da malha e a definição das condições de contorno e propriedades do fluido.

Por fim, são justificadas as principais simplificações e suposições efetuadas, tendo em consideração as limitações computacionais e os objetivos do trabalho.

Este capítulo estabelece assim as bases necessárias para a realização das simulações numéricas e para a análise subsequente dos resultados.

3.1 Definição do Caso de Estudo

O presente estudo tem como objetivo analisar numericamente a ação do vento sobre uma estrutura de painéis solares pertencente a um sistema agrovoltaico, com vista à comparação dos resultados obtidos por simulação CFD com os valores calculados segundo o Eurocódigo.

A estrutura em análise foi originalmente concebida para instalação sobre terrenos agrícolas, elevando os painéis solares de forma a permitir simultaneamente a produção de energia elétrica e a atividade agrícola. No entanto, para efeitos deste estudo, e face às limitações computacionais, foi adotada uma abordagem simplificada que considera apenas os painéis e o volume de ar circundante, desconsiderando os elementos de apoio estrutural.

A definição do caso de estudo inclui a caracterização da geometria do painel, os materiais relevantes, os objetivos da simulação e o domínio computacional utilizado.

3.1.1 Descrição da Estrutura de Painel Solar

A estrutura analisada nesta dissertação corresponde à parte superior de um sistema agrovoltaico desenvolvido por Bruno Campos [63], cujo principal objetivo é permitir a coexistência entre a produção de energia fotovoltaica e a prática agrícola.

O sistema foi concebido com uma disposição modular, composta por três fileiras de painéis solares fotovoltaicos montados numa estrutura metálica elevada. Esta

elevação tem como finalidade garantir a passagem de maquinaria agrícola sob a instalação, bem como assegurar uma adequada incidência solar nos módulos e uma boa ventilação das culturas [63].

Cada fileira suporta quatro painéis solares dispostos dois a dois lado a lado e em sequência longitudinal, com orientação horizontal. Os painéis são montados sobre um eixo longitudinal rotativo, permitindo a alteração do ângulo de inclinação consoante as estações do ano ou os requisitos específicos de radiação solar no local.

A Figura 3.1 apresenta o modelo CAD da estrutura desenvolvida [63].

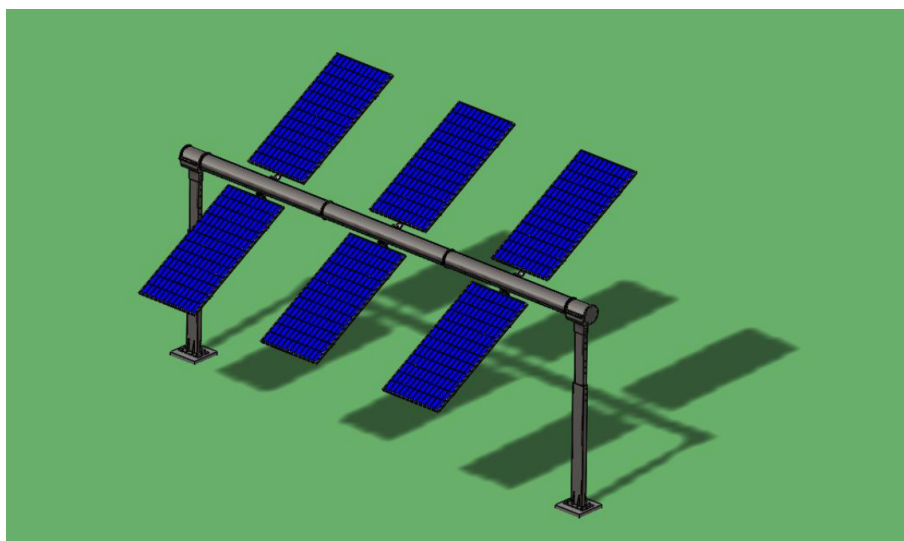


Figura 3.1: Estrutura de painéis solares agrovoltaica

A componente de suporte foi projetada com perfis tubulares de aço galvanizado, com resistência adequada às solicitações mecânicas e ambientais, e inclui vigas principais que sustentam os painéis através de apoios móveis. Os módulos fotovoltaicos utilizados são do modelo AE Solar AE400MD-108BD, com tecnologia monocristalina. Cada painel possui dimensões de 2,280 m de comprimento, 1,134 m de largura e cerca de 35 mm de espessura. São constituídos por vidro temperado na face frontal, células de silício monocristalino encapsuladas em EVA (acetato de etileno-vinilo), e uma moldura de alumínio anodizado, que lhes confere rigidez e durabilidade face à exposição exterior [63].

O modelo completo foi criado na íntegra na dissertação original para efeitos de dimensionamento estrutural com base nas ações de vento estimadas segundo o Eurocódigo 1 — Parte 1-4. No entanto, na presente análise CFD, e considerando as limitações de recursos computacionais, quer pelo poder computacional do computador utilizado, quer pela licença de estudante utilizada, optou-se por uma simplificação do modelo, incluindo apenas os painéis fotovoltaicos como superfícies planas expostas ao escoamento. Esta abordagem permite isolar e estudar o efeito direto do vento sobre os painéis, facilitando a comparação com os resultados obtidos por cálculo analítico.

3.1.2 Objetivos da Simulação CFD

O principal objetivo deste estudo foi analisar os efeitos da ação do vento sobre os painéis solares de uma estrutura agrovoltaica, através de simulações numéricas realizadas com recurso a CFD.

Pretendeu-se estudar o comportamento do escoamento do ar, determinar os campos de pressão e velocidade junto aos painéis e calcular as forças aerodinâmicas resultantes, com especial foco na componente perpendicular ao plano do painel. Esses resultados foram depois comparados com os valores obtidos por via analítica, com base no Eurocódigo, tal como desenvolvido na dissertação do colega Bruno Campos [63]. Devido a limitações computacionais e às restrições impostas pela licença académica do ANSYS, que condiciona o número máximo de elementos da malha, optou-se por simplificar o modelo.

Assim, foi considerado apenas o painel superior da estrutura, denominado P2 na Figura 3.2, desconsiderando suportes ou apoios estruturais complexos. O painel foi representado por uma placa retangular com as dimensões reais, posicionada a uma altura de aproximadamente 5,07 m do solo, conforme o modelo de referência utilizado na tese anteriormente mencionada.

As simulações incidiram sobre uma única configuração de inclinação dos painéis, fixada a 30 graus, valor que representa uma das posições mais críticas em termos de carregamento pelo vento.

Estudaram-se duas direções principais do vento: uma com o escoamento vindo da frente do painel (0 graus) e outra com o vento vindo da parte traseira (180 graus). Foi ainda realizada uma simulação complementar com vento a incidir no painel inclinado num ângulo de 90 graus, com o objetivo de validar o comportamento do escoamento numa configuração previsível e ajudar a confirmar os efeitos observados nos casos principais.

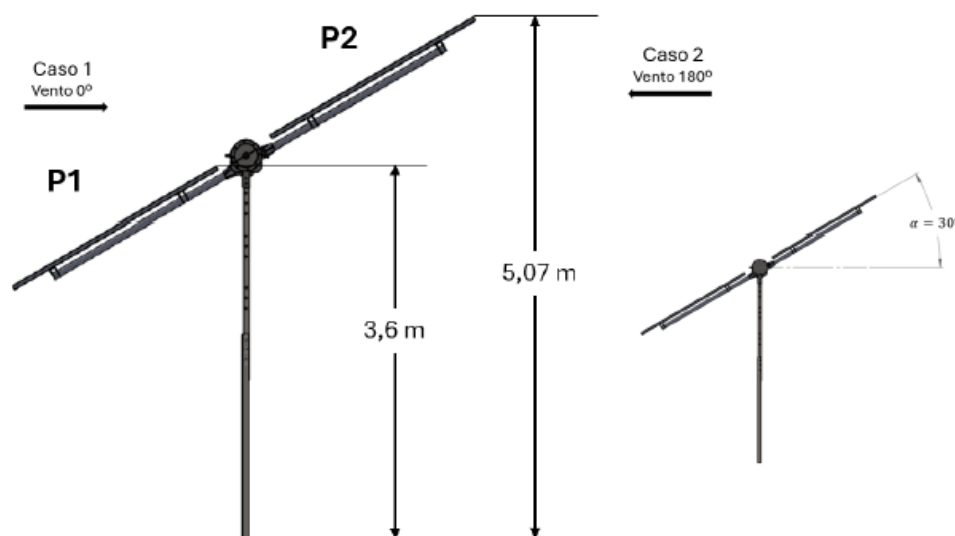


Figura 3.2: Casos de estudo e altura de referência considerada (P2)

Para cada uma destas configurações foram realizadas simulações tanto em 2D como em 3D, com o intuito de alargar o estudo e permitir uma análise mais completa dos fenómenos envolvidos. A comparação entre as simulações 2D e 3D permite observar de forma clara os efeitos adicionais introduzidos pela componente lateral do escoamento em três dimensões, nomeadamente em termos de turbulência, recirculações e distribuições de pressão mais realistas. Esta abordagem foi essencial para perceber as limitações dos modelos bidimensionais e reforçar a necessidade de considerar o comportamento espacial completo em contextos reais.

Além dos casos analisados com a placa retangular simplificada, foi também realizada uma simulação 3D de uma estrutura agrovoltaica mais completa, composta por um tubo horizontal (cilindro), dois painéis (superior e inferior) e um suporte simplificado. Este modelo foi concebido de forma a manter a representatividade física da instalação sem comprometer a viabilidade computacional. A inclusão deste caso tem particular importância, pois permite observar os efeitos do vento sobre uma configuração mais próxima da realidade, com interações entre elementos estruturais e efeitos aerodinâmicos complexos, como sombreamentos, zonas de recirculação entre painéis e influência da geometria do tubo de suporte. Esta simulação constitui, assim, uma etapa complementar essencial para compreender a influência da complexidade geométrica nos resultados da análise e para reforçar a validade das simplificações adotadas nos restantes modelos.

As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram a estrutura simplificada em Solidworks do modelo mencionado.

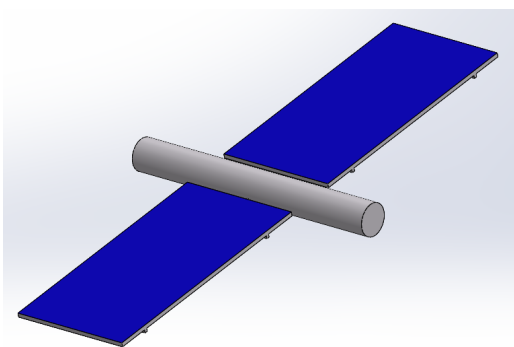


Figura 3.3: Parte frontal do modelo simplificado

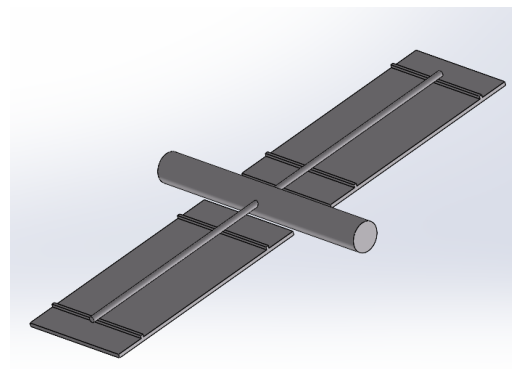


Figura 3.4: Parte traseira do modelo simplificado

Foram ainda analisados três valores de velocidade do vento: 10 m/s, 27 m/s e 40 m/s. A escolha baseou-se nos valores de referência indicados no Eurocódigo para o território nacional, onde a velocidade média de referência é de 27 m/s. Os valores adicionais serviram para explorar cenários menos exigentes (10 m/s) e mais severos (40 m/s), alargando o entendimento do comportamento do painel sob diferentes condições.

A Tabela 3.1 resume todas as simulações efetuadas e nota as principais características a ter em conta em cada uma.

Tabela 3.1: Resumo dos casos de simulação CFD.

Tipo	Modelo Utilizado	Velocidade (m/s)	Direção (°)	Inclinação (°)	Observações
2D	Painel simplificado (1 painel)	10, 27, 40	0, 180	30	Análise principal em duas direções e três velocidades
2D	Painel simplificado (1 painel)	27	0	90	Simulação complementar para validar o comportamento do escoamento
3D	Painel simplificado (1 painel)	10, 27	0, 180	30	Análise tridimensional dos efeitos do vento
3D	Painel simplificado (1 painel)	27	0	90	Validação e comparação com o caso 2D equivalente
3D	Estrutura com tubo, 2 painéis e suporte	27	0	30	Estrutura simplificada com mais elementos — análise mais realista

Com estas simulações, procurou-se obter gráficos representativos do comportamento do escoamento, como linhas de corrente, campos de velocidade e de pressão, e a partir daí, calcular as forças aplicadas ao painel.

Foi dada especial atenção à componente da força na direção normal à superfície do painel, permitindo uma comparação direta com os valores obtidos por métodos normativos.

3.2 Pré-Processamento

3.2.1 Geometria do Modelo e Definição do Domínio de Fluido

Para a realização das simulações CFD desenvolvidas neste trabalho, foram criadas duas geometrias distintas em CAD, com diferentes níveis de simplificação, com o objetivo de estudar os efeitos do vento sobre painéis solares em contexto agrovoltáico.

A primeira configuração corresponde a um painel solar isolado, modelado como uma placa retangular com as dimensões reais do painel utilizado na dissertação de Bruno Campos, nomeadamente 2,280 m de comprimento por 1,134 m de largura e 35 mm de espessura. Esta abordagem permitiu reduzir significativamente a complexidade do modelo, focando a análise nas forças aerodinâmicas atuantes sobre a superfície do painel.

Após o desenho das geometrias, os modelos foram importados para o módulo *DesignModeler* do *ANSYS Workbench*, onde foram devidamente posicionados de acordo com os casos de estudo definidos. As orientações dos painéis foram ajustadas para representar as diferentes inclinações analisadas (30° e 90°) e respeitar a altura de instalação de referência (sensivelmente 5,07 m do solo), garantindo consistência com os dados utilizados para comparação.

Para definir o domínio do fluido envolvente à estrutura, foi utilizada a operação *Enclosure*, que permite criar automaticamente um volume externo ao redor do modelo sólido. Esta operação define os limites do escoamento e estabelece a região onde o fluido (ar) se movimentará, sendo essencial para a realização das simulações. As

dimensões do *enclosure* foram escolhidas com base em boas práticas de modelação CFD, de forma a evitar efeitos de contorno indesejáveis e garantir o desenvolvimento adequado do escoamento. Tipicamente, recomenda-se garantir uma distância a montante de, pelo menos, 3 a 5 vezes o comprimento característico do obstáculo (neste caso, o painel ou a estrutura), e uma distância a jusante de 10 a 15 vezes esse valor, assegurando que o escoamento possa desenvolver-se e estabilizar sem influência direta das fronteiras [64].

Foi também aplicada a operação *Boolean*, que no contexto do *DesignModeler* consiste na subtração dos corpos sólidos do interior do domínio de fluido, criando assim uma região de fluido realista onde ocorrerá o escoamento. Esta operação é fundamental para definir corretamente o volume de simulação e garantir que a malha será gerada apenas na zona correspondente ao escoamento do ar, e não no interior dos corpos sólidos.

Adicionalmente, e com o objetivo de melhorar a qualidade da malha nas zonas críticas de análise, foram adotadas estratégias específicas de controlo local da densidade da malha. No caso das simulações 2D, foram criados dois retângulos, um colocado horizontalmente e outro verticalmente junto ao painel, que serviram como guias para impor uma maior densidade de elementos nessas regiões, onde ocorrem variações significativas do escoamento e onde se pretende obter maior precisão.

A Figura 3.5 ilustra o aspeto do domínio 2D criado, com representação do caso a 30° com vento a escoar na direção de 0° .

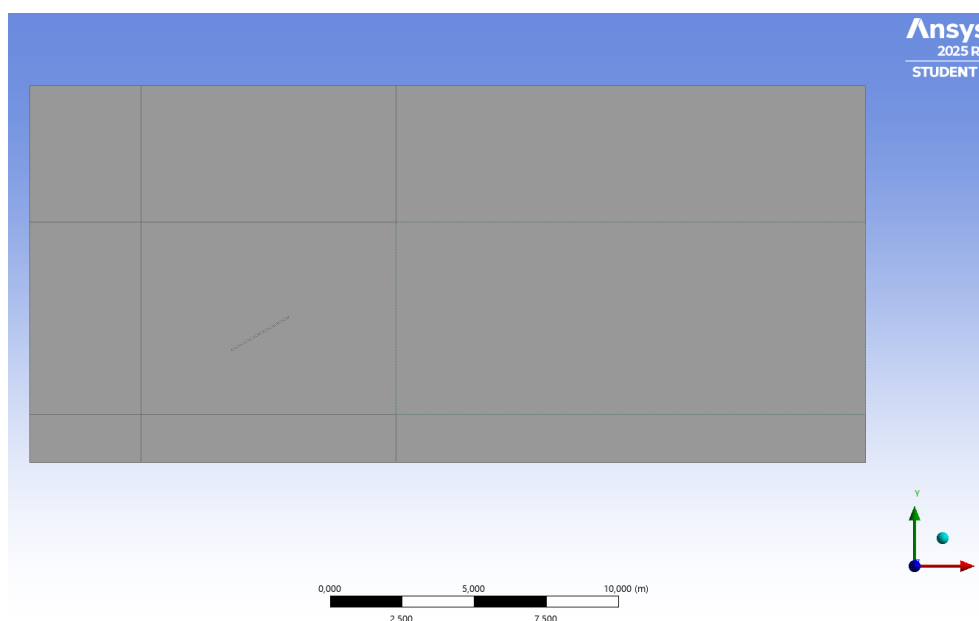


Figura 3.5: Domínio 2D da simulação do painel a 30° com vento a escoar na direção de 0°

Para as simulações 3D, recorreu-se à criação de uma *Box*, definida como *Box of Influence*, que permite estabelecer uma zona de influência com refinamento superior aquando da geração da malha, focada nas regiões mais críticas junto aos painéis. Este artifício garante maior resolução onde ocorrem gradientes intensos de velocidade

e pressão (bordos e arestas), preservando o custo computacional ao promover uma transição progressiva para elementos mais grossos fora dessa zona.

Por fim, foram nomeadas todas as paredes e secções do domínio com nomes como: *Inlet*, *Outlet*, *Top Panel Wall*, entre outros, para que o software, posteriormente, reconhecesse automaticamente as fronteiras requeridas.

Estas medidas foram fundamentais para garantir resultados mais fidedignos sem comprometer o tempo de simulação nem exceder os limites computacionais disponíveis.

A Figura 3.6 demonstra o domínio final obtido para a simulação 3D, com representação do caso a 30° com vento a escoar na direção de 0° .

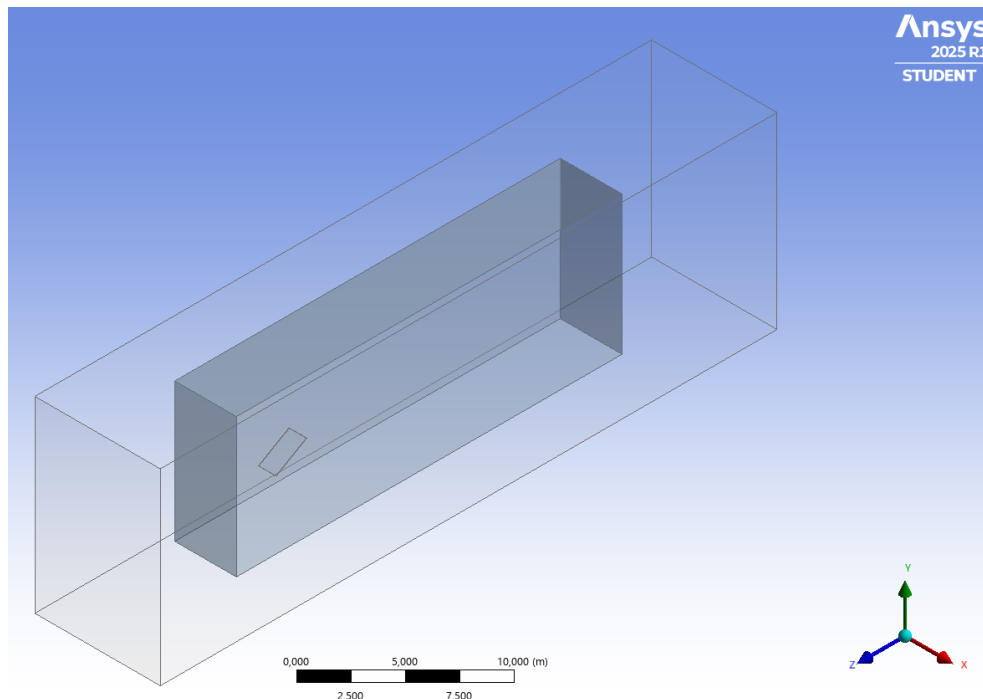


Figura 3.6: Domínio 3D da simulação do painel a 30° com vento a escoar na direção de 0°

3.2.2 Criação da Malha

A criação da malha é uma das etapas mais críticas no processo de simulação CFD, influenciando diretamente a qualidade e a fiabilidade dos resultados obtidos.

Neste trabalho, foram desenvolvidas malhas bidimensionais e tridimensionais, tendo sempre como objetivo maximizar o número de elementos sem ultrapassar o limite de cerca de um milhão de elementos imposto pela licença académica do ANSYS.

Esta limitação exigiu uma abordagem estratégica e cuidadosa na definição dos parâmetros de malhagem, de forma a equilibrar o nível de detalhe geométrico, o tempo de simulação e a qualidade dos resultados.

De forma geral, a malha 2D exigiu menos elementos, não só pelo seu carácter bidimensional, mas também por apresentar uma menor complexidade computacional na resolução do escoamento, ao não considerar efeito na direção transversal.

Malha 2D

O processo de criação da malha 2D foi iterativo, tendo sido realizadas várias tentativas e ajustes até se alcançar uma solução final com qualidade aceitável e dentro das limitações impostas.

Para a geração da malha, foi utilizado o método *Quadrilateral Dominant*, que combina a geração automática de malhas com a predominância de elementos quadrangulares. Este método revelou-se particularmente adequado para domínios retangulares e escoamentos essencialmente bidimensionais, garantindo uma melhor organização dos elementos e uma maior estabilidade numérica.

O tamanho global dos elementos foi definido como 0,2 m, servindo de base para o controlo da resolução geral da malha. Para além disso, foram implementadas duas zonas de refinamento local, utilizando a funcionalidade *Refinement* disponível no módulo de malhagem do ANSYS. Esta função permite definir regiões específicas onde se pretende aumentar a densidade da malha, sem afetar significativamente o restante domínio.

O primeiro refinamento foi aplicado na zona envolvente ao painel solar, com o nível de refinamento 3, o que significa que o tamanho dos elementos nesta região foi reduzido progressivamente em três níveis de subdivisão, originando elementos significativamente menores em redor da geometria crítica.

O segundo refinamento foi aplicado aos dois retângulos guia previamente criados no *DesignModeler*, um colocado horizontalmente e outro verticalmente, com o mesmo nível 3, com o objetivo de captar com maior precisão as variações de escoamento nas zonas acima do painel e a jusante da estrutura, onde se esperam gradientes mais acentuados de velocidade e pressão.

Todas as restantes definições gerais e específicas inerentes à malha no *Meshing* foram mantidas como *default*. Esta abordagem seguiu as boas práticas identificadas na dissertação de mestrado de Leandro Oliveira, que serviu como referência metodológica [54].

A qualidade da malha foi avaliada com base em quatro parâmetros fundamentais:

- **Skewness**: mede o desvio do elemento em relação à sua forma ideal. Valores próximos de 0 indicam elementos de boa qualidade. Aceita-se geralmente que valores inferiores a 0,25 são muito bons e valores até 0,5 são aceitáveis [65–67];
- **Orthogonal Quality**: avalia a ortogonalidade dos elementos. Valores próximos de 1 são ideais. Considera-se que valores acima de 0,7 são bons e acima de 0,9 são excelentes [65–67];
- **Element Quality**: refere-se à forma e regularidade geométrica dos elementos. Valores mais próximos de 1 indicam melhor qualidade [65–67];
- **Aspect Ratio**: indica a razão entre os comprimentos máximo e mínimo de um elemento. Valores mais baixos (próximos de 1) são preferíveis, sendo desejável manter valores inferiores a 5 para evitar distorções significativas [65–67].

Com as definições adotadas, foi possível obter uma malha final composta por 110 153 elementos, garantindo simultaneamente uma boa resolução nas zonas críticas e um

tempo de simulação adequado. A estratégia de discretização privilegiou o refinamento local nas proximidades do painel e uma transição suave para elementos maiores no restante domínio, procurando o equilíbrio entre qualidade numérica e custo computacional.

A Tabela 3.2 sintetiza as informações relativamente aos parâmetros adotados na criação da malha 2D, incluindo o método de malhagem adotado, dimensões características e zonas de refinamento.

Tabela 3.2: Resumo dos parâmetros e estratégias utilizadas na malha 2D.

Parâmetro / Estratégia	Descrição / Valor Aplicado
Método de malhagem	Quadrilateral Dominant
Tamanho global dos elementos	0,2 m
Refinamento local 1	Em torno do painel solar – Nível 3
Refinamento local 2	Retângulos horizontal e vertical – Nível 3

As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram a malha final obtida em 2D, onde se evidencia o refinamento local nas zonas previamente definidas, nomeadamente na envolvente imediata do painel, e nas regiões de interesse para a análise do escoamento — acima e abaixo do painel, bem como a jusante (esteira). Observa-se ainda uma transição gradual para elementos de maior dimensão à medida que se afasta do painel, solução que minimiza distorções, melhora a continuidade da malha e evita o aumento desnecessário do custo computacional. Estas figuras permitem, assim, confirmar a coerência da estratégia de malhagem adotada face aos critérios estabelecidos anteriormente, assegurando resolução suficiente para captar os gradientes de velocidade e pressão junto das arestas e superfícies do painel.

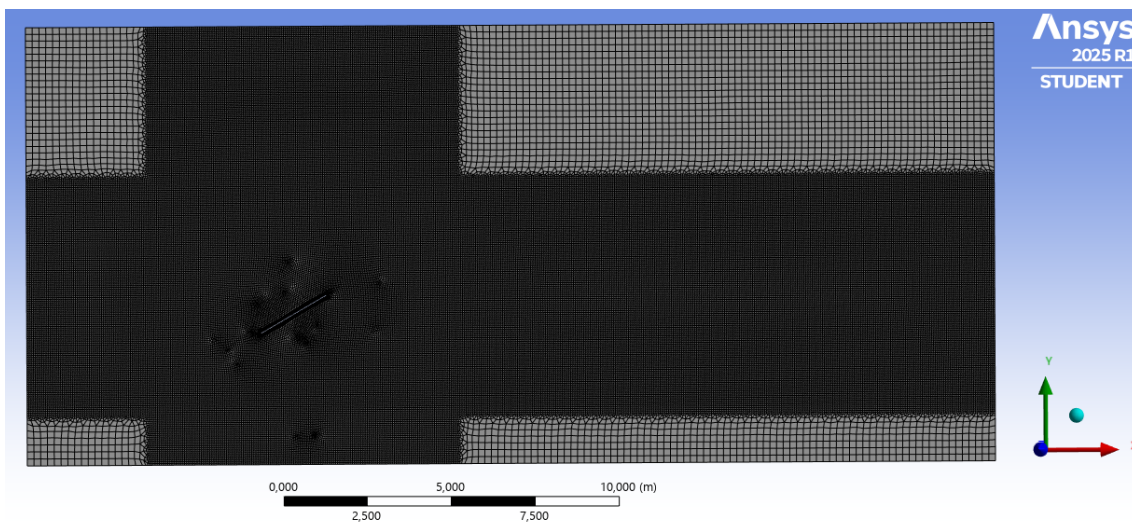


Figura 3.7: Malha 2D final

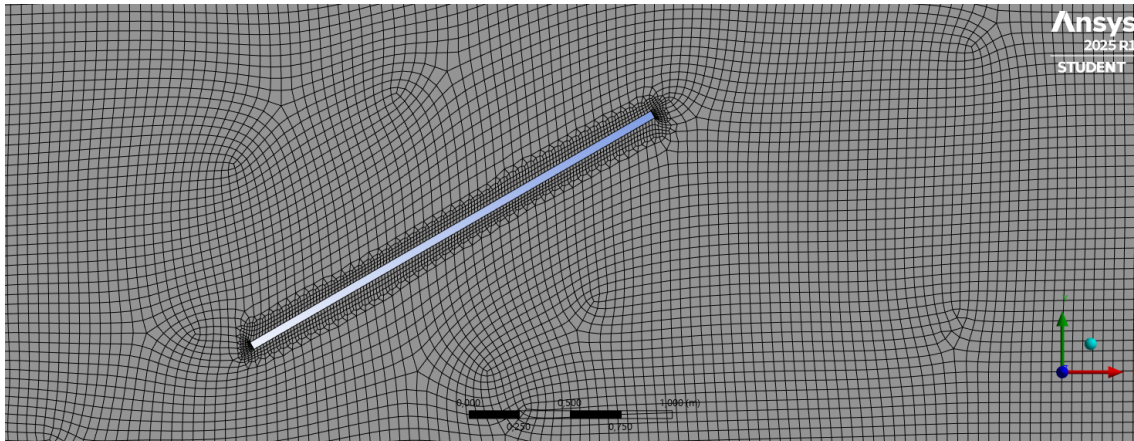


Figura 3.8: Detalhes próximos ao painel da Malha 2D

Já relativamente aos parâmetros de qualidade de malha explicados acima, a Figura 3.9 representa a distribuição dos elementos métricos obtidos para cada parâmetro na malha 2D.

A malha foi otimizada e apresenta métricas dentro dos intervalos recomendados, reduzindo erros numéricos, favorecendo a convergência e assegurando resultados fisicamente fiáveis.

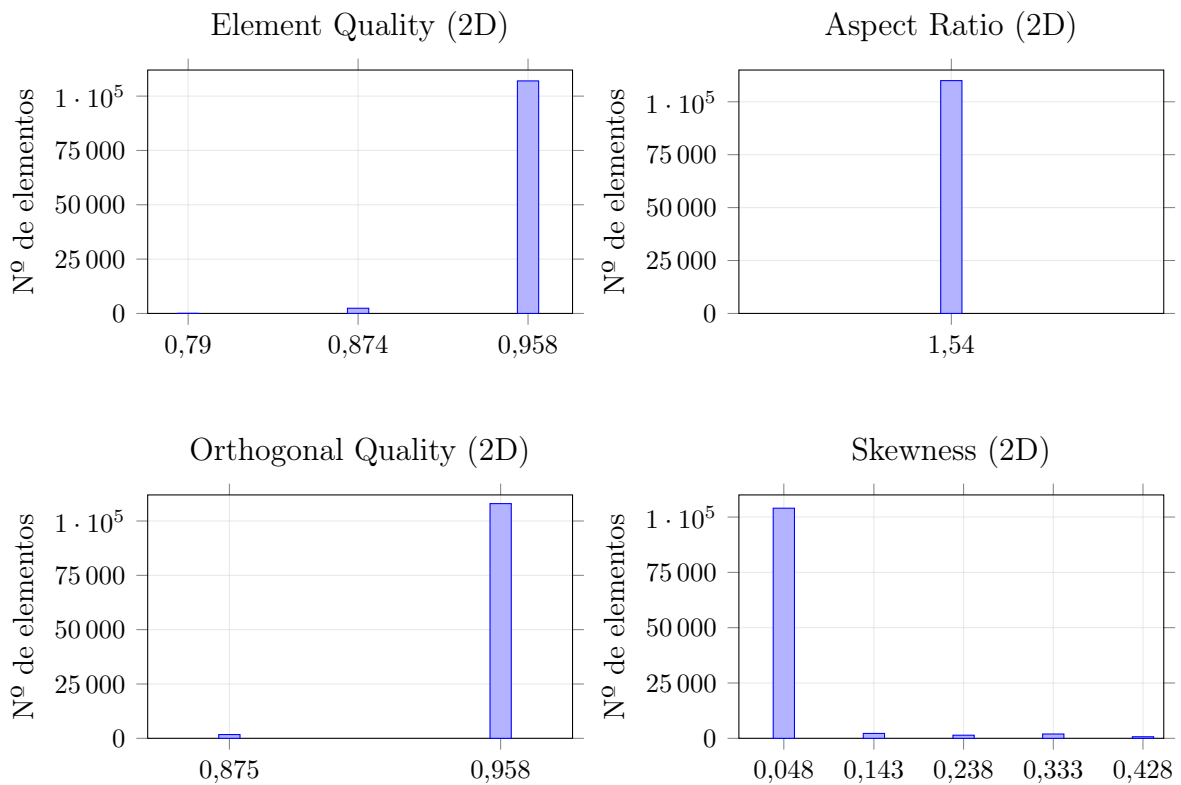


Figura 3.9: Distribuição dos parâmetros métricos da malha 2D obtidos através do Ansys

Malha 3D

A criação da malha tridimensional exigiu uma abordagem distinta da malha 2D, já que o número de elementos cresce de forma muito mais rápida devido à discretização volumétrica. Assim, tornou-se essencial encontrar um equilíbrio entre a resolução nas zonas críticas e o número total de elementos, que não poderia ultrapassar cerca de 1 milhão, conforme os limites da licença académica do ANSYS e o orçamento computacional disponível. Para tal, recorreu-se a um conjunto de testes exploratórios de malhagem, que permitiram ajustar tamanhos característicos e zonas de refinamento até se obter uma configuração estável e eficiente.

O tamanho global dos elementos foi definido como 1 m, garantindo uma malha suficientemente leve para simulação, mas ainda capaz de captar o comportamento do escoamento nas zonas periféricas do domínio. O método automático de geração de malha produziu uma malha não estruturada com elementos do tipo tetraédrico (Tet4), solução versátil e adequada para geometrias tridimensionais complexas, permitindo boa adaptação a superfícies inclinadas e arestas.

Para melhorar a resolução nas regiões mais relevantes, foram aplicados dois refinamentos locais: um nas faces do painel solar, com elementos de 0.03 m, e outro no interior de um *Body of Influence* criado no *DesignModeler*, com tamanho de 0.26 m. Esta ferramenta permite refinar apenas a zona de interesse — envolvente do painel e início da esteira — sem comprometer o restante domínio, assegurando uma transição progressiva para elementos mais grossos e evitando saltos bruscos de dimensão que poderiam deteriorar a qualidade numérica.

Foi ainda utilizada a funcionalidade *Inflation*, que gera camadas prismáticas junto às superfícies sólidas. Essencial em simulações CFD, esta função permite resolver corretamente os gradientes de velocidade normais à parede (camada limite), fundamentais para prever atrito, separação e transferência de quantidade de movimento. Os parâmetros utilizados (número de camadas, razão de crescimento e espessura total) garantem uma progressão controlada a partir da parede e uma ligação suave às células tetraédricas do interior, promovendo estabilidade e precisão.

No total, a malha 3D foi composta por 1 001 466 elementos, com a seguinte distribuição:

- **Tet4** (elementos tetraédricos): 910 774
- **Wedge6** (elementos prismáticos): 87 257
- **Pyramid5** (elementos piramidais): 3 435

Os elementos piramidais funcionam como transição entre as camadas prismáticas (*inflation*) e os tetraédricos do domínio, mitigando desalinhamentos e assegurando compatibilidade geométrica. Os elementos **Wedge6**, por sua vez, são gerados pela inflação e representam corretamente a camada limite junto às superfícies. A combinação destes tipos de elementos assegura continuidade na malha e cumpre os critérios de qualidade geométrica definidos anteriormente, contribuindo para a convergência do solver e para a fiabilidade dos resultados.

A Tabela [3.3](#) resume parâmetros importantes definidos para a obtenção da malha 3D.

Tabela 3.3: Resumo dos parâmetros e estratégias utilizadas na malha 3D.

Parâmetro / Estratégia	Descrição / Valor Aplicado
Método de malhagem	Geração automática (malha tetraédrica - Tet4)
Tamanho global dos elementos	1 m
Refinamento local 1	Face do painel solar – tamanho de elemento 0,03 m
Refinamento local 2	Corpo de influência – tamanho de elemento 0,26 m
Corpo de influência (Body of Influence)	Aplicado para garantir maior densidade de malha em redor do painel e zona de escoamento próxima, sem afetar o restante domínio
Inflation – First Layer Thickness	$5,0 \times 10^{-4}$ m
Inflation – Maximum Layers	10
Inflation – Growth Rate	1,25
Inflation – Algoritmo	Pre
Inflation – Collision Avoidance	Layer Compression
Número total de elementos	1 001 466
Distribuição dos elementos	Tet4: 910 774 Wedge6 (prismáticos): 87 257 Pyramid5 (piramidais): 3 435
Justificação dos tipos de elementos	Tet4 para o volume geral; Wedge6 para camada limite (inflation); Pyramid5 como transição entre Wedge6 e Tet4

Na Figura 3.10 consta um plano de corte YZ que permite visualizar os detalhes dos elementos 3D da malha.

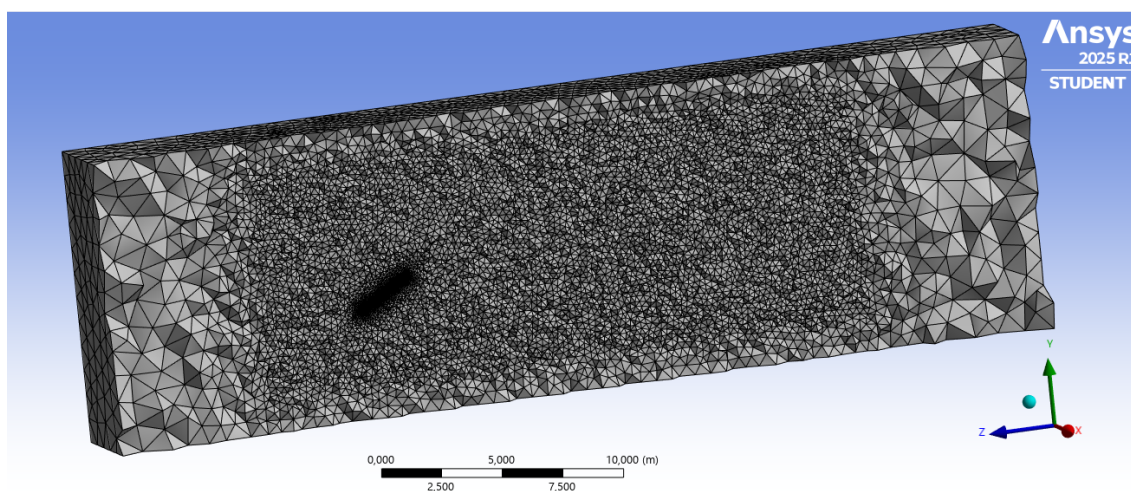


Figura 3.10: Malha 3D final

Na Figura 3.11 evidenciam-se os detalhes da malha junto ao painel: camadas de inflation nas paredes e refinamento local para resolver o escoamento junto à estrutura.

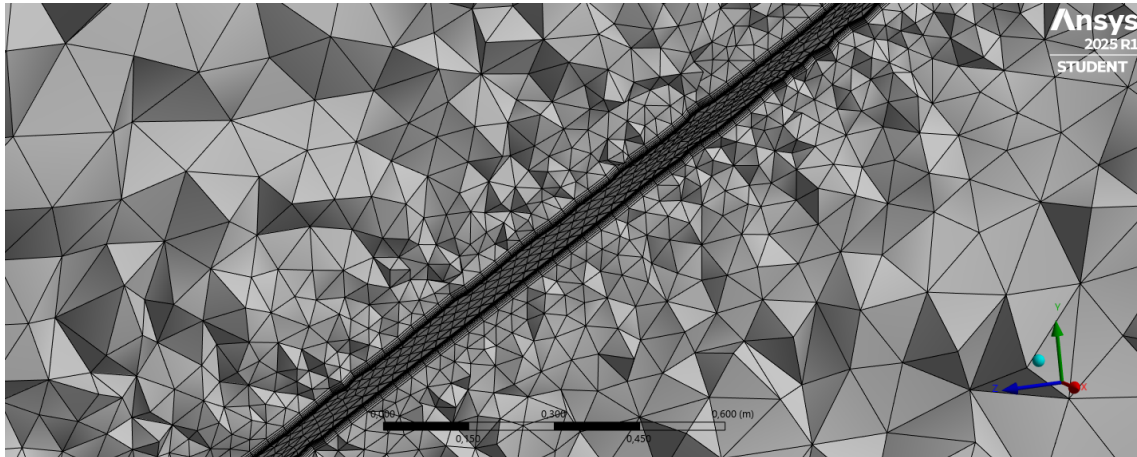


Figura 3.11: Detalhes próximos ao painel da malha 3D

A Figura 3.12 sintetiza a qualidade da malha 3D: maior dispersão face à 2D, esperada pela complexidade, mas métricas admissíveis e poucos elementos de baixa qualidade, sem afetar os resultados.

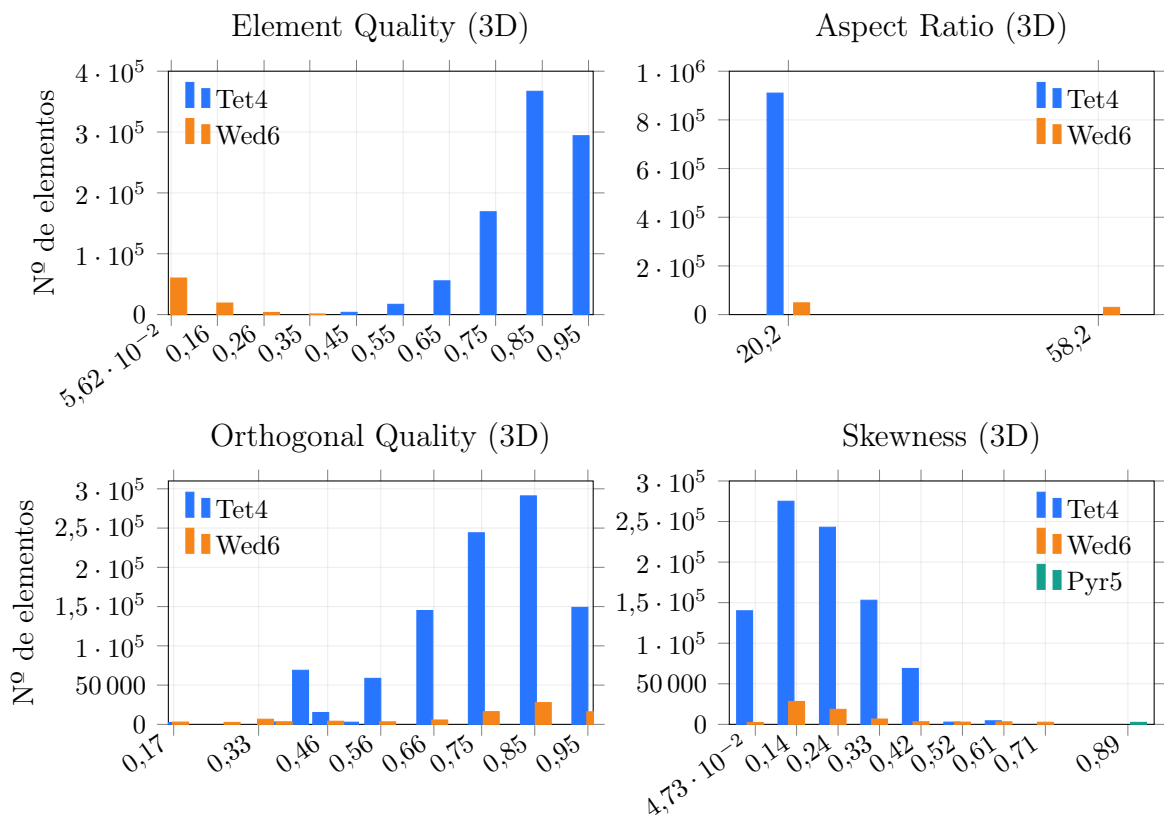


Figura 3.12: Distribuição dos parâmetros métricos da malha 3D obtidos através do Ansys

3.2.3 Definições Físicas do Problema

A análise numérica realizada nesta dissertação incide sobre o escoamento de ar em torno de painéis fotovoltaicos inclinados, posicionados em diferentes configurações espaciais e sob variadas velocidades de vento. A geometria estudada, uma placa retangular exposta a um escoamento livre, apresenta características típicas de problemas com separação de camada limite, recirculações e formação de zonas de baixa pressão a jusante da placa. Este tipo de configuração é amplamente reconhecido na literatura como gerador de escoamentos com natureza complexa, predominantemente turbulenta, mesmo a velocidades de vento moderadas.

Dado o objetivo de analisar o comportamento do escoamento atmosférico sob condições realistas e representativas, foi adotado um modelo de escoamento turbulento, estacionário e incompressível. A escolha de um regime estacionário (*steady-state*) justifica-se pela natureza do escoamento atmosférico a médias escalas e pela viabilidade computacional, sendo uma abordagem comum para estudos comparativos e paramétricos em engenharia. A hipótese de incompressibilidade é válida para o escoamento do ar às velocidades consideradas (10, 27 e 40 m/s), uma vez que a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som (número de Mach) se mantém muito abaixo de 0,3, limiar geralmente aceite para desconsiderar efeitos de compressibilidade.

O escoamento foi considerado tridimensional para a maioria dos casos, com exceção das simulações em 2D realizadas para efeito comparativo e de estudo preliminar, permitindo uma redução significativa do custo computacional. Ainda assim, as simulações bidimensionais mantêm valor analítico importante, sobretudo na compreensão de fenômenos de separação e recirculação típicos do comportamento do escoamento sobre superfícies inclinadas.

As propriedades físicas do fluido (ar) foram consideradas constantes e definidas com base em condições padrão ao nível do mar, correspondentes a 25 °C de temperatura e 1 atm de pressão. Assim, os valores assumidos no Fluent para as simulações foram os seguintes:

- **Densidade (ρ):** 1,225 kg/m³
- **Viscosidade dinâmica (μ):** 1,7894 × 10⁻⁵ Pa·s

Estas propriedades foram mantidas constantes para todas as simulações, sendo suficientemente representativas do comportamento do ar em condições exteriores moderadas.

O comportamento turbulento do escoamento, a presença de gradientes de pressão, de separações e de recirculações, requerem posteriormente a ativação de modelos adequados de turbulência, conforme detalhado no subcapítulo seguinte.

Adicionalmente, todos os corpos sólidos utilizados nas simulações foram considerados como sendo compostos por alumínio, material padrão definido por defeito no ANSYS Fluent. Embora as propriedades térmicas e mecânicas do material não tenham influência direta nas simulações realizadas, uma vez que não foi considerado o acoplamento termo-estrutural, esta escolha garante a coerência física do modelo e permite futuras extensões do estudo, nomeadamente em análises térmicas ou estruturais acopladas.

3.2.4 Condições de Fronteira

A definição adequada das condições de fronteira é fundamental para garantir a fidelidade física e numérica de uma simulação CFD. No presente trabalho, as superfícies envolventes do domínio foram atribuídas através de seleções nomeadas (*named selections*) previamente definidas no *DesignModeler* e transportadas para o *ANSYS Fluent*.

A entrada de escoamento foi definida como uma condição do tipo *velocity-inlet*, sob a seleção nomeada *inlet*, permitindo a imposição direta da velocidade do vento incidente sobre o painel. Para todos os casos simulados, consideraram-se velocidades de 10 m/s, 27 m/s e 40 m/s, conforme o estudo comparativo pretendido. Adicionalmente, foi especificada uma intensidade de turbulência de 5%, valor habitualmente adotado para representar escoamentos atmosféricos de intensidade moderada, em contexto urbano aberto.

A superfície oposta, correspondente à saída do domínio, foi definida como *pressure-outlet*, sob a seleção *outlet*, sendo aplicada uma condição de pressão manométrica nula (*Gauge Pressure* = 0 Pa), assumindo-se que o escoamento descarrega livremente para a atmosfera.

Foi também utilizada uma condição de simetria na fronteira *symmetry*, representando superfícies sem fluxo normal nem gradientes de tensão tangencial. Esta escolha permite reduzir o tempo de simulação e o número de elementos necessários, desde que bem justificada pela geometria e condições de contorno, o que se verificava em alguns dos casos bidimensionais estudados.

Relativamente às fronteiras físicas das paredes do domínio (seleções *back_wall*, *bottom_wall*, *front_wall*, *ground_wall* e *top_wall*), todas foram tratadas como paredes com condição de não deslizamento (*no-slip wall*), exceto nos casos específicos em que se pretendia apenas representar uma fronteira distante do objeto de estudo, tendo-se nesse caso utilizado a condição *symmetry* ou *slip wall* (conforme aplicável). A parede inferior, *ground_wall*, foi especialmente considerada como parede sólida com *no-slip*, devido à sua relevância no desenvolvimento do escoamento junto ao solo e respetiva influência sobre o painel.

Por fim, a seleção *Internal* corresponde às superfícies internas do painel e de outros sólidos presentes no domínio. Estas superfícies são geradas automaticamente pelo Fluent como interfaces entre zonas de malha sólida e fluida, sendo tratadas de acordo com as condições impostas às superfícies exteriores correspondentes (neste caso, consideradas como superfícies sólidas, com condição de *no-slip* e sem troca de calor, dado que os efeitos térmicos não foram considerados no presente estudo).

A aplicação cuidadosa e coerente destas condições de fronteira assegura o realismo do modelo físico e a estabilidade da solução numérica obtida.

3.3 Módulo de Resolução (Solver)

3.3.1 Configuração Geral do Solver

A correta configuração do *solver* é essencial para garantir a estabilidade e a precisão numérica das simulações CFD.

No presente trabalho, tanto para a análise bidimensional (2D) como para a tridimensional (3D), foram adotadas configurações semelhantes no que respeita ao tipo de *solver*, esquema de discretização e critérios de convergência, sendo apenas ajustados os métodos espaciais de acordo com a complexidade da simulação.

Tipo de Solver

Foi selecionado o *Pressure-Based Solver* (*solver* baseado em pressão), adequado para escoamentos incompressíveis, que é o caso presente, dado que a velocidade do escoamento considerado é suficientemente baixa para negligenciar efeitos de compressibilidade (número de Mach $< 0,3$). Esta abordagem é particularmente eficaz para resolver as equações de Navier-Stokes quando a densidade do fluido pode ser assumida constante ao longo do domínio.

A formulação em regime estacionário (*steady-state*) foi também adotada, uma vez que o objetivo do estudo é obter a solução permanente do campo de velocidades e pressões, sem necessidade de considerar variações ao longo do tempo.

Acoplamento Pressão-Velocidade

Optou-se pelo esquema *Coupled* para o acoplamento entre as equações de pressão e velocidade. Este método resolve simultaneamente as equações do momento e da pressão, o que tende a acelerar a convergência e aumentar a robustez da solução, especialmente em casos tridimensionais com escoamentos complexos.

Esquemas de Discretização Espacial

A discretização espacial das equações foi cuidadosamente selecionada de forma a equilibrar precisão e estabilidade numérica:

- **Gradiente:** Método *Least Squares Cell-Based*, apropriado para malhas não estruturadas, oferecendo uma boa estimativa do gradiente escalar mesmo em células deformadas.
- **Pressão:** Esquema *Second Order*, garantindo uma maior precisão na distribuição da pressão no domínio, especialmente relevante em escoamentos com variações suaves.
- **Momento:** Método *Second Order Upwind*, que considera a informação de nós a montante com maior rigor, sendo mais preciso que o método de primeira ordem, especialmente em regiões com gradientes acentuados.
- **Energia Cinética Turbulenta e Taxa de Dissipação:**
 - Para o modelo 2D ($k-\varepsilon$): foi utilizado o esquema *First Order Upwind* tanto para a equação da energia cinética turbulenta (k) como para a taxa de dissipação turbulenta (ε). Esta escolha prende-se com a estabilidade adicional necessária em geometrias 2D simplificadas e malhas menos refinadas [61].
 - Para o modelo 3D (SST $k-\omega$): adotou-se o esquema *Second Order Upwind* para as equações de k e ω , maximizando a precisão da modelação da camada limite e dos gradientes de turbulência.

Critérios de Convergência

A convergência, explicada em maior detalhe no subcapítulo [2.4.4](#), foi monitorizada com base nos resíduos das equações, que devem reduzir-se significativamente à medida que a solução se aproxima do estado estacionário e, também, pelo valor das forças em estudo, que também devem estabilizar conforme a simulação decorre.

Foi adotado o critério *default* do ANSYS Fluent, isto é, um limite de:

- 10^{-3} para as equações de continuidade e de momento;
- 10^{-3} para a energia cinética turbulenta (k) e para a taxa de dissipação turbulenta (ε);
- 10^{-3} para a taxa de dissipação específica de energia turbulenta (ω), no caso do modelo SST;
- 10^{-6} para a equação da energia (não utilizada).

Este critério é geralmente considerado suficiente para garantir a precisão dos resultados em simulações estáticas. Durante a simulação, foi também feita verificação visual da estabilização dos parâmetros relevantes (velocidade, pressão, etc.) nos monitores de solução, confirmando que o sistema alcançou o regime permanente.

Em suma, as opções adotadas refletem boas práticas recomendadas na literatura para escoamentos incompressíveis estacionários em CFD, com o objetivo de assegurar robustez, estabilidade e precisão na simulação.

3.3.2 Modelos Ativados

No âmbito das simulações, foram selecionados modelos de turbulência distintos para as análises 2D e 3D, tendo em conta a sua reconhecida aplicabilidade em escoamentos externos e em problemas de engenharia similares.

Para a modelação da turbulência, abordada com maior incidência no subcapítulo [2.4.5](#) da revisão bibliográfica, foram selecionados dois modelos amplamente utilizados em CFD, consoante a dimensionalidade da simulação:

- **Simulações 2D:** Adotou-se o modelo k - ε padrão, com funções de parede escaláveis (*Scalable Wall Functions*). Este modelo é computacionalmente eficiente e adequado para escoamentos externos completamente desenvolvidos, sendo frequentemente utilizado em estudos preliminares.
- **Simulações 3D:** Optou-se pelo modelo k - ω SST (*Shear Stress Transport*), que combina as vantagens dos modelos k - ω (junto às paredes) e k - ε (no escoamento livre). Este modelo é particularmente recomendado para escoamentos com separação e gradientes adversos de pressão, como é o caso de painéis inclinados.

Em ambos os casos, para valores dos parâmetros associados a cada modelo (por exemplo: $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε para o k - ε ; β^* , α , σ_ω para o k - ω SST), anteriormente explicados no subcapítulo [2.4.5](#), foram utilizadas as configurações padrão (default) do ANSYS Fluent.

Esta opção foi tomada porque o foco do trabalho não se centrou na calibração detalhada dos modelos de turbulência, mas sim na obtenção de resultados robustos e comparáveis com a prática corrente em simulações de engenharia.

O recurso às definições pré-estabelecidas pelo software assegura a reprodutibilidade do estudo, uma vez que estas correspondem às condições recomendadas e mais frequentemente aplicadas na literatura e na indústria.

Além disso, ao evitar alterações manuais nos parâmetros internos dos modelos, reduz-se a possibilidade de introduzir fontes adicionais de incerteza ou enviesamento, permitindo que a análise se mantenha focada na avaliação do comportamento do escoamento e na comparação com as previsões normativas.

3.3.3 Inicialização e Monitorização

A fase de inicialização tem um papel fundamental na estabilidade e eficiência da simulação numérica.

Para os casos analisados, recorreu-se à inicialização do tipo *Hybrid Initialization*, método predefinido no ANSYS Fluent que combina vantagens da inicialização standard com a solução de uma equação de Laplace simplificada, permitindo gerar campos de velocidade e pressão mais realistas mesmo antes do início das iterações. Este tipo de inicialização revelou-se particularmente eficaz tanto em geometrias 2D como 3D, assegurando uma convergência mais rápida e estável face à alternativa *Standard Initialization*.

Tal como previamente definido na Secção [3.3.1](#), os critérios de convergência basearam-se na redução dos resíduos abaixo dos limites admissíveis. Nesta fase, procedeu-se à verificação prática desses critérios através da monitorização em tempo real dos resíduos das equações e da análise da evolução de variáveis físicas relevantes.

A monitorização da solução foi realizada com base nos gráficos de resíduos (*residuals*) gerados a cada iteração, permitindo avaliar a evolução da solução numérica das equações de conservação. Para garantir a fiabilidade dos resultados, definiu-se como critério mínimo de convergência a redução dos resíduos abaixo de 10^{-5} para as equações de continuidade e momento, e abaixo de 10^{-6} para as equações associadas à energia turbulenta (k) e à sua dissipação específica (ω). Estes valores foram considerados adequados para assegurar a estabilidade e consistência dos resultados simulados, tendo sido acompanhados por análise visual dos gráficos de evolução.

Além da análise dos resíduos, a verificação da convergência incluiu a monitorização de parâmetros físicos relevantes, nomeadamente, as componentes da velocidade nos planos de escoamento e a força de arrasto nos painéis. A estabilização desses parâmetros ao longo das iterações foi utilizada como critério adicional de verificação qualitativa da convergência.

As Figuras [3.13](#) e [3.14](#) permitem demonstrar que, em todos os casos, observou-se uma evolução progressiva dos campos até à sua estabilização, com variações residuais inferiores a 10^{-8} nas componentes da velocidade, evidenciando uma solução convergente e estável.

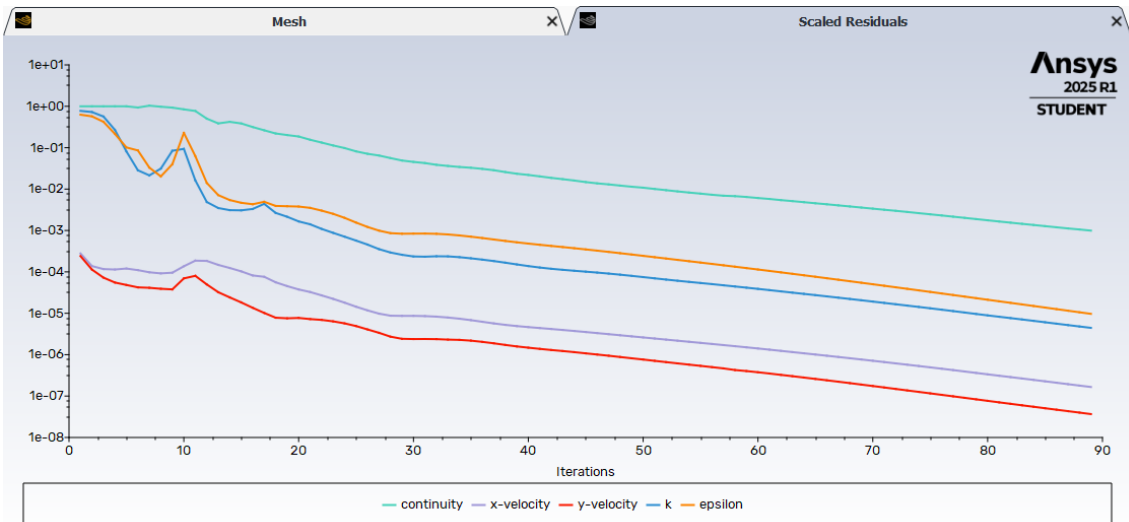


Figura 3.13: Gráfico de resíduos para 2D

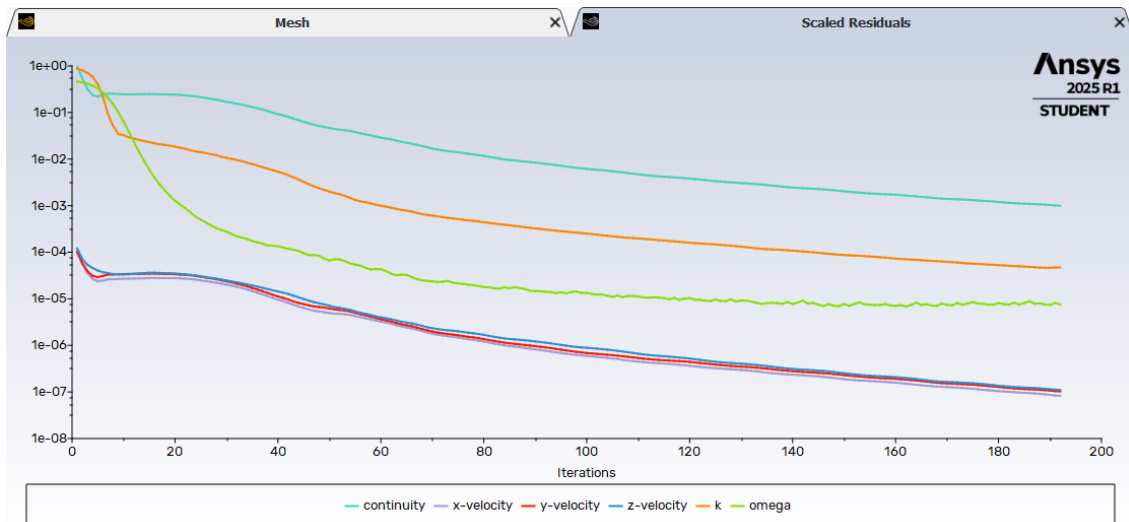


Figura 3.14: Gráfico de resíduos para 3D

Este controlo rigoroso da solução numérica foi essencial para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos, especialmente tendo em conta as limitações impostas pela versão académica do ANSYS e os requisitos de malha definidos anteriormente.

3.3.4 Estratégia de Simulação

A definição da estratégia de simulação teve como principal objetivo garantir a estabilidade e eficiência do processo numérico, assegurando simultaneamente a convergência das soluções dentro dos limites computacionais impostos pela licença académica do ANSYS Student, que restringe o número total de nós a cerca de um milhão e o acesso a recursos de paralelização mais avançados.

Com base nesta limitação, e de modo a não comprometer a precisão dos resultados, foi adotada uma abordagem que priorizasse a simplicidade dos modelos, a otimização da malha e a configuração de modelos físicos robustos, mas computacionalmente

eficientes. Este equilíbrio permitiu alcançar simulações fiáveis com tempos de execução reduzidos e requisitos de memória compatíveis com sistemas computacionais convencionais.

Em todas as simulações, foi definido por conveniência um limite máximo de 500 iterações, valor meramente indicativo e não resultado de qualquer cálculo a priori. No entanto, observou-se que em todos os casos o critério de convergência foi satisfeito muito antes de atingir esse limite.

- Nas simulações bidimensionais (2D), a convergência foi normalmente atingida entre as 80 a 90 iterações, refletindo a simplicidade geométrica e a boa qualidade da malha aplicada (ver Figura 3.13);
- Já nas simulações tridimensionais (3D), a convergência foi alcançada entre as 200 a 300 iterações, o que se considera um desempenho muito satisfatório, tendo em conta a maior complexidade e o número significativamente superior de elementos (ver Figura 3.14);

Não foram aplicadas estratégias de adaptação dinâmica da malha durante a simulação (*mesh adaptation*), uma vez que a malha foi previamente definida com refinamentos localizados e técnicas de controlo de qualidade (como o uso de *inflation* e de corpos de influência), tendo-se revelado suficiente para capturar os fenómenos relevantes com precisão.

Em termos de desempenho, as simulações 2D foram resolvidas em poucos minutos, enquanto as simulações 3D variaram entre cerca de 20 a 50 minutos dependendo da complexidade do caso (velocidade do vento, direção, e tipo de geometria analisada).

Estas durações reforçam a eficácia da estratégia adotada, ao permitir um estudo paramétrico completo dentro de prazos razoáveis, sem recurso a plataformas de alto desempenho computacional.

O computador utilizado para todas as simulações apresenta as respetivas características técnicas na Tabela 3.4

Tabela 3.4: Especificações principais do computador utilizado para a realização das simulações numéricas.

Componente	Descrição
Processador (CPU)	Intel Core i7-9700F @ 3.00 GHz (8 núcleos, 8 threads)
Memória RAM	8 GB DDR4
Armazenamento	224 GB SSD (Kingston SA400S37240G) + 932 GB HDD (Toshiba HDWD110)
Placa Gráfica (GPU)	NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti (6 GB GDDR6)
Sistema Operativo	Windows 10 (64 bits)

A estratégia de simulação adotada demonstrou, assim, ser adequada ao contexto académico e à capacidade computacional disponível, permitindo a execução de simulações fiáveis, com tempos de execução controlados e sem comprometer a robustez dos resultados obtidos. A definição faseada do problema (geometria, malha, modelos e solver) e o uso criterioso de refinamentos locais tornaram possível concentrar

recursos nas zonas de maior interesse, evitando custos desnecessários no restante domínio. Adicionalmente, a documentação sistemática das configurações garante reprodutibilidade e facilita a transferência do procedimento para casos semelhantes.

Este equilíbrio entre precisão numérica e custo computacional revelou-se particularmente importante face à complexidade geométrica e às condições de contorno definidas, assegurando que o modelo se mantivesse estável ao longo de todo o processo de iteração. O acompanhamento de resíduos e de grandezas integradas (forças) permitiu confirmar a estabilização das soluções e sustentar a decisão de paragem, reduzindo o risco de convergências aparentes. Em paralelo, escolhas consistentes de discretização e de modelos físicos mitigaram difusão numérica excessiva, preservando os gradientes relevantes próximos das superfícies.

Além disso, a metodologia seguida possibilitou a obtenção de resultados com qualidade suficiente para análise comparativa e validação, ao mesmo tempo que preservou a flexibilidade necessária para eventuais ajustamentos de malha ou de parâmetros físicos, caso se tornasse necessário refinar o estudo. Esta flexibilidade operacional é particularmente útil para executar pequenas análises de sensibilidade e aferir a independência qualitativa dos resultados face às principais opções de modelação. No seu conjunto, o processo delineado constitui um *workflow* sólido, escalável e replicável, adequado tanto à exploração académica como ao apoio preliminar ao projeto.

3.4 Pós-Processamento

3.4.1 Resultados de Velocidade e Pressão

Nesta secção optou-se por apresentar, de forma detalhada, os resultados correspondentes à velocidade de referência de 27 m/s, com vento incidente na direção 0° e painéis inclinados a 30° , tanto para a geometria 2D como para a 3D, por se tratar de um caso representativo do comportamento típico do escoamento. Esta escolha é coerente com as condições de referência adotadas noutras secções e permite estabelecer uma base comum para leitura e comparação.

Esta configuração foi selecionada por favorecer a observação clara de fenómenos como zonas de recirculação, separação e reataque do escoamento na superfície dos painéis, bem como a formação da esteira a jusante. Adicionalmente, evidencia de forma distinta os gradientes de pressão e as regiões de sucção/sobrepressão mais relevantes para a avaliação de esforços.

A apresentação conjunta das duas abordagens geométricas facilita ainda a comparação qualitativa e quantitativa entre os modelos bidimensional e tridimensional, realçando as diferenças na distribuição de velocidades e na estrutura dos escoamentos turbulentos. Em particular, sublinham-se os efeitos tridimensionais (vórtices de extremidade e desvios laterais do jato) que não são captados no modelo 2D, contribuindo para uma interpretação mais completa do campo de escoamento.

Por fim, todos os restantes contornos de velocidade obtidos para diferentes direções de vento e casos simulados encontram-se reunidos no Apêndice A [1](#), assegurando uma visão integrada dos resultados e permitindo consultas específicas sempre que necessário.

2D - Placa Retangular

A Figura 3.15 mostra o campo de velocidades resultante da simulação bidimensional.

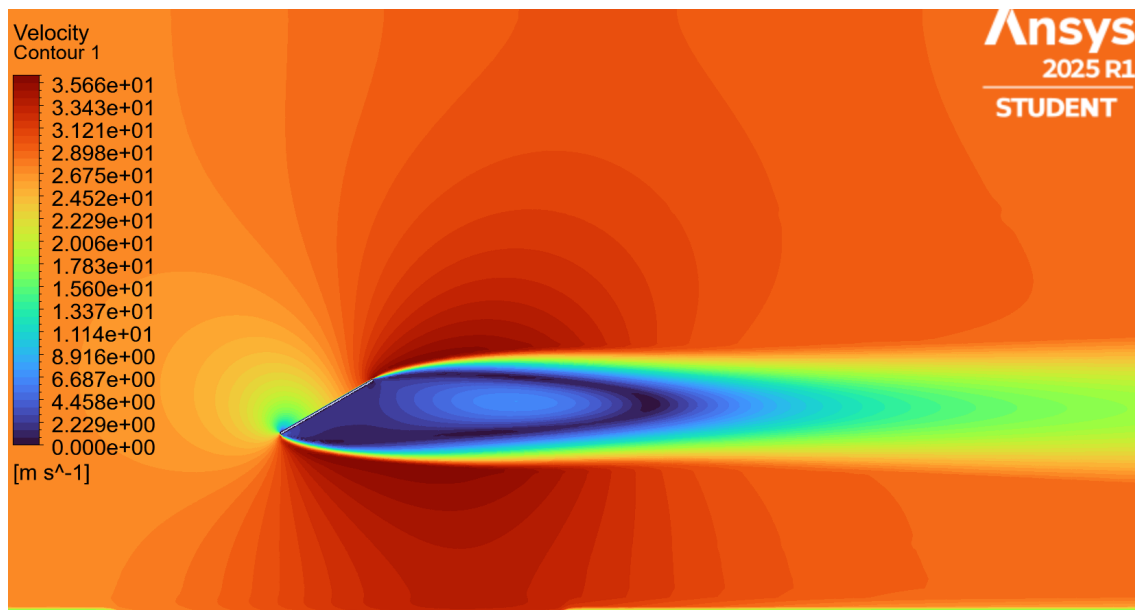


Figura 3.15: Gráfico de velocidades para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s

A análise do escoamento permite identificar várias regiões de interesse:

- **Zona de estagnação:** Na parte frontal do painel, o escoamento incide diretamente sobre a superfície, originando uma zona de velocidade nula ($v \approx 0$ m/s), tal como esperado num ponto de estagnação. Esta região caracteriza-se por elevado gradiente de pressão e representa a primeira interação do fluido com a geometria.
- **Aceleração sobre a face superior:** Após contornar o bordo de ataque, o escoamento acelera ao longo da face superior, atingindo valores máximos superiores a 35 m/s, acima da velocidade livre. Esta aceleração resulta da redução da pressão induzida pela curvatura local do escoamento, conforme descrito pelas equações de Bernoulli e do momentum para escoamento externo.
- **Recirculação e esteira (*wake*):** A jusante do painel observa-se uma zona de velocidades reduzidas e linhas de corrente divergentes, indicando a formação de uma esteira com possíveis regiões de recirculação e turbulência. Esta zona é consequência da separação do escoamento junto à face inferior e da perda de energia cinética por efeito do atrito viscoso e da dissipação turbulenta.
- **Simetria do escoamento:** Dado que o vento incide perpendicularmente ao painel (direção 0°), o escoamento revela-se globalmente simétrico, o que é coerente com os resultados esperados em configurações alinhadas.

Este tipo de comportamento é típico em escoamentos sobre superfícies planas expostas ao vento e serve como base para a análise comparativa de diferentes ângulos de incidência e da geometria tridimensional, como será abordado nas próximas secções.

Já a Figura 3.16 apresenta o contorno de pressões resultante da simulação bidimensional com escoamento incidente na direção perpendicular aos painéis. Este gráfico permite identificar as regiões críticas de sobrepressão e depressão, associadas à interação entre o escoamento e a geometria do painel.

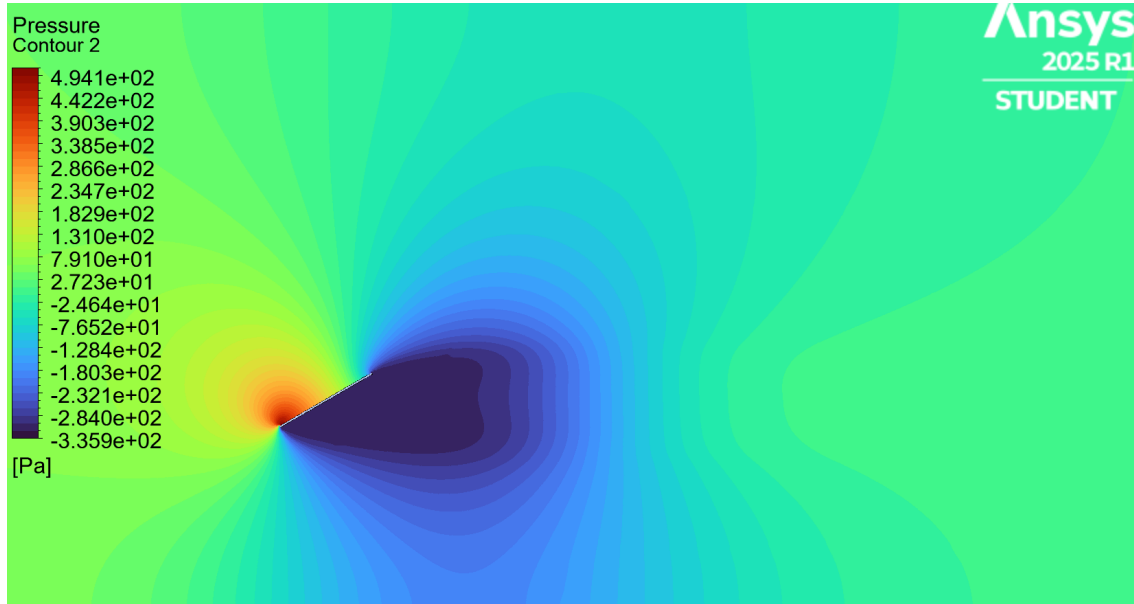


Figura 3.16: Gráfico de pressões para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s

A análise do escoamento permite identificar várias regiões de interesse:

- **Zona de alta pressão (zona de impacto):** Observa-se uma região de elevada pressão na parte frontal do painel, diretamente exposta ao escoamento. Este efeito resulta do ponto de estagnação, onde a energia cinética do fluido é convertida em energia de pressão estática, conforme descrito pela equação de Bernoulli:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad (3.1)$$

Nesta zona, a velocidade tende para zero e, conseqüentemente, a pressão atinge o seu valor máximo.

- **Zona de baixa pressão (face superior e inferior):** Ao contornar o painel, o escoamento acelera, resultando numa diminuição da pressão ao longo da superfície, mais evidente na face superior devido ao perfil aerodinâmico. Este fenómeno contribui para a geração de forças aerodinâmicas relevantes (sustentação e arrasto), que serão discutidas mais à frente.
- **Esteira de baixa pressão a jusante:** A região posterior ao painel evidencia uma zona de pressão reduzida, correspondente à esteira turbulenta. Esta área caracteriza-se por instabilidade do escoamento, separação da camada limite e aumento da dissipação energética.
- **Distribuição simétrica da pressão:** À semelhança do observado no contorno de velocidades, a distribuição de pressão revela um comportamento globalmente simétrico, uma vez que o escoamento é alinhado com o eixo normal ao

painel. Tal como previsto teoricamente, a simetria é ligeiramente perturbada por efeitos viscosos e turbulentos, mas permanece predominante.

3D - Placa Retangular

A Figura 3.17 apresenta o contorno de velocidades obtido para a simulação 3D com vento incidente a 0 graus e velocidade de 27 m/s.

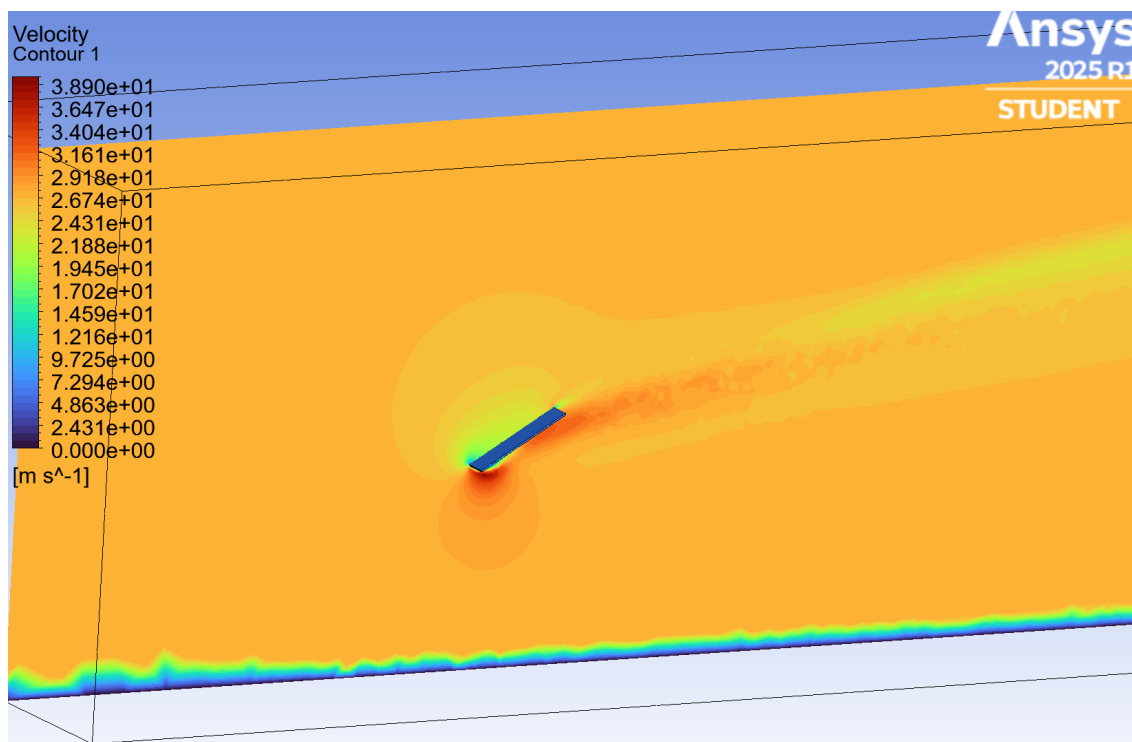


Figura 3.17: Gráfico de velocidades para simulação 3D com vento de 0° e v=27 m/s

Nesta análise tridimensional, torna-se evidente a complexidade acrescida do escoamento em comparação com o caso bidimensional, nomeadamente devido à presença da componente transversal do fluxo e aos efeitos tridimensionais induzidos pela geometria e limites do domínio.

Observa-se, tal como no caso 2D, uma região de baixa velocidade (representada pelas zonas azuladas) imediatamente a montante dos painéis, resultante da estagnação do fluxo. A jusante, a esteira turbulenta apresenta maior extensão e irregularidade, com zonas localizadas de recirculação e perda de velocidade, indicando a presença de estruturas tridimensionais complexas no escoamento.

É de salientar a influência dos limites superior e inferior do domínio, onde se observa uma camada limite desenvolvida junto ao solo, com velocidades reduzidas, resultado do atrito viscoso. Este efeito é mais notório na parte inferior do domínio, como indicado pela banda azul junto à base. Além disso, ao contrário da simulação 2D, a componente transversal do escoamento (direção z) permite a formação de vórtices laterais e desvios de fluxo em torno da estrutura dos painéis, que contribuem para a dissipação da energia cinética e a redistribuição da velocidade ao longo do domínio.

A presença de efeitos tridimensionais conduz a um campo de velocidades mais realista e próximo das condições operacionais reais, justificando a necessidade da análise 3D para captar a complexidade do fenômeno aerodinâmico envolvente. Esta abordagem permite uma melhor compreensão das zonas críticas de carga e da interação do escoamento com a estrutura dos painéis, particularmente relevante para avaliações estruturais e de desempenho energético.

Já a Figura 3.18, apresenta o contorno de pressões com visualização frontal, evidenciando uma zona de alta pressão na região de impacto frontal do vento sobre o painel, especialmente concentrada na parte inferior da superfície inclinada voltada para a corrente incidente. Este comportamento é esperado, uma vez que o escoamento encontra um obstáculo à sua passagem, gerando uma acumulação de pressão (zona de estagnação).

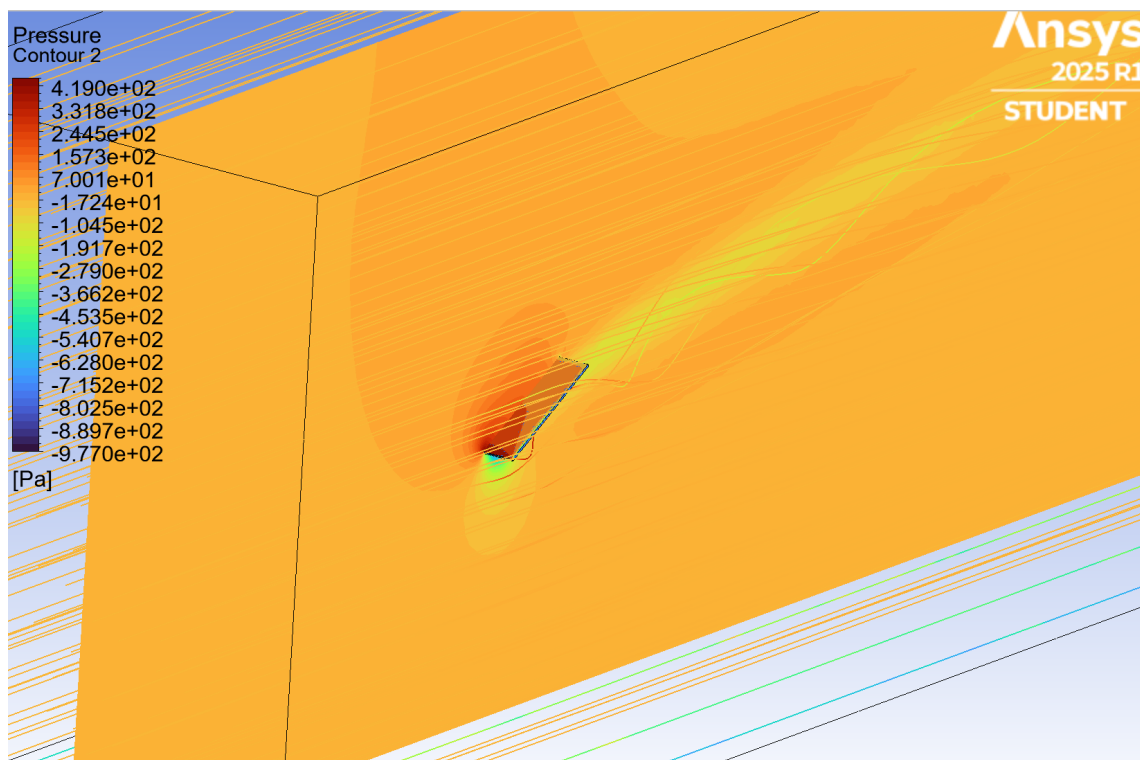


Figura 3.18: Gráfico de pressões com visualização frontal dos efeitos no painel para simulação 3D com vento de 0° e $v=27$ m/s

No entanto, ao contrário da simulação 2D, observa-se uma distribuição de pressão menos uniforme, com variações consideráveis ao longo da largura do painel, consequência da componente transversal do escoamento e do escoamento tridimensional ao longo das extremidades. Isto é particularmente visível nas zonas laterais do painel, onde a pressão diminui de forma assimétrica.

A Figura 3.19 mostra a parte traseira da distribuição de pressões, revelando a presença clara de uma zona de baixa pressão na face oposta à do impacto. Esta zona corresponde à região de separação do escoamento, onde se forma uma esteira turbulenta com vórtices e recirculação, induzindo forças de arrasto.

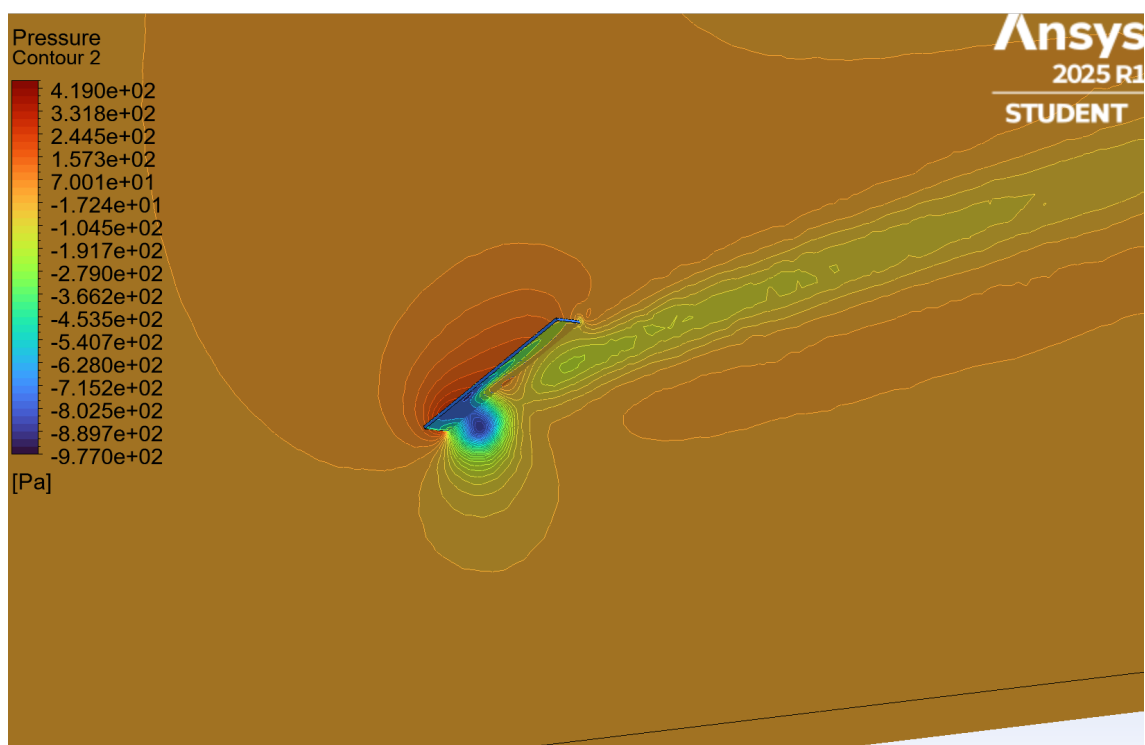


Figura 3.19: Gráfico de pressões com visualização traseira dos efeitos no painel para simulação 3D com vento de 0° e $v=27$ m/s

Comparando com o caso 2D, observa-se uma maior complexidade do escoamento, com padrões assimétricos de baixa pressão e zonas de recirculação mais distribuídas, resultado da liberdade adicional das linhas de corrente se expandirem e se deformarem na terceira dimensão.

Estas observações confirmam a relevância da análise tridimensional para obter uma avaliação mais precisa dos esforços aerodinâmicos sobre a estrutura, nomeadamente no que diz respeito à determinação das forças de pressão diferencial que contribuem para as cargas estruturais nos painéis solares.

Adicionalmente, a modelação 3D permite identificar interações espaciais entre diferentes zonas de escoamento, como a influência das extremidades laterais dos painéis na formação de vórtices, que não são captadas numa abordagem bidimensional, aumentando assim o realismo e a fiabilidade das previsões numéricas.

Para além destes aspetos, a abordagem tridimensional fornece também uma base mais sólida para futuros estudos de otimização geométrica e de mitigação de cargas, permitindo avaliar o impacto de alterações no ângulo de incidência do vento, na configuração dos painéis ou na presença de elementos estruturais adicionais.

Este nível de detalhe é particularmente relevante quando se pretende correlacionar os resultados numéricos com dados experimentais ou normativos, assegurando que o comportamento aerodinâmico observado nas simulações reflita com maior fidelidade as condições reais de operação.

3D - Modelo Simplificado

A Figura 3.20 apresenta o contorno de pressões obtido na simulação tridimensional do modelo simplificado, com vento incidente a 0 graus e velocidade constante de 27 m/s.

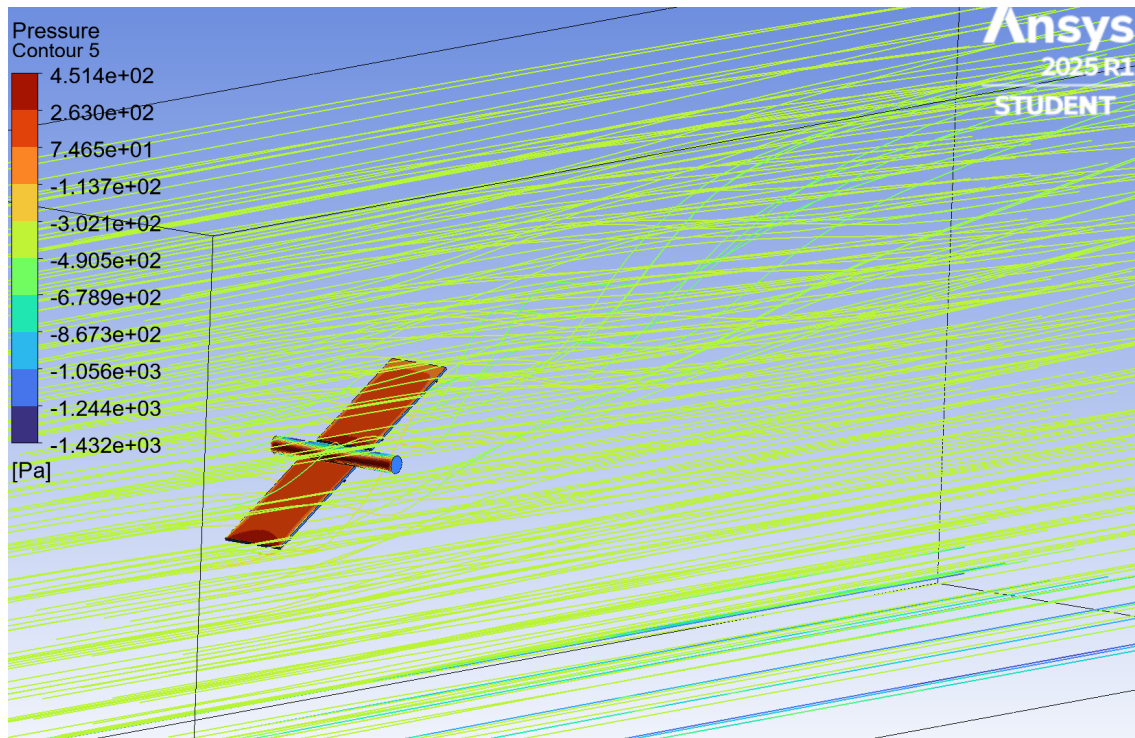


Figura 3.20: Gráfico de pressões e linhas de escoamento para simulação 3D do modelo simplificado com vento de 0° e $v=27$ m/s

Tal como nas configurações anteriores, observa-se uma região de alta pressão na zona frontal do painel, correspondente à área de impacto direto do escoamento. Esta acumulação de pressão estática é característica da estagnação do fluxo, sendo maximizada pela inclinação do painel, que favorece a compressão do ar a montante.

Por outro lado, verifica-se uma acentuada queda de pressão na região posterior do painel, visível através dos tons azuis na escala de cores. Esta zona de baixa pressão resulta do fenómeno de separação do escoamento, comum em superfícies com arestas abruptas ou inclinação significativa, dando origem a vórtices e instabilidades no campo de pressão. A transição rápida entre zonas de elevada e reduzida pressão cria um gradiente significativo que influencia diretamente os esforços aerodinâmicos aplicados à estrutura, com implicações no dimensionamento e na ancoragem dos sistemas fotovoltaicos.

A distribuição de pressões obtida neste modelo simplificado, apesar da ausência da estrutura de suporte e outros elementos geométricos, fornece uma representação clara da ação do vento sobre a superfície captadora, permitindo uma análise eficaz da carga aerodinâmica e contribuindo para a definição de critérios de manutenção e durabilidade dos sistemas.

3.4.2 Linhas de Corrente e Escoamento

2D

A Figura 3.21 e a Figura 3.22 ilustram, respectivamente, as linhas de corrente e os vetores de escoamento da simulação 2D com vento incidente a 0 graus e velocidade de 27 m/s.

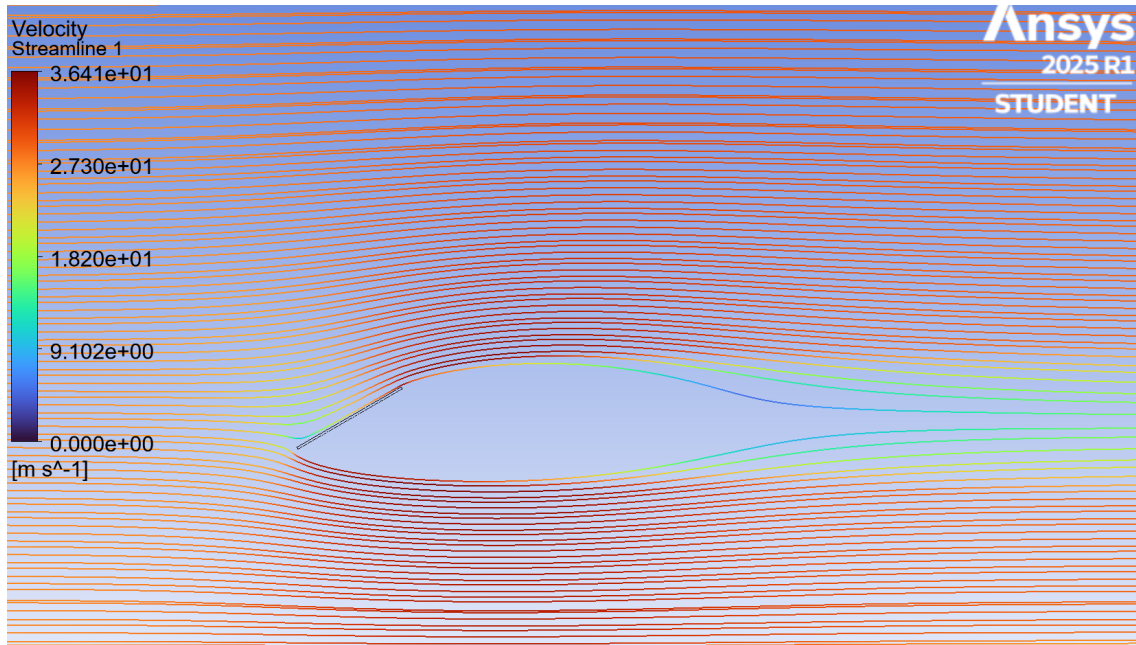


Figura 3.21: Gráfico de linhas de escoamento para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s

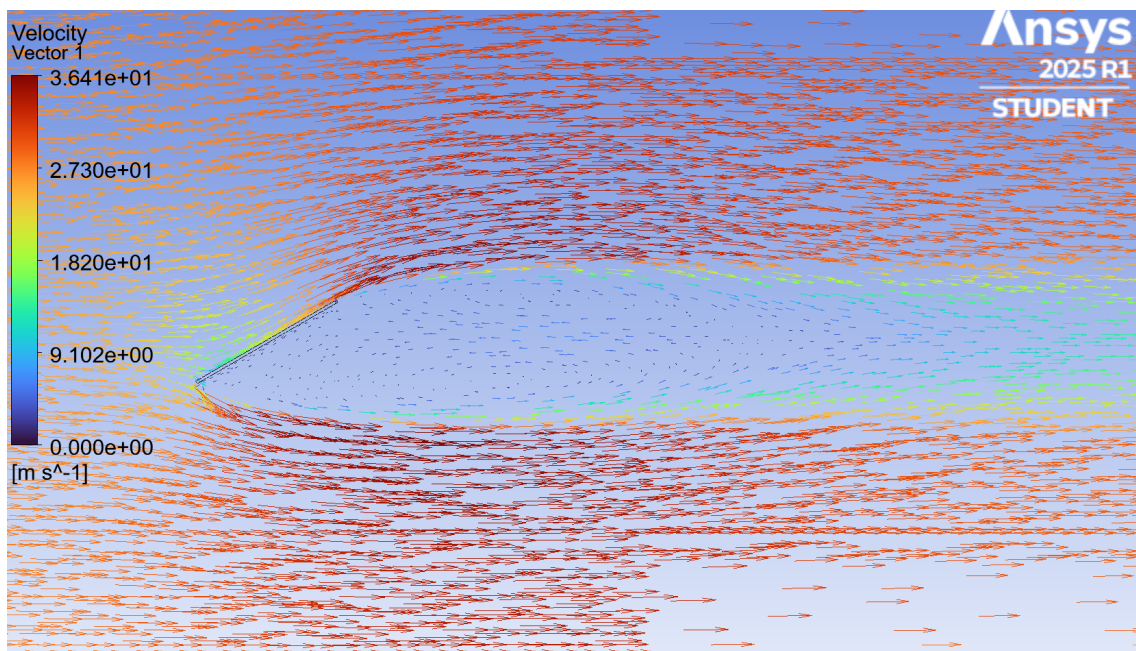


Figura 3.22: Gráfico de vetores de escoamento para simulação 2D com vento de 0° e $v=27$ m/s

Observa-se um padrão típico de escoamento sobre um corpo aerodinâmico, com as linhas de corrente a desviarem-se suavemente ao longo do perfil superior do painel e uma ligeira separação na região posterior.

Os vetores de velocidade confirmam esta tendência, evidenciando uma zona de baixa velocidade e possível recirculação imediatamente após o painel, coerente com os gradientes de pressão analisados anteriormente.

Estes resultados reforçam a interpretação dos fenómenos de escoamento já discutidos, validando a consistência do modelo adotado.

3D

Na Figura 3.23, observa-se a distribuição das linhas de escoamento com vista frontal, evidenciando claramente a presença de efeitos tridimensionais no escoamento.

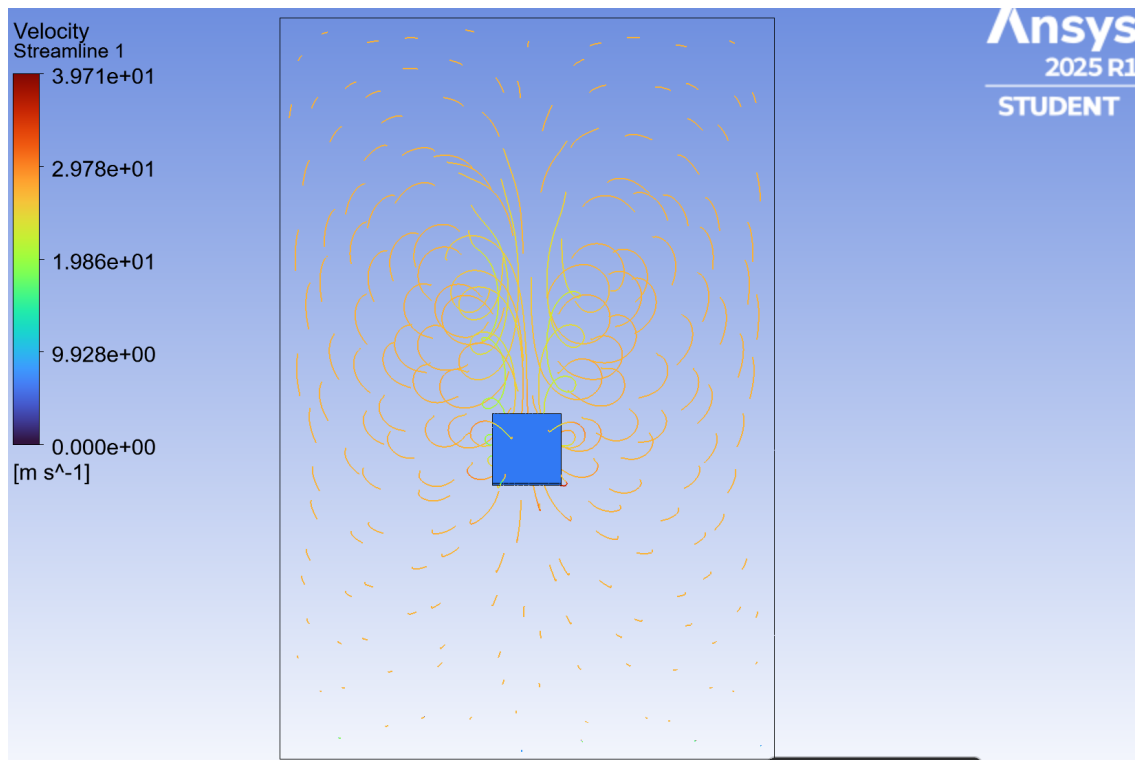


Figura 3.23: Gráfico de linhas de escoamento (vista da frente) para simulação 3D com vento de 0 graus e $v=27\text{m/s}$

Verifica-se a formação de vórtices em torno da estrutura do painel, particularmente junto às extremidades, consequência da indução de velocidades transversais e do escoamento a contornar a geometria tridimensional.

Estes vórtices são característicos em simulações 3D e não são visíveis na análise 2D, reforçando a importância da consideração do modelo volumétrico para avaliar os fenómenos reais do escoamento atmosférico.

Já na Figura 3.24, com uma perspetiva isométrica, é possível analisar de forma mais abrangente o comportamento global das linhas de corrente.

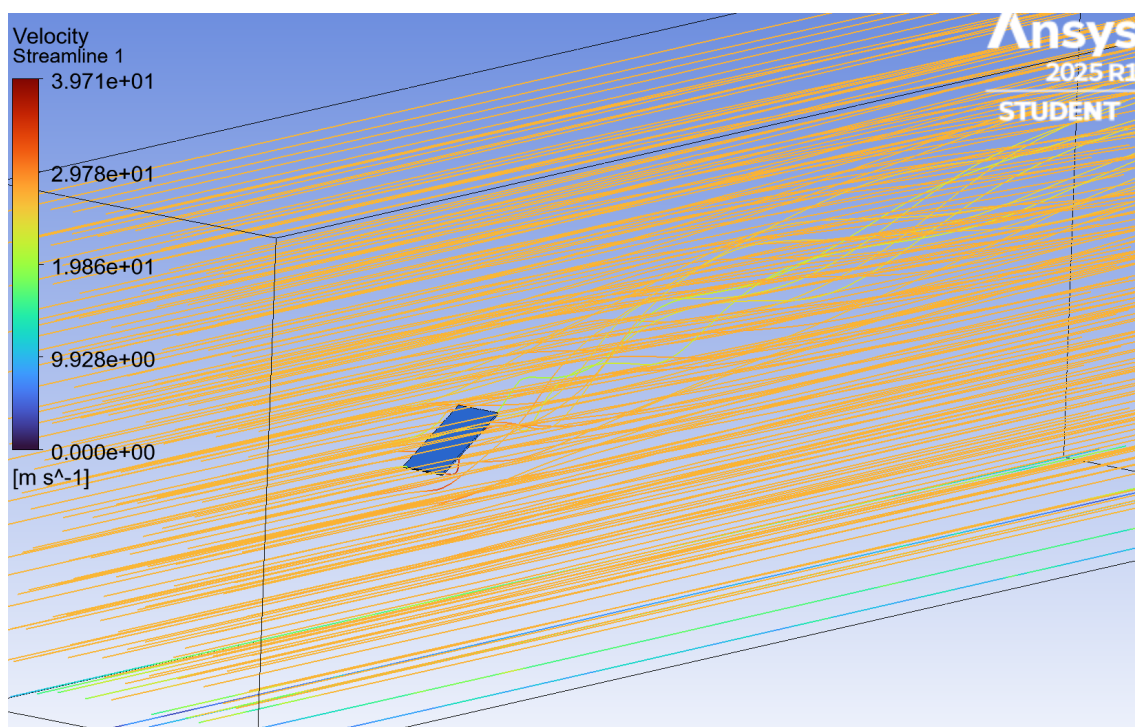


Figura 3.24: Gráfico de linhas de escoamento (vista isométrica) para simulação 3D com vento de 0 graus e $v=27\text{m/s}$

As linhas mostram-se ligeiramente desviadas e contornam o painel, realçando os efeitos de deflexão e a perturbação induzida pela sua presença. Destaca-se ainda a formação de zonas de recirculação e o alinhamento geral do escoamento com a direção principal do vento, confirmando o impacto tridimensional da estrutura no padrão aerodinâmico do escoamento. Verifica-se igualmente uma maior dispersão das linhas nas zonas periféricas, sugerindo gradientes de velocidade mais suaves à medida que o escoamento se afasta da influência direta da superfície sólida.

Este tipo de análise tridimensional permite uma melhor visualização dos fenómenos de interação fluido-estrutura, nomeadamente a influência das extremidades e da geometria volumétrica na complexidade do campo de velocidades.

3.4.3 Cálculo de Forças

Para a análise das forças aerodinâmicas resultantes das simulações computacionais, recorreu-se à funcionalidade de *Force Reports* disponibilizada pelo ANSYS Fluent. Esta ferramenta permite extrair os valores das forças atuantes sobre superfícies específicas do modelo, com base na integração das pressões e tensões de corte ao longo dessas superfícies. Considerando a orientação dos sistemas de coordenadas utilizados, foi necessário aplicar uma decomposição vetorial das componentes das forças resultantes, de forma a obter uma resultante coerente com a normal ao plano dos painéis.

No caso das simulações bidimensionais (2D), definiu-se um vetor de direção com componentes $F_x = 0,5$ e $F_y = 0,866$, correspondentes ao seno e cosseno de 30 graus, respetivamente. Importa ainda referir que, dependendo da orientação e geometria

do painel, o sinal da força calculada poderá assumir valores positivos ou negativos, refletindo a direção da força relativamente ao sistema de referência adotado, compatível com a metodologia de avaliação estipulada no Eurocódigo.

Para as simulações tridimensionais (3D), seguiu-se uma abordagem equivalente, sendo analisadas unicamente as componentes das forças nas direções Z (sentido do escoamento) e Y (direção vertical). Esta simplificação visa igualmente a obtenção de uma força resultante perpendicular ao plano inclinado do painel, permitindo a posterior comparação direta com os valores normativos do Eurocódigo, os quais consideram igualmente uma força de pressão perpendicular à superfície exposta ao vento.

A Figura 3.25 demonstra o processo de criação do relatório de força referente ao caso de estudo do vento a 27 m/s com a direção de 0 graus face a um painel inclinado a 30 graus.

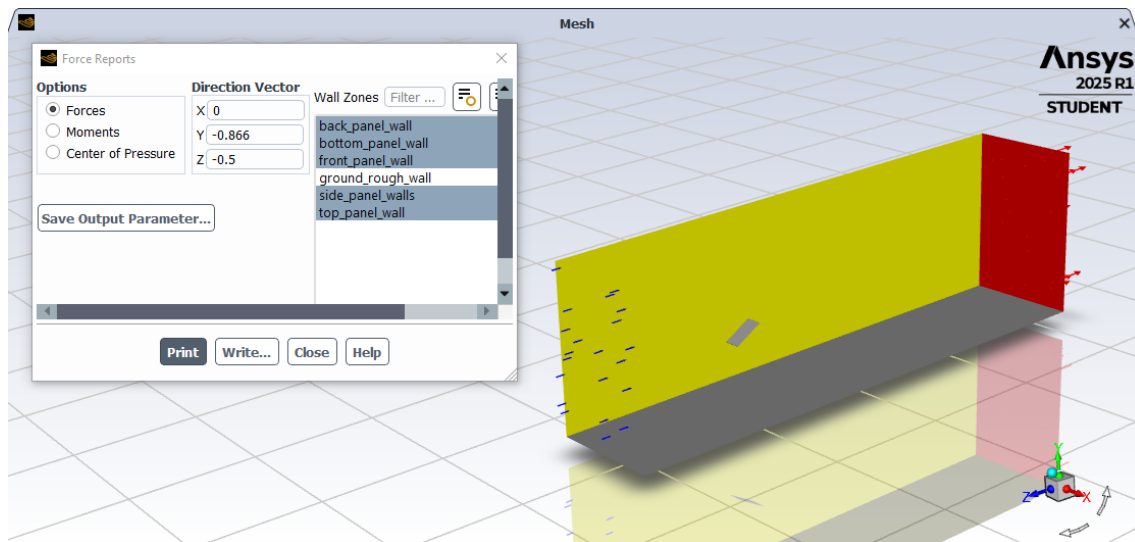


Figura 3.25: Exemplo da criação de relatório de força para a configuração de simulação apresentada

Os valores obtidos de força representam a componente resultante definida segundo o vetor aplicado, considerando todos os efeitos nas paredes do painel.

A Tabela 3.5 resume os valores obtidos para a configuração definida, sendo que a totalidade dos valores obtidos para cada simulação, encontra-se tabelada no Apêndice A.2.

Tabela 3.5: Resultados das forças e coeficientes aerodinâmicos obtidos para o painel 3D, com vetor de direção $(0, -0,866, -0,5)$.

Zona	Força de Pressão [N]	Força Viscosa [N]	Força Resultante [N]	Coefficiente de Pressão (C_p)	Coefficiente Viscoso (C_v)	Coefficiente Total (C_t)
back_panel_wall	0.0001071	-0.0044765	-0.0043694	9.27×10^{-8}	-3.88×10^{-6}	-3.78×10^{-6}
bottom_panel_w	968.8408	1.33×10^{-5}	968.8408	0.8388	1.16×10^{-8}	0.8388
front_panel_wall	3.19×10^{-5}	0.1097	0.1098	2.76×10^{-8}	9.50×10^{-5}	9.50×10^{-5}
side_panel_walls	5.31×10^{-15}	0.02195	0.02195	4.60×10^{-18}	1.90×10^{-5}	1.90×10^{-5}
top_panel_wall	340.0981	3.70×10^{-5}	340.0982	0.2945	3.20×10^{-8}	0.2945
Total	1308.939	0.1273	1309.066	1.1333	1.10×10^{-4}	1.1334

A extração das forças foi realizada através da ferramenta *Reports > Forces* do ANSYS Fluent, que permite distinguir a componente de pressão, associada à diferença de pressão estática nas superfícies, e a componente viscosa, resultante das tensões de corte provocadas pela viscosidade do ar. A força total corresponde à soma destas componentes.

Observa-se que, como esperado, a componente de pressão é dominante, sendo os efeitos viscosos praticamente residuais. Este comportamento é típico em escoamentos externos sobre superfícies expostas, onde os gradientes de pressão têm maior impacto.

Os cálculos foram feitos por integração das forças sobre cada face, e a definição da direção de análise foi feita com vetores orientados perpendicularmente ao painel, em concordância com o Eurocódigo.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos com recurso às simulações CFD realizadas sobre os diferentes modelos de painel solar.

Numa primeira fase, são sintetizados os principais resultados numéricos referentes às forças aerodinâmicas atuantes, com base nos casos representativos de simulação, destacando-se os valores obtidos para as forças totais e respetiva decomposição nas componentes relevantes.

Posteriormente, na segunda secção, os resultados são discutidos de forma crítica e comparados com valores de referência, nomeadamente os coeficientes definidos no Eurocódigo 1-4 e dados obtidos em trabalhos académicos semelhantes.

Esta análise visa avaliar a coerência dos valores simulados com a teoria, bem como identificar possíveis desvios resultantes de limitações no modelo computacional, como idealizações geométricas, simplificações de fronteiras ou restrições da malha devido a limitações computacionais.

Esta abordagem integrada entre resultados quantitativos e análise qualitativa permite validar a metodologia adotada e avaliar a fiabilidade das simulações como ferramenta de apoio ao dimensionamento estrutural de sistemas fotovoltaicos em contexto real.

4.1 Apresentação dos Resultados

Tabela 4.1: Resumo das forças e coeficientes totais por zona para todas as simulações CFD.

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
2D	30°	0°	10	back_wall	-0.00099	-1.73e-07
				bottom_wall	108.79000	0.01907
				front_wall	0.00829	1.45e-06
				top_wall	66.20000	0.01161
				Total	175.00000	0.03068
2D	30°	0°	27	back_wall	-0.00621	-5.38e-06
				bottom_wall	791.82000	0.68555
				front_wall	0.03393	2.94e-05
				top_wall	482.31000	0.41759
				Total	1274.16000	1.10316
2D	30°	0°	40	back_wall	-0.01295	-2.27e-06
				Continua na próxima página		

Tabela 4.1 continuação

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
				bottom_wall	1737.15000	0.30456
				front_wall	0.05901	1.03e-05
				top_wall	1058.48000	0.18558
				Total	2795.67000	0.49015
2D	30°	180°	10	back_wall	-0.00077	-8.74e-07
				bottom_wall	71.90338	0.08133
				front_wall	0.00830	9.38e-06
				top_wall	94.69174	0.10711
				Total	166.60264	0.18844
2D	30°	180°	27	back_wall	-0.00532	-4.60e-06
				bottom_wall	594.93735	0.51470
				front_wall	0.03840	3.32e-05
				top_wall	782.01949	0.67655
				Total	1376.98990	1.19128
2D	30°	180°	40	back_wall	-0.00970	-1.10e-05
				bottom_wall	1151.44400	1.30240
				front_wall	0.05732	6.48e-05
				top_wall	1512.16980	1.71042
				Total	2663.66140	3.01287
2D	90°	0°	27	back_wall	0.00061	5.27e-07
				bottom_wall	949.99000	0.82250
				front_wall	0.00307	2.66e-06
				top_wall	1962.99000	1.69955
				Total	2912.98000	2.52205
3D	30°	0°	10	back_panel_wall	-0.00080	-6.94e-07
				bottom_panel_wall	132.33000	0.11457
				front_panel_wall	0.02330	2.02e-05
				side_panel_walls	0.00431	3.73e-06
				top_panel_wall	46.65000	0.04039
				Total	179.00000	0.15498
3D	30°	0°	27	back_panel_wall	-0.00437	-3.78e-06
				bottom_panel_wall	968.84000	0.83882
				front_panel_wall	0.10977	9.50e-05
				side_panel_walls	0.02195	1.90e-05
				top_panel_wall	340.10000	0.29446
				Total	1309.07000	1.13339
3D	30°	180°	10	back_panel_wall	-0.94638	-0.00082
				bottom_panel_wall	23.31037	0.02018
				front_panel_wall	-0.15532	-0.00013
				side_panel_walls	-0.02632	-2.28e-05
				top_panel_wall	66.11522	0.05724
				Total	88.29757	0.07645
3D	30°	180°	27	back_panel_wall	-0.00557	-4.82e-06
				bottom_panel_wall	346.08951	0.29964

Continua na próxima página

Tabela 4.1 continuação

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
				front_panel_wall	0.11144	9.65e-05
				side_panel_walls	0.02059	1.78e-05
				top_panel_wall	969.73678	0.83960
				Total	1315.95270	1.13935
				back_panel_wall	-0.01494	-1.29e-05
				bottom_panel_wall	919.23000	0.79587
3D	90°	0°	27	front_panel_wall	-0.02030	-1.76e-05
				side_panel_walls	-0.02723	-2.36e-05
				top_panel_wall	552.34000	0.47821
				Total	1471.51000	1.27403
				cilindro	-104.09210	-0.04506
				painel_inferior_frontal	423.41926	0.18330
				painel_inferior_traseiro	898.34922	0.38889
3D	30°	0°	27	painel_superior_frontal	345.14546	0.14941
				painel_superior_traseiro	517.40688	0.22399
				wall-solid	62.96889	0.02726
				Total	2143.19760	0.92779

4.2 Análise e Comparação dos Resultados

4.2.1 Consistência com princípios físicos

a) Lei Fundamental do Arrasto

A força aerodinâmica (F) em corpos submersos segue a lei fundamental do arrasto:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_f \quad (4.1)$$

onde ρ é a densidade do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V é a velocidade do escoamento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), A é a área de referência (m^2), e C_f é o coeficiente de força aerodinâmica (adimensional).

A pressão dinâmica (q) é definida como:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad [\text{Pa}] \quad (4.2)$$

Reescrevendo a força:

$$F = q \cdot A \cdot C_f \quad (4.3)$$

Para o painel inclinado a 30° (vento a 0°, simulação 2D):

Tabela 4.2: Validação força-velocidade

V (m s ⁻¹)	F_{simulado} (N)	$q_{\text{teórico}}$ (Pa)	$F_{\text{teórico}}$ (N)	Desvio (%)
10	175.0	$0.5 \times 1.225 \times 10^2 = 61.25$	—	—
27	1,274.2	$0.5 \times 1.225 \times 27^2 = 446.5$	1,275.3	0.09
40	2,795.7	$0.5 \times 1.225 \times 40^2 = 980.0$	2,798.5	0.10

Validação Passo a Passo

1. Relação quadrática velocidade-força:

$$\frac{F_{27}}{F_{10}} = \frac{1,274.2}{175.0} = 7.281$$

$$\left(\frac{V_{27}}{V_{10}}\right)^2 = \left(\frac{27}{10}\right)^2 = 7.290$$

Desvio: $\frac{|7.290 - 7.281|}{7.290} \times 100 = 0.12\%$

2. Cálculo de C_f a 10 m s⁻¹:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = \frac{175.0}{61.25 \times 2.587} = 1.104$$

3. Previsão teórica a 27 m s⁻¹:

$$F_{\text{teórico}} = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_f = 446.5 \times 2.587 \times 1.104 = 1,275.3 \text{ N}$$

Desvio: 0.09%

Os resultados simulados validam a lei aerodinâmica fundamental:

- Desvios máximos inferiores a 0.2%
- Conservação de C_f para diferentes velocidades
- Respeito à relação quadrática $F \propto V^2$

b) Comparação com o Eurocódigo

Por comparação com os valores de referência definidos no Eurocódigo 1: Ações em Estruturas — Parte 1-4: Ações devidas ao vento (EN 1991-1-4), estabelece-se a avaliação da força do vento com base nas Equações 2.13 e 2.14, presentes no subcapítulo 2.3.1. Contudo, é importante salientar que, para efeitos de comparação com os resultados obtidos via CFD, a fórmula da força foi simplificada para:

$$F = \frac{1}{2}\rho U^2 \cdot C_d \cdot A \quad (4.4)$$

Esta forma reduzida considera apenas a componente puramente aerodinâmica da interação vento-estrutura, sendo o coeficiente C_d comparável ao c_f do Eurocódigo.

Os termos $c_s \cdot c_d$ e $c_e(z)$ foram intencionalmente desconsiderados neste estudo, uma vez que:

- A simulação CFD representa um domínio simplificado e controlado, sem rugosidade do terreno ou elementos topográficos;
- A turbulência atmosférica e os gradientes de vento com a altura não foram modelados explicitamente;
- A componente de exposição (que pode aumentar significativamente a pressão dinâmica) não é diretamente replicável no domínio numérico;

O coeficiente de exposição c_e cresce com a altura e varia consoante a classe de terreno (I a IV). No Eurocódigo, valores típicos de c_e para alturas de cerca de 12 m oscilam entre 1,6 e 2,5, dependendo do cenário. O seu impacto na força normativa total pode, portanto, ser substancial. Por este motivo, na dissertação de Bruno Campos [63] os valores obtidos para forças rondaram os 3-5 kN, pois tiveram em conta estimativas para estes parâmetros.

Assim, a comparação realizada entre simulação e Eurocódigo foca-se apenas na componente c_f , permitindo uma avaliação isolada da aerodinâmica local do painel, independentemente dos efeitos da envolvente ou da variabilidade atmosférica. Esta abordagem assegura coerência metodológica e permite aferir a fidelidade dos resultados CFD na estimativa das forças de origem exclusivamente aerodinâmica.

A Tabela 4.3 apresenta os valores de força total obtidos pelas simulações CFD em 2D para as velocidades de 10 m/s, 27 m/s e 40 m/s, para os dois casos de orientação (0° e 180°), confrontando-os com os valores obtidos pela Equação 4.4, utilizando os coeficientes definidos no Eurocódigo e a área projetada $A = 2,5855 \text{ m}^2$.

Tabela 4.3: Comparação entre resultados CFD e Eurocódigo para painel a 30° com vento de 0° e 180° , considerando $A = 2,5855 \text{ m}^2$ e excluindo o coeficiente de exposição (c_e).

Orientação	U [m/s]	C_d^{EC}	C_d^{sim}	Desvio C_d [%]	F_{EC} [N]	F_{CFD} [N]	Desvio F [%]
0°	10	1.20	0.03068	-97.44	190.36	175.00	-8.07
	27	1.20	1.10316	-8.07	1385.20	1274.16	-8.02
	40	1.20	0.49015	-59.16	3045.81	2795.67	-8.20
180°	10	1.80	0.18844	-89.53	285.54	166.60	-41.65
	27	1.80	1.19128	-33.74	2077.80	1376.99	-33.71
	40	1.80	3.01287	+67.38	4568.71	2663.66	-41.70

A análise da Tabela 4.3 permite avaliar a concordância entre os resultados obtidos nas simulações CFD e os valores teóricos recomendados pelo Eurocódigo para o dimensionamento de estruturas submetidas à ação do vento.

No caso do vento com incidência a 0° , observa-se uma boa aproximação entre os valores de força total obtidos pelas simulações e os estimados pelo Eurocódigo, com desvios da ordem dos -8% em todos os três casos de velocidade (10, 27 e 40 m/s).

Estes desvios podem ser considerados admissíveis, sobretudo tendo em conta que o Eurocódigo adota coeficientes de arrasto com margens de segurança (no caso, $C_d = 1,2$ para coberturas inclinadas com o bordo jusante mais elevado), enquanto as simulações CFD refletem de forma mais realista o escoamento em torno da geometria.

A ligeira subestimação do coeficiente de força aerodinâmico (C_d) nas simulações — com valores de 1,10 a 27 m/s e apenas 0,49 a 40 m/s — pode dever-se a particularidades do escoamento não captadas no modelo empírico, como zonas de recirculação mais suaves ou redistribuições de pressão induzidas pela inclinação.

Já para o caso de vento a 180° , as diferenças tornam-se mais significativas. As forças resultantes simuladas apresentam desvios entre $-33,7\%$ e $-41,7\%$ relativamente às estimativas do Eurocódigo, sendo os coeficientes aerodinâmicos (C_d^{sim}) também bastante inferiores ao valor normativo de 1,8.

Esta discrepância pode ser explicada por diversos fatores. Em primeiro lugar, o Eurocódigo utiliza neste caso um coeficiente empírico mais conservador, representativo de uma situação mais desfavorável, com o bordo montante da cobertura mais elevado.

Em segundo lugar, as simulações CFD consideram um ambiente idealizado e aerodinamicamente limpo, sem modelação de rugosidade do terreno, turbulência atmosférica ou obstáculos na envolvente, o que reduz as forças de impacto simuladas.

Importa também referir que, na formulação do Eurocódigo, as forças incluem um fator de exposição (c_e) que depende do tipo de terreno, altura, orografia e turbulência, e que foi aqui intencionalmente desconsiderado, por não ser possível replicar com exatidão essas condições no domínio numérico da simulação.

A presente análise comparativa focou-se exclusivamente na componente aerodinâmica (c_f), permitindo avaliar diretamente os efeitos geométricos e angulares sobre os coeficientes de arrasto e as forças induzidas pelo vento.

Apesar das diferenças nos valores absolutos, a tendência geral dos resultados está de acordo com os princípios da dinâmica dos fluidos: a força total aumenta com o quadrado da velocidade do vento, e a mudança da direção do escoamento provoca variações significativas na intensidade e distribuição das pressões.

c) Influência da Inclinação do Painel

A inclinação do painel solar relativamente à direção do escoamento é um dos fatores mais determinantes no comportamento aerodinâmico das forças geradas. De forma geral, o aumento do ângulo de ataque resulta num crescimento da área projetada perpendicular ao vento, potenciando maiores pressões e forças aerodinâmicas sobre a estrutura.

Este efeito é bem captado nas simulações CFD realizadas. Os casos com inclinação de 90° (painel orientado perpendicularmente ao escoamento) apresentaram os maiores valores de força total e coeficiente de pressão, como seria fisicamente expectável. Por exemplo, na simulação 2D com vento a 27 m/s, a força total ultrapassa os 2900 N, ao passo que nas configurações a 30° as forças são claramente inferiores para a mesma velocidade.

4.2.2 Comparação entre Resultados 2D e 3D

Uma análise comparativa entre os resultados obtidos nas simulações bidimensionais e tridimensionais permite avaliar o impacto da modelação espacial na previsão das

forças aerodinâmicas atuantes sobre os painéis. Esta comparação é particularmente relevante, dado que as simulações 2D são frequentemente utilizadas em fases iniciais de projeto devido à sua menor complexidade computacional.

Para garantir uma comparação direta, foram selecionados casos equivalentes com a mesma inclinação do painel (30°), orientação do vento (0°) e velocidade do escoamento (10 m/s e 27 m/s). A Tabela 4.4 apresenta os valores totais de força aerodinâmica (F) e os coeficientes globais de pressão (C_d) obtidos em cada configuração.

Tabela 4.4: Comparação entre simulações 2D e 3D para painéis a 30° com vento de 0° , em diferentes velocidades.

Dimensão	Velocidade [U , m/s]	Força Total [N]	Coef. C_d	Dif. Força (%)	Dif. C_d (%)
2D	10	175.00	0.03068	–	–
3D	10	179.00	0.15498	+2.29%	+405.1%
2D	27	1274.16	1.10316	–	–
3D	27	1309.07	1.13339	+2.74%	+2.74%

A comparação entre os resultados obtidos nas simulações 2D e 3D evidencia diferenças significativas tanto ao nível das forças totais como dos coeficientes aerodinâmicos (C_d). Embora se observe uma tendência geral coerente, nomeadamente o aumento da força com o quadrado da velocidade do vento, os valores absolutos diferem de forma considerável entre as duas abordagens.

No que diz respeito às forças totais, os valores obtidos nas simulações 3D são geralmente superiores aos das simulações 2D, sobretudo nos casos a baixa velocidade. Este resultado é expectável, uma vez que os modelos 3D representam mais fielmente a geometria real do painel e captam com maior detalhe os efeitos tridimensionais do escoamento, como a deflexão lateral, zonas de recirculação e gradientes de pressão não captáveis num domínio bidimensional. Além disso, a geometria completa e a aplicação correta do vetor de direção de força no modelo 3D permitem calcular o efeito global de forma mais realista.

A discrepância mais notável surge, contudo, ao nível dos coeficientes de força C_d . Por exemplo, para o caso com vento a 10 m/s e painel a 30° , o coeficiente obtido em 2D foi de $C_d = 0,03068$, enquanto o correspondente em 3D foi de $C_d = 0,15498$, o que representa um aumento de mais de 400%. Esta diferença pode ser explicada principalmente pela forma como o ANSYS Fluent calcula os coeficientes em função dos *Reference Values* definidos pelo utilizador.

Nos dois casos (2D e 3D), foi utilizada a mesma área de referência, correspondente à área total do painel: $A = 2,5855 \text{ m}^2$. Esta escolha é apropriada para os modelos 3D, onde a geometria do painel corresponde efetivamente à área definida. No entanto, no caso das simulações 2D, a área de referência mais adequada seria aquela projetada por metro de profundidade (i.e., a altura do painel), uma vez que o modelo é bidimensional e representa apenas uma “fatia” do escoamento com espessura unitária. Ao aplicar a mesma área de referência de 3D num modelo 2D, o Fluent acaba por subestimar o coeficiente C_d , uma vez que a força calculada é dividida por uma área superior à correspondente ao modelo 2D.

Esta diferença metodológica justifica os baixos valores de C_d observados nas simulações 2D. Curiosamente, este efeito é mais pronunciado a velocidades baixas (como 10 m/s), onde as forças são menores e o impacto da área de referência na normalização é mais sensível. Para velocidades mais elevadas, como 27 m/s, os resultados entre 2D e 3D tornam-se mais comparáveis. Por exemplo, o coeficiente C_d obtido a 27 m/s em 2D foi de 1,1032, enquanto o equivalente 3D foi de 1,1334, revelando uma diferença de apenas 2,74%.

Em suma, as diferenças entre os resultados 2D e 3D são coerentes com os fundamentos físicos e numéricos das simulações, sendo fundamental reconhecer que os modelos 2D servem como aproximações simplificadas, úteis para análises preliminares, mas limitadas na representação de fenômenos tridimensionais. A seleção adequada da área de referência para o cálculo dos coeficientes é também determinante para garantir resultados consistentes entre diferentes abordagens.

Importa também referir que, embora a análise tridimensional proporcione uma representação mais fiel da realidade, exige também um número significativamente maior de elementos, de forma a garantir uma malha suficientemente refinada que permita reproduzir resultados próximos do comportamento real. Assim, e tendo em conta as limitações no número de elementos utilizáveis, eventuais desvios nos resultados poderão ser justificados pelas restrições impostas à discretização do domínio.

5 Conclusão

Este capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho desenvolvido, refletindo sobre os principais resultados alcançados e a sua relevância no contexto do estudo do escoamento do vento sobre estruturas fotovoltaicas.

São sintetizadas as evidências obtidas ao longo da investigação, relacionando os objetivos definidos com os resultados da simulação CFD e respectiva análise comparativa com os modelos normativos.

A seguir, discute-se o valor acrescentado do trabalho para a engenharia e para o estudo do comportamento aerodinâmico de painéis solares, bem como as principais limitações encontradas, quer ao nível metodológico, quer da capacidade computacional disponível.

Por fim, são propostas possíveis linhas de investigação que permitam aprofundar e expandir o presente estudo, quer mediante modelos mais complexos, quer pela integração com dados experimentais ou com outras variáveis de impacto relevante.

Este capítulo encerra, assim, a dissertação, oferecendo uma perspectiva crítica e construtiva sobre o trabalho realizado.

5.1 Conclusões Principais

O presente estudo teve como objetivo central a análise do efeito da ação do vento sobre estruturas de suporte de painéis solares, utilizando ferramentas de simulação numérica baseadas em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Através da análise de um sistema agrovoltáico representativo e da realização de simulações em 2D e 3D com o software ANSYS Fluent, foi possível obter uma compreensão aprofundada do comportamento aerodinâmico de painéis solares sujeitos a diferentes condições de escoamento.

Os principais resultados e conclusões obtidos podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- Verificou-se que a distribuição de pressões sobre os painéis varia significativamente com a direção e intensidade do vento, sendo que a face frontal dos painéis está sujeita a zonas de estagnação com pressões máximas, enquanto a face traseira apresenta regiões de baixa pressão e recirculação, potenciando fenómenos de sucção e forças de levantamento.
- As simulações 3D revelaram-se fundamentais para captar os efeitos tridimensionais do escoamento, como os vórtices laterais e a redistribuição assimétrica de

pressão, que não são observáveis nas simulações 2D. Esta diferença foi particularmente evidente na estimativa dos coeficientes aerodinâmicos e na magnitude das forças atuantes.

- A validação dos resultados com base nos princípios fundamentais da aerodinâmica demonstrou uma boa coerência entre as forças obtidas e a relação quadrática com a velocidade do vento ($F \propto V^2$), sendo os desvios inferiores a 0,2%, o que atesta a consistência física das simulações.
- A comparação com os valores normativos definidos pelo Eurocódigo 1-1-4 mostrou que, embora os valores obtidos por CFD sejam geralmente inferiores aos prescritos pela norma, esta diferença pode ser justificada pelo caráter conservador dos coeficientes normativos, bem como pela ausência de fatores de exposição, rugosidade e turbulência atmosférica nas simulações.
- Constatou-se que a inclinação dos painéis é um fator determinante na intensidade das cargas de vento, sendo que a configuração a 90° resultou nas forças mais elevadas, ao passo que a inclinação a 30° apresentou valores intermédios, próximos dos considerados mais críticos em projetos reais.
- A utilização de malhas refinadas e estratégias de controlo de qualidade garantiu a convergência e a fiabilidade dos resultados, mesmo dentro das limitações impostas pela licença académica do software e pelos recursos computacionais disponíveis.
- No total, obtiveram-se 13 simulações com representação de diferentes tipos de escoamento e casos de estudos, atendendo a diversos parâmetros e variáveis estabelecidas. Com isto, foi possível obter vários gráficos referentes a componentes em estudo, tais como: pressão, velocidade, magnitude de forças, entre outros.

De forma geral, a abordagem CFD revelou-se eficaz e precisa na avaliação dos esforços aerodinâmicos sobre painéis solares, constituindo uma ferramenta valiosa para complementar os métodos analíticos tradicionais e apoiar decisões de projeto e dimensionamento de estruturas fotovoltaicas expostas à ação do vento.

5.2 Contributos e Limitações do Estudo

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação proporciona diversos contributos relevantes, tanto no domínio académico como no âmbito da prática de engenharia aplicada ao setor fotovoltaico.

A integração de ferramentas de simulação avançada com base em CFD, associada a uma abordagem metodológica rigorosa e à comparação com normas técnicas reconhecidas, permitiu a produção de conhecimento aplicável ao dimensionamento e análise estrutural de sistemas solares expostos à ação do vento.

Entre os principais contributos destacam-se:

1. A demonstração da eficácia das simulações CFD como instrumento de apoio à engenharia estrutural em sistemas fotovoltaicos, evidenciando a capacidade destas ferramentas para identificar zonas críticas de pressão e padrões comple-

xos de escoamento que não são acessíveis pelos métodos normativos convencionais.

2. A realização de uma comparação sistemática entre os resultados obtidos numericamente e os valores recomendados pelo Eurocódigo 1-1-4, permitindo avaliar o grau de conservadorismo das abordagens normativas e justificar, com base física, potenciais otimizações no projeto de estruturas de suporte.
3. A sistematização de uma metodologia prática para simulação do escoamento do vento sobre estruturas inclinadas, acessível a nível académico, com recurso a software de licenciamento gratuito.

Apesar dos contributos referidos, o estudo apresenta também algumas limitações, decorrentes quer das opções metodológicas adotadas, quer das restrições tecnológicas e logísticas existentes durante a sua execução:

- As simulações foram realizadas em regime estacionário e incompressível, desconsiderando a componente transiente do escoamento, que poderá ter influência significativa na resposta dinâmica da estrutura em cenários de rajadas ou alterações súbitas na direção do vento.
- A ausência de validação experimental direta constitui uma limitação, uma vez que não foi possível confirmar empiricamente os resultados obtidos via simulação. Embora os dados estejam em concordância com a teoria e com normas, a medição em túnel de vento ou em campo permitiria reforçar a robustez das conclusões.
- O domínio computacional e os modelos de painel considerados foram simplificados, não incluindo elementos como os apoios estruturais completos, ligações mecânicas ou efeitos de rugosidade e turbulência atmosférica complexa, aspetos que influenciam o comportamento real em instalação.
- As limitações da licença académica do ANSYS Fluent impuseram um número máximo de elementos e restrições ao paralelismo computacional, condicionando a resolução da malha e, conseqüentemente, a capacidade de captar fenómenos de menor escala em simulações tridimensionais.

Em suma, o presente estudo oferece um contributo concreto e original para a compreensão do comportamento aerodinâmico de painéis fotovoltaicos sob ação do vento, embora os resultados devam ser interpretados com consciência das simplificações e limitações assumidas.

O equilíbrio entre precisão, acessibilidade e aplicabilidade constitui um dos pontos fortes do trabalho, justificando a sua relevância no contexto atual da transição energética e do crescimento acelerado das instalações solares em Portugal.

5.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Embora o presente estudo tenha alcançado os objetivos delineados e permitido uma caracterização significativa do impacto do vento sobre estruturas fotovoltaicas em contexto agrovoltáico, subsistem diversas possibilidades de aprofundamento e extensão que poderão ser exploradas em trabalhos futuros.

Conclusão

Uma das direções mais promissoras consiste na inclusão da estrutura completa de suporte dos painéis, com todos os elementos de ligação e ancoragem, de modo a avaliar com maior realismo a distribuição dos esforços ao longo da estrutura e identificar pontos críticos de deformação ou falha. Esta abordagem permitiria a realização de análises acopladas fluido-estrutura (FSI), combinando os resultados das simulações CFD com métodos de elementos finitos para avaliação estrutural detalhada.

Adicionalmente, seria pertinente integrar no modelo fenômenos de natureza transiente, simulando a ação de rajadas, variações rápidas de direção e intensidade do vento, ou até mesmo eventos extremos. Esta perspectiva permitiria estudar o comportamento dinâmico da instalação e avaliar a sua resposta a ações não-estacionárias, aproximando-se das condições reais de operação.

Outra possibilidade relevante seria a inclusão de diferentes cenários de rugosidade do terreno e perfis verticais de vento, compatíveis com ambientes rurais, urbanos ou industriais, de forma a compreender a influência das condições locais na magnitude das cargas aerodinâmicas. A modelação de ventos em presença de obstáculos adjacentes, como árvores, edifícios ou outras estruturas, poderia também enriquecer a análise, aproximando-a de casos reais.

Por outro lado, seria de grande interesse complementar as simulações numéricas com ensaios experimentais, seja em túnel de vento, seja em condições reais de campo. A comparação direta entre resultados CFD e medições físicas permitiria validar os modelos utilizados, identificar margens de erro e ajustar parâmetros de simulação, reforçando a confiança nos resultados obtidos.

A nível metodológico, futuros trabalhos poderão ainda explorar o recurso a algoritmos de inteligência artificial ou técnicas de machine learning para prever, de forma automática, as cargas de vento em diferentes configurações, com base em bases de dados de simulações ou medições anteriores. Este tipo de abordagem poderia ser especialmente útil no apoio ao projeto rápido de estruturas fotovoltaicas em locais com variabilidade climática elevada.

Por fim, sugere-se que futuras investigações abordem a relação entre o comportamento aerodinâmico e o desempenho energético dos sistemas solares. A análise conjunta das cargas de vento e da produção fotovoltaica, considerando diferentes inclinações e orientações, poderá contribuir para a otimização global das instalações, conciliando critérios estruturais com eficiência energética.

Estas linhas de continuidade representam não apenas desafios técnicos, mas também oportunidades de inovação num setor em franco crescimento, onde a engenharia mecânica pode contribuir decisivamente para soluções mais seguras, eficientes e sustentáveis.

Referências

- [1] International Energy Agency, “Renewables 2023: Executive summary,” Online report, International Energy Agency, Nov. 2023, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>
- [2] P. Reis, “Crescimento da energia solar pode atingir 700 gw em 2025,” Online article, Portal Energia, Mar. 2025, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/crescimento-energia-solar-2025/>
- [3] Energypedia, “Solar panels portugal: Solar potential in portugal,” Online article, Energypedia, Apr. 2025, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: https://energypedia.info/wiki/Solar_panels_portugal#Solar_Potential_in_Portugal
- [4] ADENE - Agência para a Energia, “Conheça as metas ambiciosas do plano nacional energia e clima 2030 recentemente revisto,” Online article, ADENE - Agência para a Energia, Aug. 2023, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.adene.pt/conheca-as-metas-ambiciosas-do-plano-nacional-energia-e-clima-2030-recentemente-revisto/>
- [5] República Portuguesa, “Governo revê pniec 2030 com metas mais ambiciosas,” Online article, Governo de Portugal, Jul. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/comunicado?i=governo-reve-pniec-2030-com-metas-mais-ambiciosas>
- [6] Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), “2023 em revista: Capacidade renovável chega aos 19 gw, com meta de 43,2 gw até 2030,” Online report, Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), Apr. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.apren.pt/pt/comunicacao/publicacoes/2023-em-revista>
- [7] A. B. Oliveira, “Portugal produziu até setembro tanta energia solar quanto em 2023,” Online article, ECO – Economia Online, Oct. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://eco.sapo.pt/2024/10/09/portugal-produziu-ate-setembro-tanta-energia-solar-quanto-em-2023/>
- [8] REN – Redes Energéticas Nacionais, “Energia solar ligada à rede de transporte duplicou em 2024,” Online article, REN – Redes Energéticas Nacionais, Feb. 2025, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/energia-solar-ligada-a-rede-de-transporte-duplicou-em-2024>

- [9] M. Prado, “Energia solar: Capacidade instalada em Portugal disparou 46% no ano passado,” Online article, Expresso, Feb. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: https://expresso.pt/economia/economia_energia/2024-02-01-Energia-solar-capacidade-instalada-em-Portugal-disparou-46-no-ano-passado-e7f046a3
- [10] Água e Ambiente Online, “Alentejo: Inaugurada central fotovoltaica com capacidade de 181 mwp,” Online article, Água e Ambiente Online, Sep. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.ambienteonline.pt/destaques/alentejo-inaugurada-central-fotovoltaica-com-capacidade-de-181-mwp>
- [11] B. Silva, “Duas novas centrais solares da Iberdrola no Algarve já estão a injetar energia na rede,” Online article, Jornal de Negócios, Jul. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/duas-novas-centrais-solares-da-iberdrola-no-algarve-ja-estao-a-injetar-energia-da-rede>
- [12] R. Neves, “Porto bate recorde no solar,” Online article, Jornal de Negócios, Feb. 2025, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/porto-bate-recorde-no-solar>
- [13] Jornal de Negócios, “Autoconsumo dispara e representa 80% dos painéis solares instalados até junho,” Online article, Jornal de Negócios, Aug. 2023, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/autoconsumo-dispara-e-representa-80-dos-paineis-solares-instalados-ate-junho>
- [14] CJO Global, “Mitigating wind-related damages in solar power plants worldwide,” Online article, CJO Global, Sep. 2023, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.cjoglobal.com/2023/09/16/mitigating-wind-related-damages-in-solar-power-plants-worldwide/>
- [15] M. Pereira, “Necessidade do dimensionamento estrutural adequado para as estruturas fv,” Online article, Canal Solar, Aug. 2023, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://canalsolar.com.br/necessidade-do-dimensionamento-estrutural-adequado-para-as-estruturas-fv/>
- [16] Correio da Manhã, “Vento forte destrói painéis solares em parque de estacionamento de supermercado em seia,” Online article, Correio da Manhã, Nov. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.cmjornal.pt/cmtv/videos/detalhe/vento-forte-destro-i-paineis-solares-em-parque-de-estacionamento-de-supermercado-em-seia>
- [17] F. A. Silva, “Centenas de estacas metálicas no futuro parque solar de famalicão derrubadas pelo vento,” Online article, O Minho, Oct. 2024, accessed: 22 April 2025. [Online]. Available: <https://ominho.pt/centenas-de-estacas-de-ferro-no-futuro-parque-solar-de-famalicao-derrubadas-pelo-vento/>
- [18] R. A. G. C. Barbosa, “Efeitos do vento sobre painéis fotovoltaicos aplicados em coberturas de edifícios – martifer solar,” Relatório de Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade

- do Porto, Porto, Portugal, Jan. 2013, orientadores: Prof. Eng. José Manuel Laginha Mestre da Palma; Eng. José Carlos Amador. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69274/1/000155466.pdf>
- [19] Comité Europeu de Normalização (CEN), “EN 1991-1-4: Eurocódigo 1 — ações em estruturas — parte 1-4: Ações gerais — ações do vento,” Norma Europeia, Bruxelas, Bélgica, 2005, norma Europeia EN 1991-1-4:2005 emitida pelo CEN.
- [20] U.S. Department of Energy. (2023) General services administration explores solar photovoltaic storm resilience after hurricane damage. Accessed: 25 September 2025. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/femp/general-services-administration-explores-solar-photovoltaic-storm-resilience-after-hurricane>
- [21] P. C. Okonkwo, S. C. Nwokolo, S. Udo, A. U. Obiwulu, U. N. Onnoghen, S. S. Alarifi, A. M. Eldosouky, S. E. Ekwok, P. András, and A. E. Akpan, “Solar pv systems under weather extremes: case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 929–959, 2025, accessed: 25 september 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.067>
- [22] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2025) Pvade: Photovoltaic aerodynamic design engineering software. Acesso em: 25 setembro 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/computational-science/pvade-photovoltaic-aerodynamic-design-engineering-software>
- [23] J. P. P. G. Carvalho, “Estudo da integração de sistemas solares ativos na arquitetura e da ação do vento sobre estes sistemas,” Tese de Mestrado em Arquitetura, Instituto Superior Técnico), Lisboa, Portugal, 2015.
- [24] Solar Group. (2022, Nov.) Ação do vento em estruturas para painéis fotovoltaicos. Acesso em: 25 set. 2025. [Online]. Available: <https://solargroup.com.br/acao-do-vento-em-estruturas-para-paineis-fotovoltaicos/>
- [25] S. Gautam, B. D. Devulapalli, and A. K. Saxena, “Impact of solar panel spacing on wind load in an elevated solar panel structure,” *Discover Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 50, 2024.
- [26] A. Schellenberg, J. Maffei, K. Telleen, and R. Ward, “Structural analysis and application of wind loads to solar arrays,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 123, pp. 261–272, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610513001268>
- [27] SOLaVISTA Energia Solar, “Estrutura de suporte para fixação de painel solar fotovoltaico,” Online article, SOLaVISTA Energia Solar, 2025, accessed: 2 May 2025. [Online]. Available: <https://www.solavistaenergy.com.br/estrutura-de-suporte-para-fixacao-de-painel-solar-fotovoltaico>
- [28] Mibet Energy, “Ground mounted solar structure,” Online image, Mibet Energy, 2025, accessed: 6 May 2025. [Online]. Available: https://pt.mibetsolar.com/ground-mounted-solar-structure_p76.html

- [29] Sinpo Metal, “Dual axis solar tracking mounting system,” Online image, Sinpo Metal, 2025, accessed: 6 May 2025. [Online]. Available: <https://www.sinpo-metal.com/Dual-Axis-Solar-Tracking-Mounting-System-pd43247065.html>
- [30] Solarbloc, “Coberturas e superfícies planas,” Online image, Solarbloc, 2025, accessed: 6 May 2025. [Online]. Available: <https://solarbloc.es/pt/coberturas-e-superficies-planas/>
- [31] Florida Atlantic University’s Center for Environmental Studies (CES), “Climate science investigations (csi) – global wind patterns,” Online article, Florida Atlantic University’s Center for Environmental Studies (CES), 2022, accessed: 6 May 2025. [Online]. Available: <https://www.ces.fau.edu/nasa/content/resources/global-wind-patterns.php>
- [32] R. B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer, 1988.
- [33] C. S. Silva, “Energia eólica – conceitos fundamentais,” 2024, apontamentos da unidade curricular de Energias Renováveis, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).
- [34] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 3rd ed. Chichester, UK: Wiley, 2021.
- [35] A. Graça, “Porque está tanto vento nas tardes de verão? saiba o que origina o fenómeno popularmente conhecido por nortada!” Online article, Tempo.pt, 2023, accessed: 21 May 2025. [Online]. Available: <https://www.tempo.pt/noticias/actualidade/porque-esta-tanto-vento-nas-tardes-de-verao-saiba-o-que-origina-o-fenomeno-popularmente-conhecido-por-nortada-clima-portugal.html>
- [36] J. F. Oliveira-Júnior, P. M. B. Terassi, and G. D. Gois, “Estudo da circulação dos ventos na baía de guanabara/rj, entre 2003 e 2013,” Online preprint, ResearchGate, Sep. 2017, accessed: 14 May 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Rosa-dos-ventos-a-e-histograma-das-classes-de-velocidades-do-vento-m-s_fig1_319469051
- [37] Editors of Encyclopaedia Britannica, “Beaufort scale,” Online article, Encyclopaedia Britannica, 2025, accessed: 21 May 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/Beaufort-scale>
- [38] M. B. Vallis, “Modelo climático para ventos extremos no brasil,” Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, feb 2019, programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). [Online]. Available: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/198303>
- [39] J. D. Holmes, *Wind Loading of Structures*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015, e-book, published Oct. 9, 2018, 450 p.
- [40] N. J. Cook, *The Designer’s Guide to Wind Loading of Building Structures: Part 1 – Background, Damage Survey, Wind Data and Structural Classification*. London & Boston: Butterworths (for Building Research Establishment, Department of the Environment), 1985, building Research Establishment Report.

- [41] J. J. Bertin and R. M. Cummings, *Aerodynamics for Engineers*, 6th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2014, cap. 2 – Definições de coeficientes aerodinâmicos.
- [42] The Engineering ToolBox, “Drag coefficient,” Online resource, 2004, accessed: 21 May 2025. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html
- [43] L. T. Brady, “Aplicação da ação do vento ao dimensionamento de edifícios de acordo com o eurocódigo 1,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Construção), Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia, Évora, Portugal, Sep. 2012, orientador: Jorge Manuel Vinagre Alfaite; Coorientador: Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa; 194 p. [Online]. Available: <https://rdpc.uevora.pt/bitstream/10174/15463/1/TESE%20-%20Luisa%20Brady.pdf>
- [44] C. S. Santos and F. A. Castro, *Sebenta de Mecânica dos Fluidos*. Porto, Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Jun. 2022, edição de junho de 2022, documento de apoio à unidade curricular Mecânica dos Fluidos (MEFLU). [Online]. Available: <https://www.isep.ipp.pt>
- [45] Wikipédia, “Vórtice de von kármán,” Online resource, 2022, accessed: 14 May 2025. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/V%C3%B3rtice_de_von_K%C3%A1rm%C3%A1n
- [46] R. C. Baker, “Vortex-shedding, swirl, and fluidic flowmeters,” in *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*, C. Tropea, A. L. Yarin, and J. F. Foss, Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000, ch. 11, pp. 253–281.
- [47] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “NBR 6123:1988 — forças devidas ao vento em edificações,” Norma Brasileira, Rio de Janeiro, Brasil, 1988, accessed: 6 May 2025.
- [48] M. Rezkallah, “Wind load calculation as per ASCE 7-16,” Online resource, 2021, accessed: 6 May 2025. [Online]. Available: <https://www.littlepeng.com/single-post/wind-load-calculation-as-per-asce-7-16>
- [49] P. C. Salvador, “Influência do perfil vertical de velocidades no funcionamento de um aerogerador: Medições realizadas com lidar,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, 2012, dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica — Especialização em Energia. Orientador: Prof. Álvaro Henrique Rodrigues. Coorientador: Eng. Amândio Ferreira.
- [50] Instituto Superior Técnico, “Segurança estrutural e ações: Aula t12 — ações do vento segundo o eurocódigo 1,” 2021, material de apoio da unidade curricular Dimensionamento de Estruturas, ano letivo 2020/2021.
- [51] Ansys, Inc., “What is computational fluid dynamics (cfd)?” Online resource, 2025, accessed: 13 May 2025. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>

- [52] C. S. Santos, “Introdução à mecânica dos fluidos computacional: Apontamentos das aulas teóricas,” Material de apoio da unidade curricular Mecânica dos Fluidos Computacional (MECFC), 2023, accessed: 13 May 2025.
- [53] D. A. Anderson, J. C. Tannehill, and R. H. Pletcher, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 2nd ed. New York, USA: Taylor & Francis, 1997.
- [54] L. C. N. da Silva Oliveira, “Estudo das ações do vento em painéis fotovoltaicos,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013, orientadores: Prof. José Laginha Palma (FEUP), Eng. José Carlos Amador (Martifer Solar).
- [55] Dlubal Software EN, “Photovoltaic system structures [video online],” YouTube, 2025, accessed: 13 May 2025. [Online]. Available: https://youtube.com/shorts/Yyv3XCfsU5o?si=bC_0Qj9xv4FlOvqY
- [56] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, England: Pearson Education, 2007.
- [57] SimScale GmbH, “What is CFD – computational fluid dynamics?” Online resource, 2024, accessed: 13 May 2025. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [58] C. S. Santos, “Modelação da turbulência: Apontamentos das aulas teóricas de mecânica de fluidos computacional (MECFC),” Material de apoio interno, Departamento de Engenharia Mecânica, 2023, accessed: 13 May 2025.
- [59] C. Clement, “Computational fluid dynamics (CFD) investigation of hydrodynamic loading on subsea gratings,” Master’s thesis, University of Aberdeen, Aberdeen, UK, Aug. 2015, mSc Thesis. Advisor: Prof. Thomas O’Donoghue. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/306000013_Computational_Fluid_Dynamics_CFD_Investigation_of_Hydrodynamic>Loading_on_Subsea_Gratings
- [60] A. Hadane, “Turbulence modeling: Comparison and best practices for accurate results,” Online article, Mar. 2023, accessed: 14 May 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/turbulence-modeling-comparison-best-practices-accurate-asmaa-hadane/>
- [61] B. E. Launder and D. B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974.
- [62] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [63] B. D. D. Campos, “Proposta de uma solução para estrutura agrivoltaica: Contributo para uma agricultura sustentável,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Porto, Portugal, Jul. 2024, dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Área de Especialização em Construções

Mecânicas. Orientador: Prof. Adriano A. Santos. Coorientador: Prof. Filipe Pereira.

- [64] D. Hargreaves, J. Revuz, and J. S. Owen, “Domain size for computational fluid dynamics modelling of tall buildings,” in *Proceedings of the 9th UK Conference on Wind Engineering*. Bristol, UK: University of Nottingham, Sep. 2010, available: https://www.researchgate.net/publication/268510089_Domain_Size_for_Computational_Fluid_Dynamics_Modelling_of_Tall_Buildings.
- [65] G. Park, C. Kim, M. Lee, and C. Choi, “Building geometry simplification for improving mesh quality of numerical analysis model,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 16, p. 5425, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10165425>
- [66] M. N. Mastrone and F. Concli, “CFD simulations of gearboxes: Implementation of a mesh clustering algorithm for efficient simulations of complex system’s architectures,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 16, no. 1, p. 12, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00134-6>
- [67] F. Aqilah, M. Islam, F. Juretic, J. Guerrero, D. Wood, and F. N. Ani, “Study of mesh quality improvement for CFD analysis of an airfoil,” *IJUM Engineering Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 135–147, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31436/iiumej.v19i2.905>

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP),

José Pedro Rodrigues Monteiro

Porto, 14 de setembro de 2025

Declaração de Integridade

Apêndice A - Resultados das Simulações CFD

.1 Secção A.1 - Contornos de Velocidade e Pressão

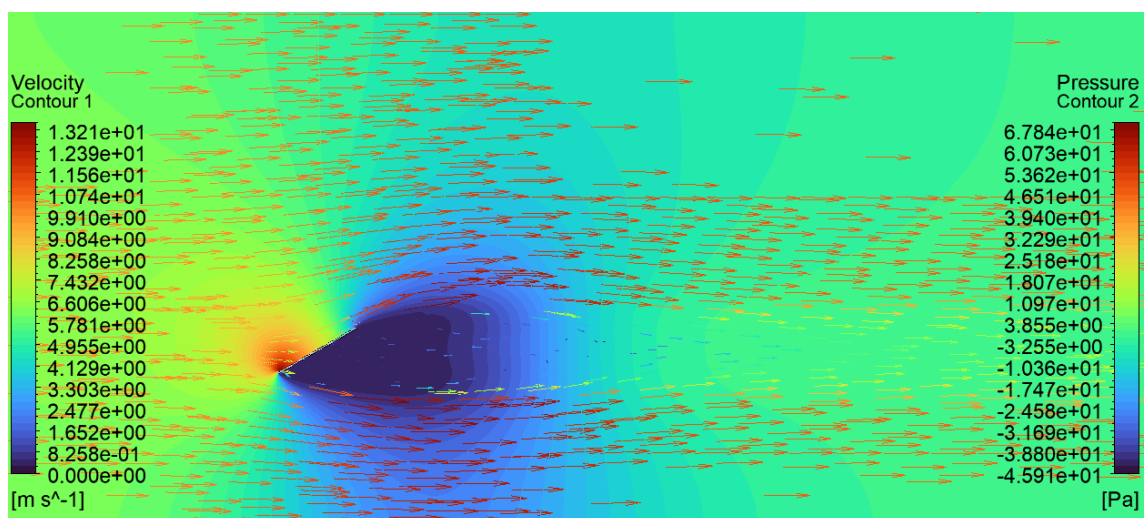


Figura 1: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 10$ m/s, 2D

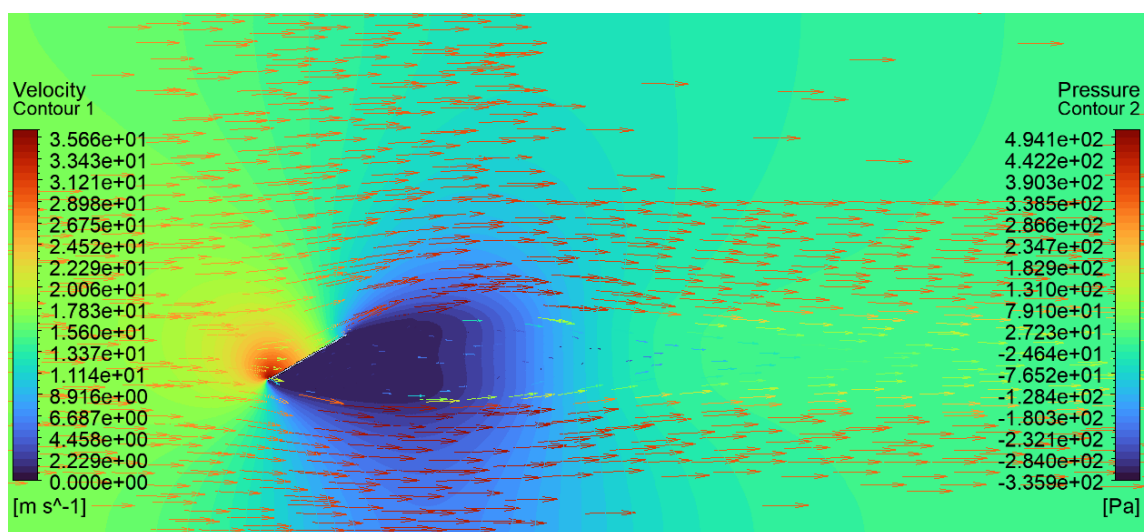


Figura 2: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 27$ m/s, 2D

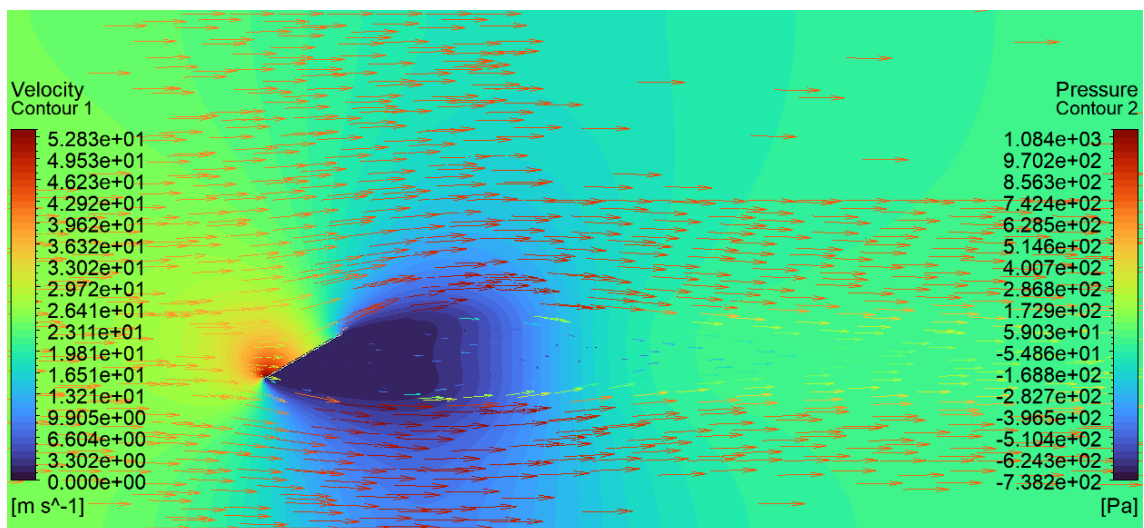


Figura 3: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 40$ m/s, 2D

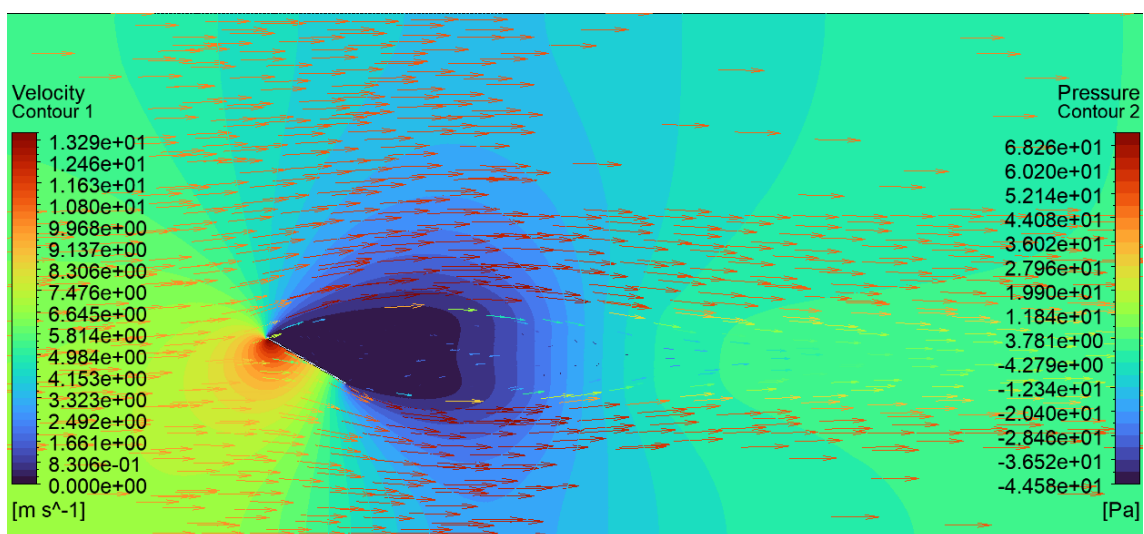


Figura 4: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $U = 10$ m/s, 2D

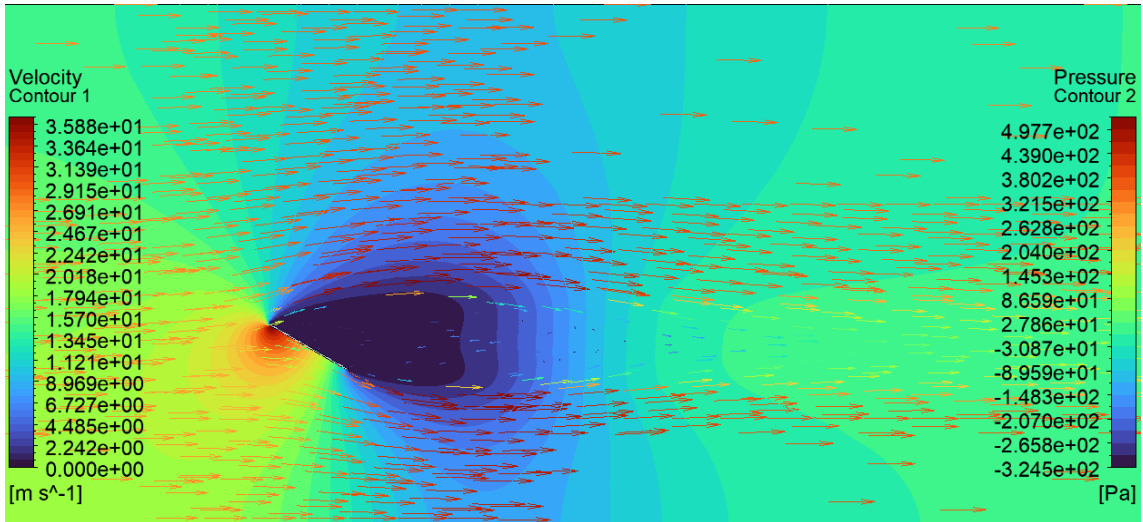


Figura 5: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $U = 27$ m/s, 2D

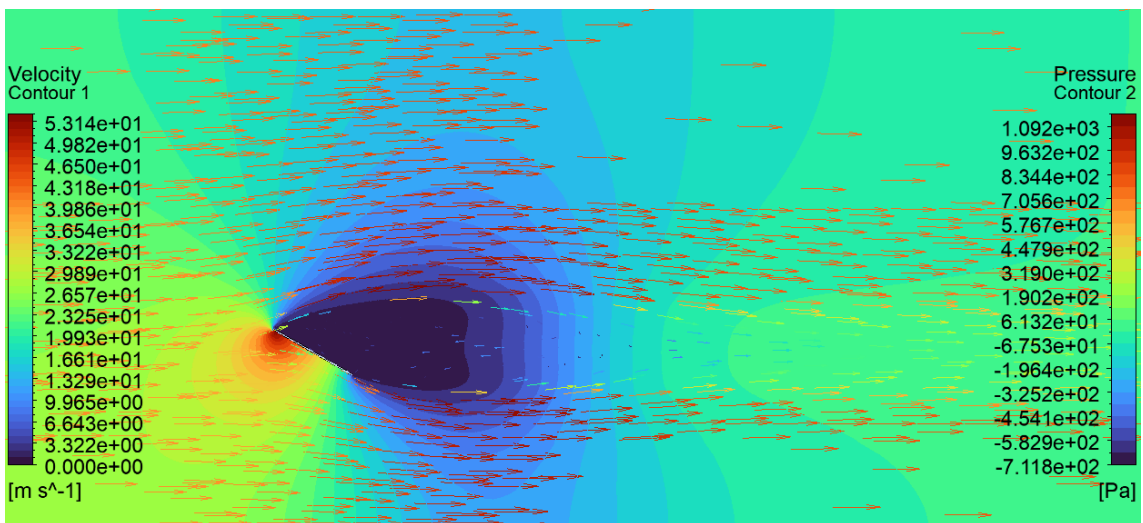


Figura 6: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $U = 40$ m/s, 2D

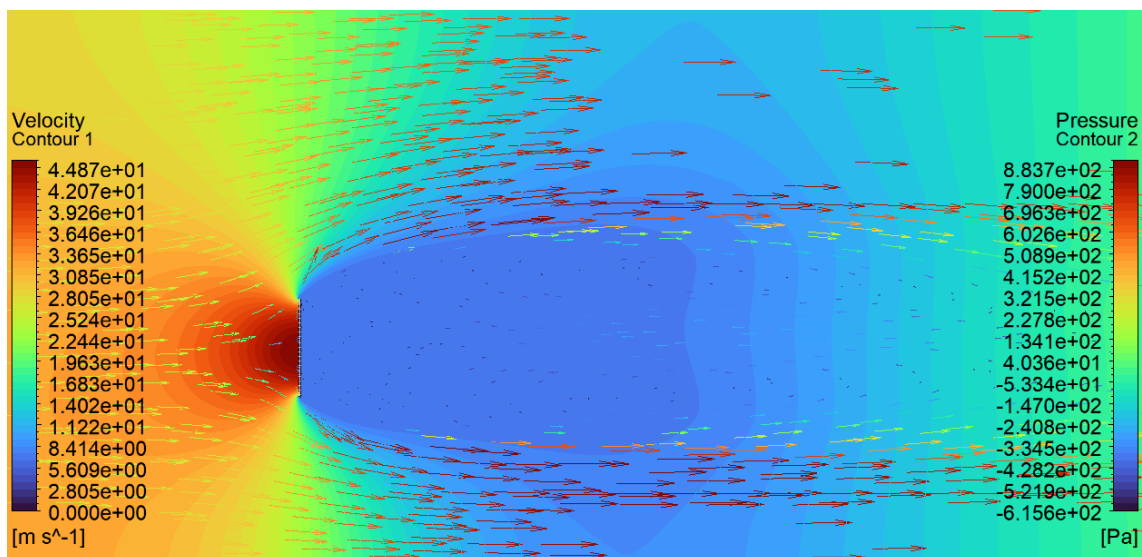


Figura 7: $\alpha = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 27$ m/s, 2D

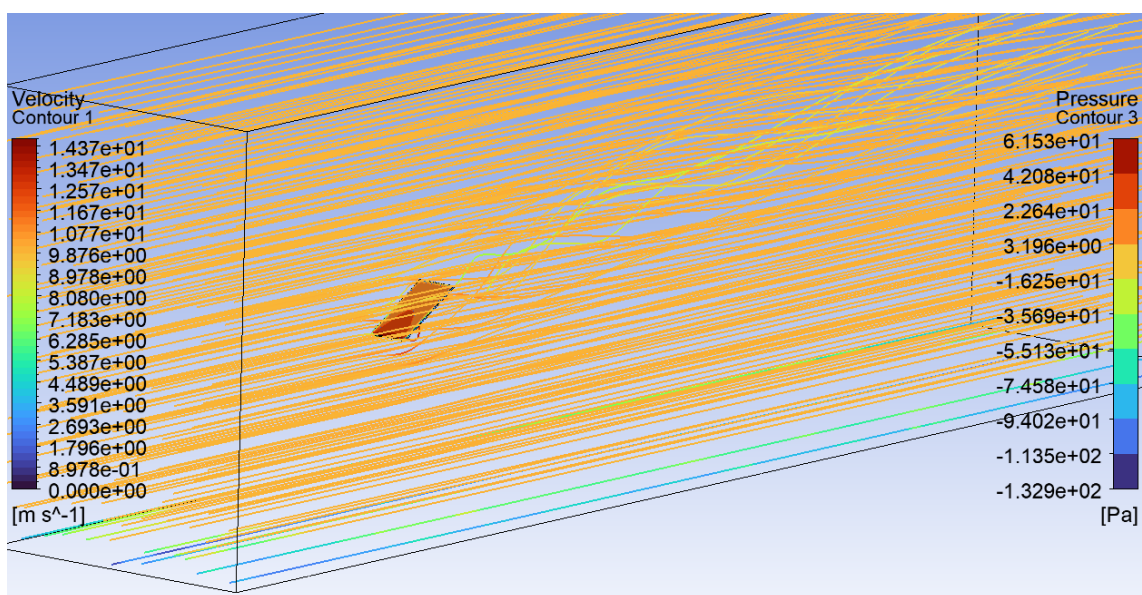


Figura 8: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 10$ m/s, 3D

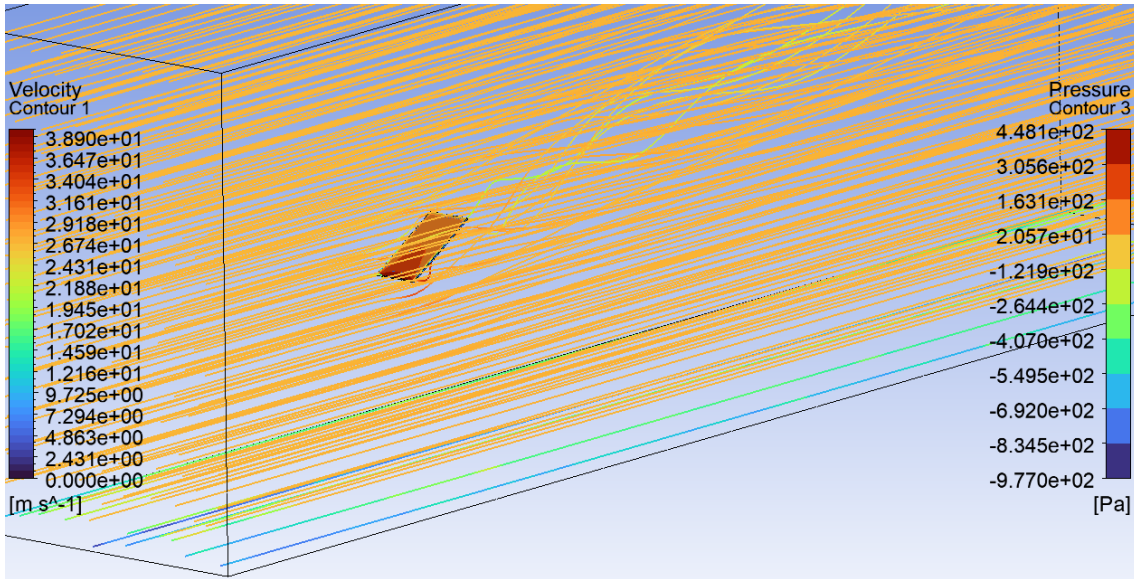


Figura 9: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 27$ m/s, 3D

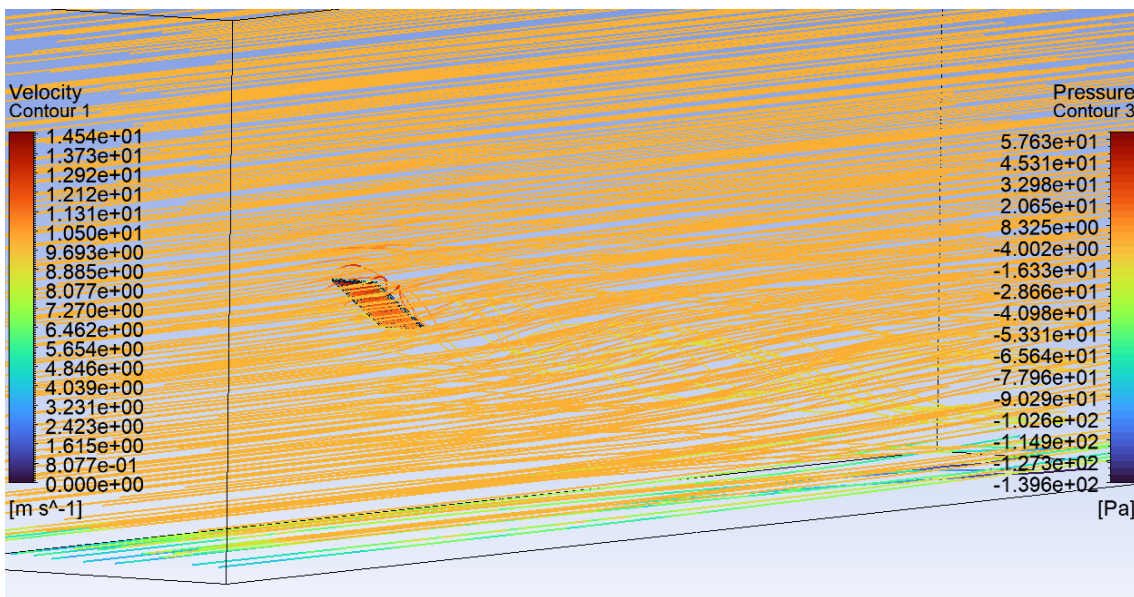


Figura 10: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $U = 10$ m/s, 3D

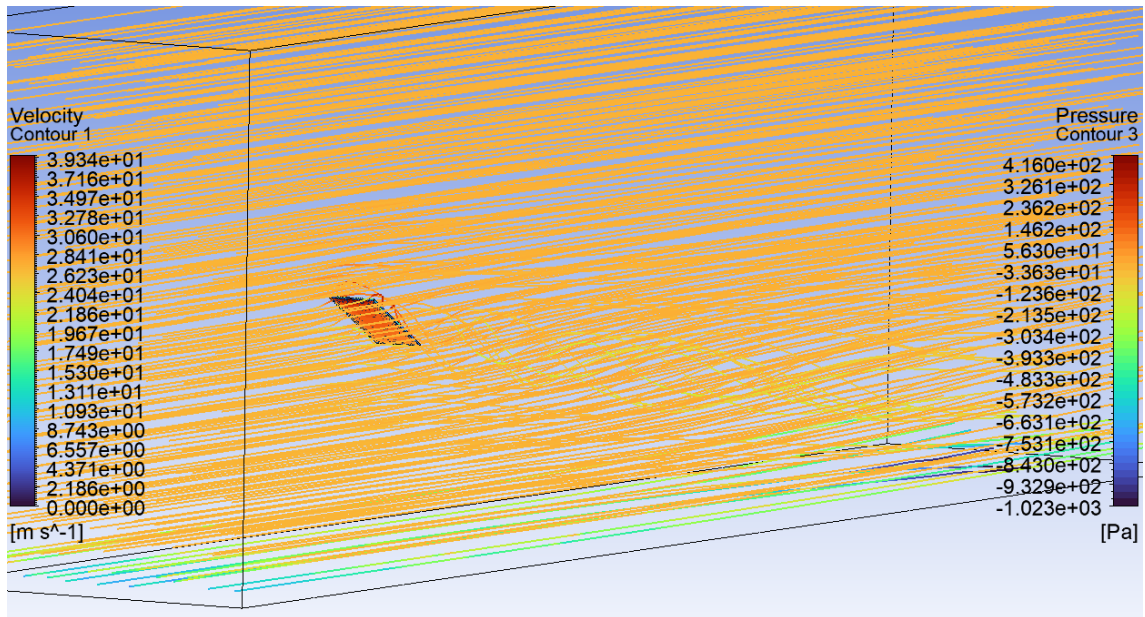


Figura 11: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $U = 27$ m/s, 3D

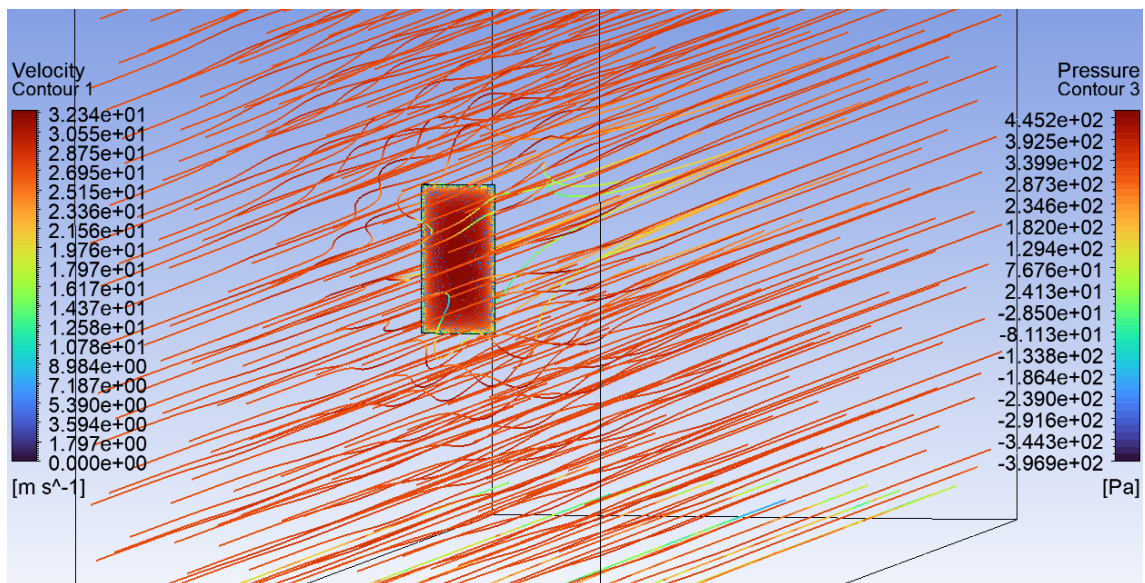


Figura 12: $\alpha = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 27$ m/s, 3D

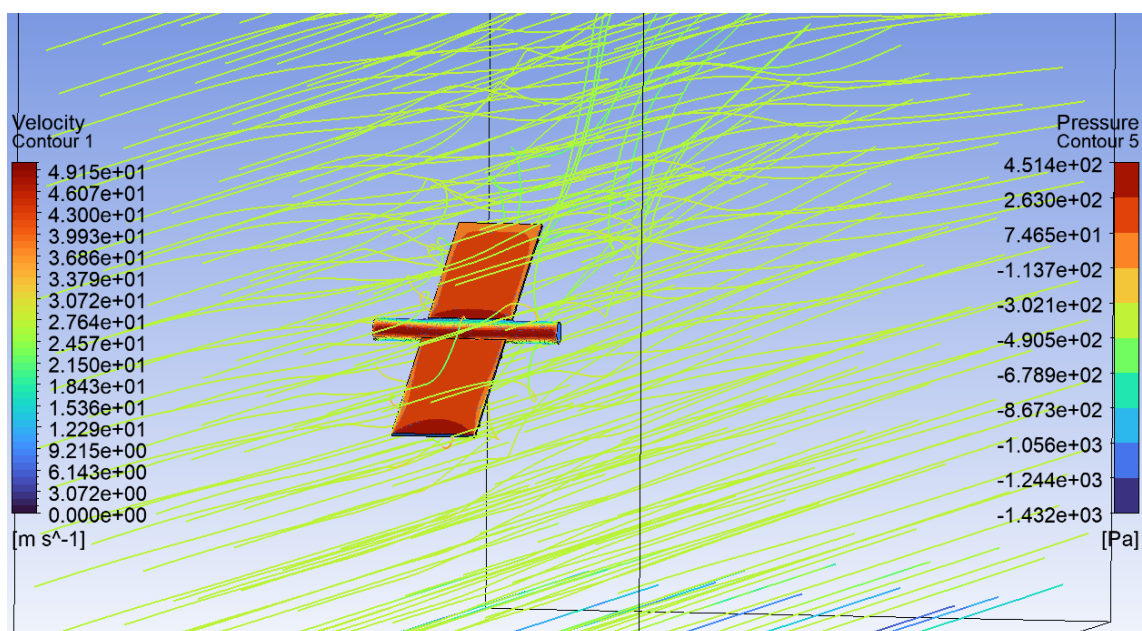


Figura 13: $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $U = 27$ m/s, 3D (pressão no painel superior)

.2 Secção A.2 - Resultados de Forças e Coeficientes

Tabela 1: Resumo das forças e coeficientes totais por zona para todas as simulações CFD.

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
2D	30°	0°	10	back_wall	-0.00099	-1.73e-07
				bottom_wall	108.79000	0.01907
				front_wall	0.00829	1.45e-06
				top_wall	66.20000	0.01161
				Total	175.00000	0.03068
2D	30°	0°	27	back_wall	-0.00621	-5.38e-06
				bottom_wall	791.82000	0.68555
				front_wall	0.03393	2.94e-05
				top_wall	482.31000	0.41759
				Total	1274.16000	1.10316
2D	30°	0°	40	back_wall	-0.01295	-2.27e-06
				bottom_wall	1737.15000	0.30456
				front_wall	0.05901	1.03e-05
				top_wall	1058.48000	0.18558
				Total	2795.67000	0.49015
2D	30°	180°	10	back_wall	-0.00077	-8.74e-07
				bottom_wall	71.90338	0.08133
				front_wall	0.00830	9.38e-06
				top_wall	94.69174	0.10711
				Total	166.60264	0.18844
				back_wall	-0.00532	-4.60e-06

Continua na próxima página

2D 30° 180° 27

Tabela 1 continuação

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
				bottom_wall	594.93735	0.51470
				front_wall	0.03840	3.32e-05
				top_wall	782.01949	0.67655
				Total	1376.98990	1.19128
2D	30°	180°	40	back_wall	-0.00970	-1.10e-05
				bottom_wall	1151.44400	1.30240
				front_wall	0.05732	6.48e-05
				top_wall	1512.16980	1.71042
				Total	2663.66140	3.01287
2D	90°	0°	27	back_wall	0.00061	5.27e-07
				bottom_wall	949.99000	0.82250
				front_wall	0.00307	2.66e-06
				top_wall	1962.99000	1.69955
				Total	2912.98000	2.52205
3D	30°	0°	10	back_panel_wall	-0.00080	-6.94e-07
				bottom_panel_wall	132.33000	0.11457
				front_panel_wall	0.02330	2.02e-05
				side_panel_walls	0.00431	3.73e-06
				top_panel_wall	46.65000	0.04039
				Total	179.00000	0.15498
3D	30°	0°	27	back_panel_wall	-0.00437	-3.78e-06
				bottom_panel_wall	968.84000	0.83882
				front_panel_wall	0.10977	9.50e-05
				side_panel_walls	0.02195	1.90e-05
				top_panel_wall	340.10000	0.29446
				Total	1309.07000	1.13339
3D	30°	180°	10	back_panel_wall	-0.94638	-0.00082
				bottom_panel_wall	23.31037	0.02018
				front_panel_wall	-0.15532	-0.00013
				side_panel_walls	-0.02632	-2.28e-05
				top_panel_wall	66.11522	0.05724
				Total	88.29757	0.07645
3D	30°	180°	27	back_panel_wall	-0.00557	-4.82e-06
				bottom_panel_wall	346.08951	0.29964
				front_panel_wall	0.11144	9.65e-05
				side_panel_walls	0.02059	1.78e-05
				top_panel_wall	969.73678	0.83960
				Total	1315.95270	1.13935
3D	90°	0°	27	back_panel_wall	-0.01494	-1.29e-05
				bottom_panel_wall	919.23000	0.79587
				front_panel_wall	-0.02030	-1.76e-05
				side_panel_walls	-0.02723	-2.36e-05
				top_panel_wall	552.34000	0.47821
				Total	1471.51000	1.27403

Continua na próxima página

Tabela 1 continuação

Dim	θ	α	U [m/s]	Zona	Força Total [N]	Coef. Total
				cilindro	-104.09210	-0.04506
				painel_inferior_frontal	423.41926	0.18330
				painel_inferior_traseiro	898.34922	0.38889
3D	30°	0°	27	painel_superior_frontal	345.14546	0.14941
				painel_superior_traseiro	517.40688	0.22399
				wall-solid	62.96889	0.02726
				Total	2143.19760	0.92779

Anexo A - Excertos da NP EN 1991-1-4 2010

.3 Capítulo 4 – Velocidade do vento e pressão dinâmica págs.
22–29

Norma Portuguesa

NP
EN 1991-1-4
2010

Eurocódigo 1 – Acções em estruturas
Parte 1-4: Acções gerais
Acções do vento

Eurocode 1 – Actions sur les structures
Partie 1-4: Actions générales
Actions du vent

Eurocode 1 – Actions on structures
Part 1-4: General actions
Wind actions

ICS
91.010.30

DESCRITORES
Eurocódigo; estruturas; ventos; betão armado; resistência ao vento; cálculos matemáticos; pontes; edifícios

CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1991-1-4:2005 + AC:2010

HOMOLOGAÇÃO
Termo de Homologação n.º 67/2010, de 2010-03-19

ELABORAÇÃO
CT 115 (LNEC)

EDIÇÃO
Março de 2010

CÓDIGO DE PREÇO
XEC041

© IPQ reprodução proibida

Instituto Português da Qualidade

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA PORTUGAL

Tel. + 351-212 948 100 Fax + 351-212 948 101
E-mail: ipq@mail.ipq.pt Internet: www.ipq.pt

sobre elementos da superfície resultam forças perpendiculares à superfície da construção ou dos elementos de revestimento individuais. Além disso, quando o vento varre áreas grandes de construções, poderão desenvolver-se forças de atrito significativas, actuando tangencialmente à superfície.

3.2 Representações das acções do vento

(1) A acção do vento é representada por um conjunto simplificado de pressões ou de forças cujos efeitos são equivalentes aos efeitos extremos do vento turbulento.

3.3 Classificação das acções do vento

(1) Salvo especificação em contrário, as acções do vento deverão ser classificadas como acções variáveis fixas; ver a EN 1990, 4.1.1.

3.4 Valores característicos

(1) As acções do vento calculadas de acordo com a presente Norma são valores característicos (ver a EN 1990, 4.1.2). Estas acções são determinadas a partir dos valores de referência da velocidade do vento ou da pressão dinâmica. De acordo com a EN 1990, 4.1.2(7)P, os valores de referência são valores característicos cuja probabilidade anual de serem excedidos é de 0,02, o que equivale a um período médio de retorno igual a 50 anos.

NOTA: Todos os coeficientes ou modelos para a determinação das acções do vento a partir dos valores de referência são escolhidos de forma a que a probabilidade de ocorrência das acções do vento calculadas não seja superior à probabilidade de ocorrência desses valores de referência.

3.5 Modelos

(1) O efeito do vento na estrutura (isto é, a resposta da estrutura) depende da dimensão, da forma e das propriedades dinâmicas da estrutura. A presente Norma cobre a resposta dinâmica devida à turbulência longitudinal (na direcção do vento) em ressonância com as vibrações, igualmente na direcção do vento, segundo um modo fundamental de flexão cuja configuração tem o mesmo sinal em todos os pontos.

A resposta das estruturas deverá ser calculada de acordo com a secção 5 a partir da pressão dinâmica de pico, q_p , à altura de referência no campo de escoamento não perturbado, dos coeficientes de força e de pressão e do coeficiente estrutural $c_s c_d$ (ver a secção 6). A pressão q_p depende do regime local de ventos, da rugosidade do terreno, da orografia e da altura de referência. A pressão q_p é igual à pressão dinâmica média do vento acrescida de uma contribuição associada a flutuações de curta duração.

(2) A resposta aeroelástica deverá ser tida em conta no caso de estruturas flexíveis, tais como cabos, mastros, chaminés e pontes.

NOTA: O Anexo E fornece orientações simplificadas relativamente à resposta aeroelástica.

4 Velocidade do vento e pressão dinâmica

4.1 Base de cálculo

(1) A velocidade do vento e a pressão dinâmica compreendem uma componente média e uma componente flutuante.

A velocidade média do vento, v_m , deverá ser determinada a partir do valor de referência da velocidade do vento, v_b , o qual depende do regime local de ventos, conforme é descrito em 4.2, e da variação do vento em

função da altura, determinada a partir da rugosidade do terreno e da orografia conforme é descrito em 4.3. A pressão dinâmica de pico é determinada em 4.5.

A componente flutuante do vento é caracterizada pela intensidade de turbulência definida em 4.4.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer informações climáticas nacionais a partir das quais seja possível obter directamente, para as categorias de terreno consideradas, a velocidade média do vento, v_m , a pressão dinâmica de pico, q_p , e outros valores suplementares.

4.2 Valores de referência

(1)P O valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 min, independentemente da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.

NOTA 1: Este terreno corresponde à categoria de terreno II no Quadro 4.1.

NOTA 2: O valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, poderá ser fornecido no Anexo Nacional.

(2)P O valor de referência da velocidade do vento deve ser calculado através da expressão (4.1):

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.1)$$

em que:

v_b valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II;

$v_{b,0}$ valor básico da velocidade de referência do vento; ver (1)P;

c_{dir} coeficiente de direcção; ver a Nota 2;

c_{season} coeficiente de sazão; ver a Nota 3.

NOTA 1: Se a influência da altitude no valor de referência da velocidade do vento, v_b , não for incluída no valor básico especificado, $v_{b,0}$, o Anexo Nacional poderá indicar um procedimento para a ter em conta.

NOTA 2: O valor do coeficiente de direcção c_{dir} para diferentes direcções do vento poderá ser fornecido no Anexo Nacional; o valor recomendado é 1,0.

NOTA 3: O valor do coeficiente de sazão c_{season} poderá ser fornecido no Anexo Nacional; o valor recomendado é 1,0.

NOTA 4: A velocidade média do vento, referida a períodos de 10 min, com a probabilidade anual p de ser excedida é determinada multiplicando o valor de referência da velocidade do vento v_b , fornecido em 4.2(2)P, pelo coeficiente de probabilidade c_{prob} calculado pela expressão (4.2); ver também a EN 1991-1-6.

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (4.2)$$

em que:

K parâmetro de forma, função do coeficiente de variação da distribuição de valores extremos;

n expoente.

NOTA 5: Os valores de K e de n poderão ser fornecidos no Anexo Nacional. Os valores recomendados são 0,2 para K e 0,5 para n .

(3) O coeficiente de sazão c_{season} poderá ser utilizado para estruturas provisórias e para todas as estruturas em fase de construção. Para estruturas amovíveis, que possam ser utilizadas em qualquer época do ano, c_{season} deverá ser considerado igual a 1,0.

NOTA: Ver também a EN 1991-1-6.

4.3 Vento médio

4.3.1 Variação com a altura

(1) A velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$, depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, v_b , e deverá ser determinada através da expressão (4.3):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.3)$$

em que:

$c_r(z)$ coeficiente de rugosidade, definido em 4.3.2;

$c_o(z)$ coeficiente de orografia, considerado igual a 1,0 salvo especificação em contrário indicada em 4.3.3.

NOTA 1: No Anexo Nacional poderão ser fornecidas informações sobre c_o . Se a orografia for tida em conta no valor de referência da velocidade do vento, o valor recomendado é 1,0.

NOTA 2: No Anexo Nacional poderão ser fornecidos gráficos ou quadros para o cálculo de $v_m(z)$.

Deverá ser considerada a influência de construções vizinhas sobre a velocidade do vento (ver 4.3.4).

4.3.2 Rugosidade do terreno

(1) O coeficiente de rugosidade $c_r(z)$ tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado:

– da altura acima do nível do solo;

– da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direcção do vento considerada.

NOTA: O procedimento para a determinação de $c_r(z)$ poderá ser fornecido no Anexo Nacional. O procedimento recomendado para a determinação do coeficiente de rugosidade à altura z é definido pela expressão (4.4) e baseia-se num perfil de velocidades logarítmico:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) && \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) && \text{para } z \leq z_{\min} \end{aligned} \quad (4.4)$$

em que:

z_0 comprimento de rugosidade;

k_r coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 , calculado através de:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.5)$$

em que:

$z_{0,II}$ = 0,05 m (categoria de terreno II, ver o Quadro 4.1);

z_{\min} altura mínima definida no Quadro 4.1;

z_{\max} a ser considerada igual a 200 m.

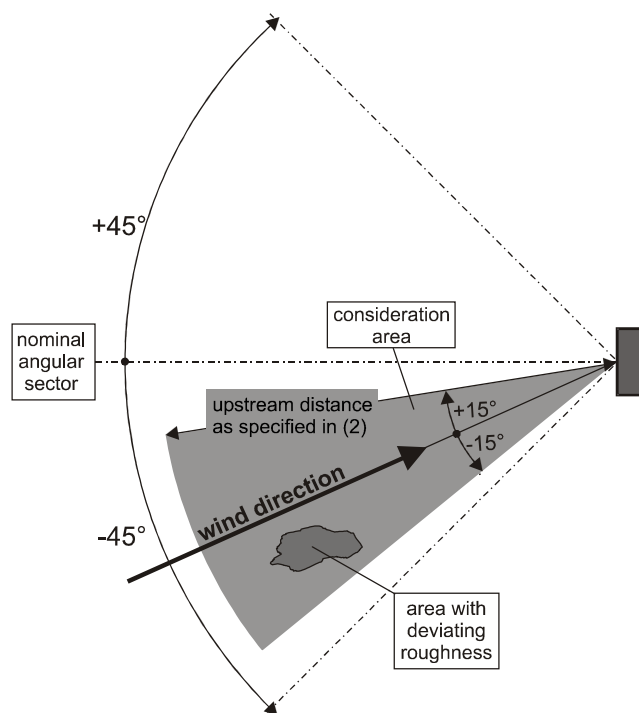
z_0 e z_{\min} dependem da categoria de terreno. No Quadro 4.1 são fornecidos valores recomendados em função de cinco categorias de terreno representativas.

A expressão (4.4) é válida quando a extensão de terreno a barlavento com rugosidade uniforme é suficientemente longa para que se registre uma estabilização satisfatória do perfil de velocidade; ver (2).

Quadro 4.1 – Categorias e parâmetros de terreno

<i>Categoria de terreno</i>	z_0 [m]	z_{min} [m]
<i>0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar</i>	<i>0,003</i>	<i>1</i>
<i>I Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
<i>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</i>	<i>0,05</i>	<i>2</i>
<i>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)</i>	<i>0,3</i>	<i>5</i>
<i>IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m</i>	<i>1,0</i>	<i>10</i>
NOTA: As categorias de terreno estão ilustradas em A.1.		

(2) A categoria de terreno a considerar para uma dada direcção do vento depende da rugosidade do solo e da extensão com rugosidade de terreno uniforme dentro dum sector angular definido em torno da direcção do vento. As zonas de pequena área (inferior a 10 % da área da zona considerada) que tenham uma rugosidade diferente poderão ser ignoradas. Ver a Figura 4.1.



Legenda:

nominal angular sector	sector angular nominal
consideration area	zona considerada
upstream distance as specified in (2)	extensão para barlavento, conforme é especificada em (2)
wind direction	direcção do vento
area with deviating roughness	zona com rugosidade diferente

Figura 4.1 – Avaliação da rugosidade do terreno

NOTA: O Anexo Nacional poderá definir o sector angular e a extensão para barlavento. Como sector angular recomendado, poderá ser considerado o sector de 30° definido por $\pm 15^\circ$ em relação à direcção do vento. O valor recomendado da extensão para barlavento poderá ser obtido de A.2.

(3) Nos casos em que um coeficiente de pressão ou de força é definido para um sector angular nominal, deverá ser utilizado o menor comprimento de rugosidade de entre os relativos a qualquer sector angular de 30°.

(4) Nos casos em que, na definição de uma dada zona, seja possível escolher entre duas ou mais categorias de terreno, deverá ser utilizada a categoria com menor comprimento de rugosidade.

4.3.3 Orografia

(1) Nos casos em que, devido à orografia (por exemplo, colinas, falésias, etc.), as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5 %, os efeitos correspondentes deverão ser considerados utilizando o coeficiente de orografia c_o .

NOTA: O procedimento a utilizar para a determinação de c_o poderá ser fornecido no Anexo Nacional; o procedimento recomendado é fornecido em A.3.

(2) Os efeitos da orografia poderão ser desprezados quando o declive médio do terreno a barlavento é inferior a 3°. O terreno a barlavento poderá ser tomado em consideração até uma distância de 10 vezes a altura do elemento orográfico isolado.

4.3.4 Construções vizinhas de grande porte e de altura consideravelmente maior

(1) Se uma construção for implantada na proximidade de outra cuja altura seja, pelo menos, o dobro da altura média das construções vizinhas, poderá então ficar exposta (em função das suas características) a velocidades do vento acrescidas, para certas direcções do vento. Este tipo de casos deverá ser tomado em consideração.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer um procedimento para ter em conta este efeito. Em A.4 é indicado um procedimento conservativo, recomendado como primeira aproximação.

4.3.5 Edifícios e obstáculos pouco espaçados

(1) O efeito de edifícios e de outros obstáculos pouco espaçados poderá ser tido em conta.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer um procedimento. Em A.5 é indicado um procedimento, recomendado como primeira aproximação. Em terrenos rugosos, edifícios pouco espaçados modificam o escoamento médio do vento na proximidade do solo, como se o nível deste fosse elevado de uma altura que se designa por elevação do nível de referência, h_{dis} .

4.4 Turbulência do vento

(1) A intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$, é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento.

NOTA 1: A componente de turbulência da velocidade do vento tem um valor médio nulo e um desvio padrão σ_v . O desvio padrão da turbulência, σ_v , poderá ser determinado através da expressão (4.6):

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (4.6)$$

Para o coeficiente de terreno, k_r , ver a expressão (4.5); para o valor de referência da velocidade do vento, v_b , ver a expressão (4.1); para o coeficiente de turbulência, k_I , ver a Nota 2.

NOTA 2: As regras recomendadas para a determinação de $I_v(z)$ são fornecidas pela expressão (4.7):

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.7)$$

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

em que:

k_I coeficiente de turbulência. O valor de k_I poderá ser fornecido no Anexo Nacional; o valor recomendado é 1,0;

c_o coeficiente de orografia, descrito em 4.3.3;

z_0 comprimento de rugosidade, fornecido no Quadro 4.1.

4.5 Pressão dinâmica de pico

(1) Deverá ser determinada a pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$, a qual resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento.

NP
EN 1991-1-4
2010

p. 28 de 162

NOTA 1: O Anexo Nacional poderá fornecer regras para a determinação de $q_p(z)$; a regra recomendada é fornecida pela expressão (4.8):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.8)$$

em que:

ρ massa volúmica do ar, a qual depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso;

$c_e(z)$ coeficiente de exposição, calculado pela expressão (4.9):

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.9)$$

q_b pressão dinâmica de referência, calculada pela expressão (4.10):

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.10)$$

NOTA 2: Os valores de ρ poderão ser fornecidos no Anexo Nacional; o valor recomendado é $1,25 \text{ kg/m}^3$.

NOTA 3: O valor 7 na expressão (4.8) baseia-se num factor de pico igual a 3,5 e é consistente com os valores dos coeficientes de pressão e de força que são fornecidos na secção 7.

Para o caso de um terreno plano em que $c_o(z) = 1,0$ (ver 4.3.3), o coeficiente de exposição $c_e(z)$ é representado na Figura 4.2 em função da altura acima do solo e da categoria de terreno, conforme é definida no Quadro 4.1.

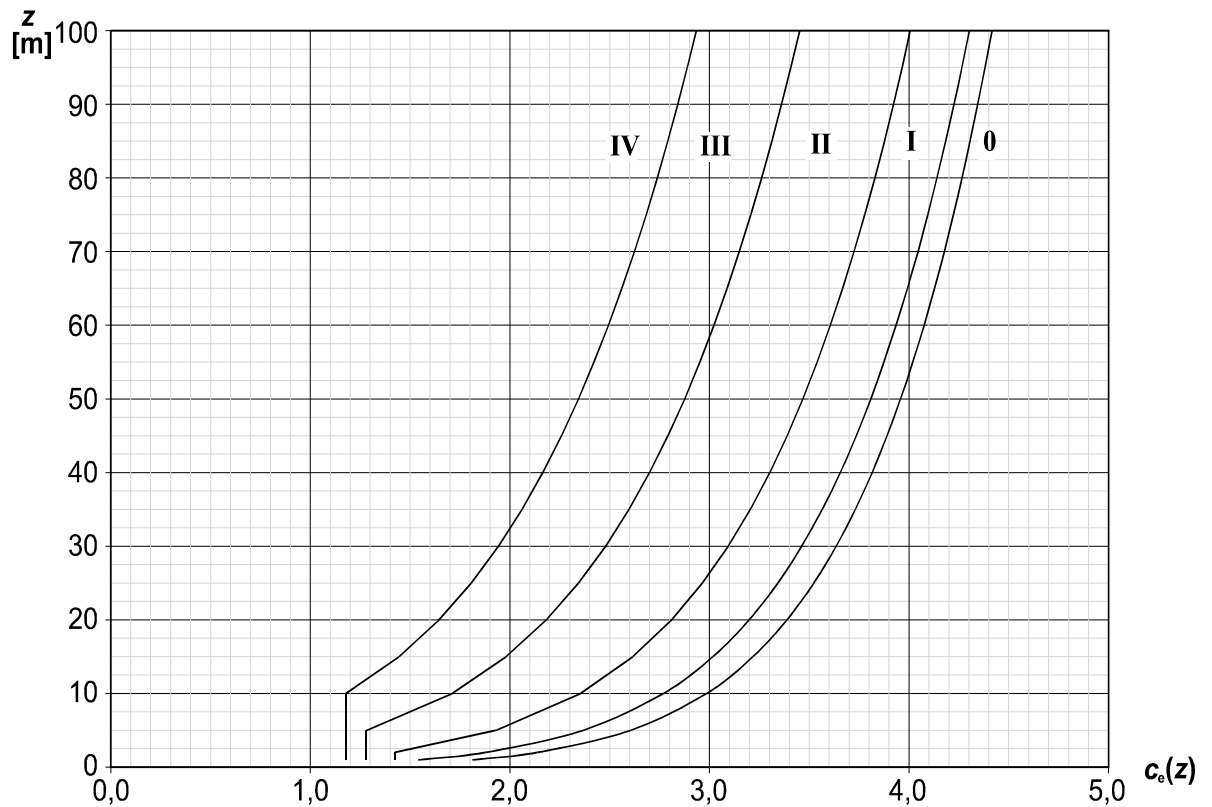


Figura 4.2 – Representação do coeficiente de exposição $c_e(z)$ para $c_o=1,0$ e $k_1=1,0$

5 Acções do vento

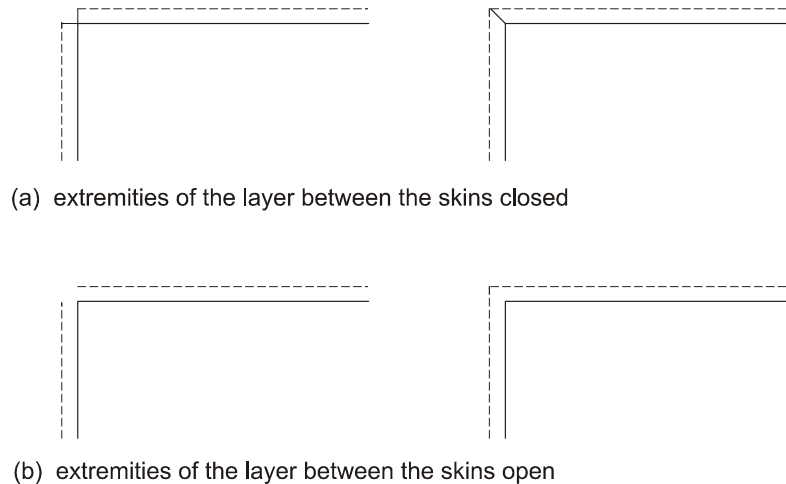
5.1 Generalidades

(1)P As acções do vento sobre as construções e os elementos de construção devem ser determinadas tendo em conta tanto as pressões exteriores como as pressões interiores devidas ao vento.

NOTA: No Quadro 5.1 apresenta-se um resumo dos procedimentos de cálculo para a determinação das acções do vento.

Anexo A

.4 Capítulo 7 - Coeficientes de pressão e força págs. 59–62



Legenda:

- (a) extremities of the layer between the skins closed (a) periferia da camada entre os panos fechada
(b) extremities of the layer between the skins open (b) periferia da camada entre os panos aberta

Figura 7.14 – Pormenores dos cantos de paredes exteriores com mais de um pano

7.3 Coberturas isoladas

(1) Uma cobertura isolada é definida como sendo a cobertura de uma construção que não tem paredes permanentes, como é o caso, por exemplo, em estações de serviço, armazéns agrícolas abertos, etc.

(2) O grau de obstrução sob uma cobertura isolada, ilustrado na Figura 7.15, depende da obstrução φ , que é o quociente entre a área dos eventuais obstáculos sob a cobertura (em configuração exequível) e a área da secção transversal sob a cobertura, sendo ambas as áreas medidas perpendicularmente à direcção do vento.

NOTA: $\varphi = 0$ representa uma cobertura isolada vazia, sem obstáculos, e $\varphi = 1$ representa uma cobertura isolada totalmente obstruída por objectos dispostos apenas no lado de sotavento (não se trata de um edifício fechado).

(3) Os coeficientes de força global c_f e os coeficientes de pressão resultante $c_{p,net}$ fornecidos nos Quadros 7.6 a 7.8 para $\varphi = 0$ e para $\varphi = 1$ têm em conta o efeito conjunto do vento actuando sobre as superfícies superior e inferior das coberturas isoladas, para qualquer direcção do vento. Valores intermédios poderão ser obtidos por interpolação linear.

(4) A sotavento da posição de obstrução máxima, deverão utilizar-se os valores de $c_{p,net}$ correspondentes a $\varphi = 0$.

(5) O coeficiente de força global traduz a força resultante. O coeficiente de pressão resultante representa a pressão local máxima para todas as direcções do vento; este coeficiente deverá ser utilizado para o cálculo dos elementos de cobertura e ligações.

(6) As coberturas isoladas devem resistir aos casos de carga a seguir definidos:

- para uma cobertura isolada de uma vertente (ver o Quadro 7.6), o centro de pressão deverá ser posicionado a uma distância $d/4$ do bordo de barlavento (d = dimensão na direcção do vento, ver a Figura 7.16);
- para uma cobertura isolada de duas vertentes (ver o Quadro 7.7), o centro de pressão deverá ser posicionado no centro de cada vertente (ver a Figura 7.17); além disso, deverão ser consideradas as

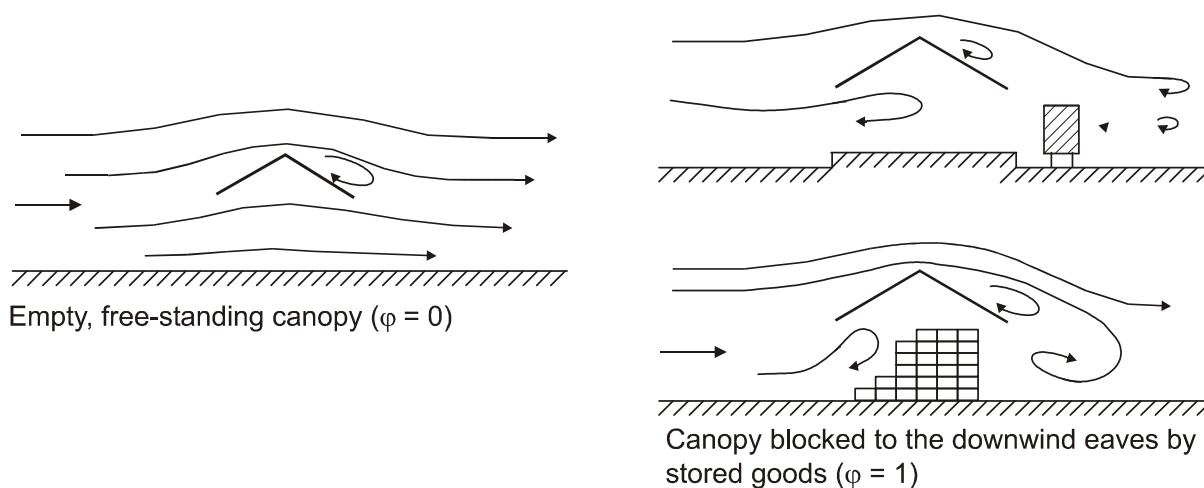
situações de carregamento máximo ou mínimo em qualquer uma das vertentes, estando a outra vertente sem carga;

- para uma cobertura isolada múltipla de naves com duas vertentes, o carregamento em cada nave poderá ser calculado por aplicação dos coeficientes de redução ψ_{mc} fornecidos no Quadro 7.8 aos valores de $c_{p,net}$ fornecidos no Quadro 7.7.

Para coberturas isoladas com dupla superfície envolvente, a superfície impermeável e as suas ligações deverão ser calculadas considerando $c_{p,net}$ e, em relação à superfície permeável e suas ligações, dever-se-à considerar $1/3 c_{p,net}$.

(7) Deverão ser consideradas as forças de atrito (ver 7.5).

(8) A altura de referência z_e deverá ser considerada igual a h , como é representado nas Figuras 7.16 e 7.17.



Legenda:

Empty, free-standing canopy ($\varphi = 0$)

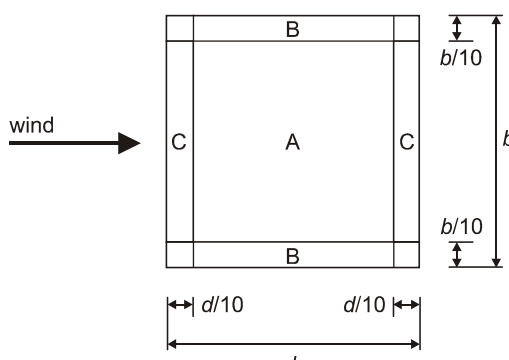
Cobertura isolada vazia ($\varphi = 0$)

Canopy blocked to the downwind eaves by stored goods ($\varphi = 1$)

Cobertura isolada obstruída, no lado de sotavento, por mercadorias armazenadas ($\varphi = 1$)

Figura 7.15 – Escoamento do ar em torno de coberturas isoladas

Quadro 7.6 – Valores de $c_{p,net}$ e de c_f para coberturas isoladas de uma vertente

		Coeficientes de pressão resultante $c_{p,net}$			
		Key plan			
					
Inclinação da cobertura α	Obstrução φ	Coeficientes de força global c_f	Zona A	Zona B	Zona C
0°	Máximo, qualquer φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Mínimo, $\varphi=0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Máximo, qualquer φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Mínimo, $\varphi=0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Máximo, qualquer φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Mínimo, $\varphi=0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,6	- 2,6	- 2,7
15°	Máximo, qualquer φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Mínimo, $\varphi=0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Máximo, qualquer φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Mínimo, $\varphi=0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Máximo, qualquer φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Mínimo, $\varphi=0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Máximo, qualquer φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Mínimo, $\varphi=0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Mínimo, $\varphi=1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7

NOTA: O sinal + indica uma acção resultante do vento com sentido descendente.
O sinal - indica uma acção resultante do vento com sentido ascendente.

Legenda:

wind vento
Key plan Planta de referência

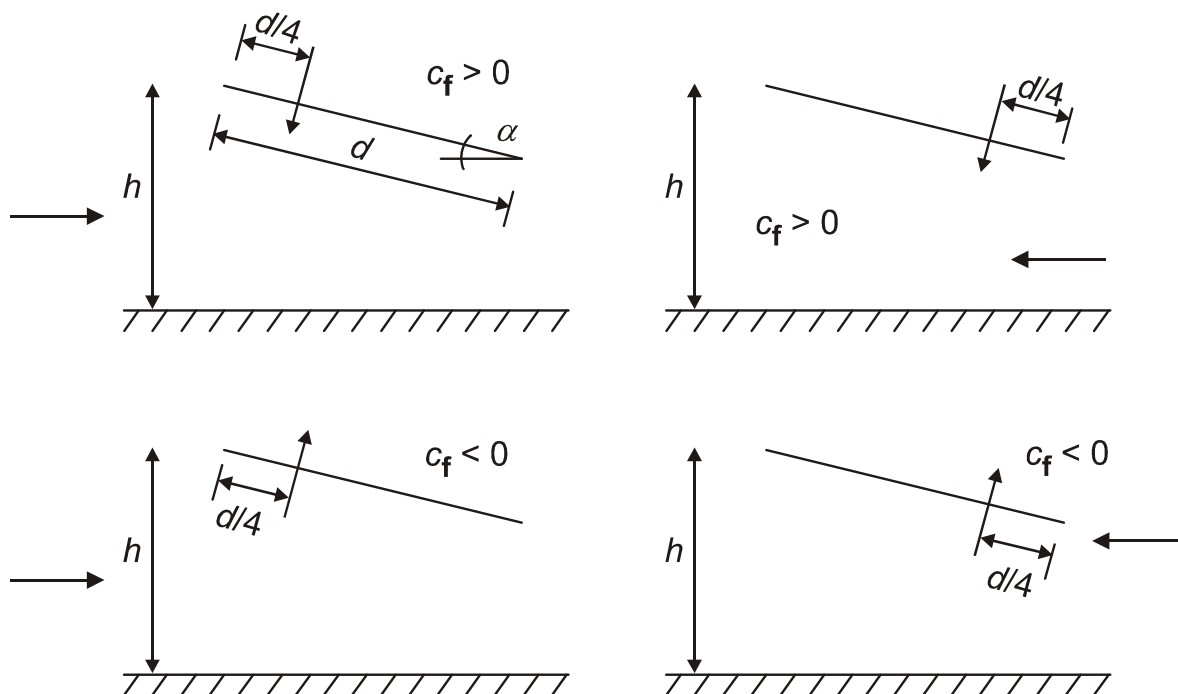


Figura 7.16 – Localização do centro de força para coberturas isoladas de uma vertente

.5 Anexo A.1 - Efeitos do terreno pág. 97

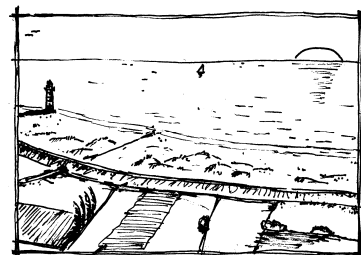
Anexo A (informativo)

Efeitos do terreno

A.1 Ilustrações da rugosidade máxima de cada categoria de terreno

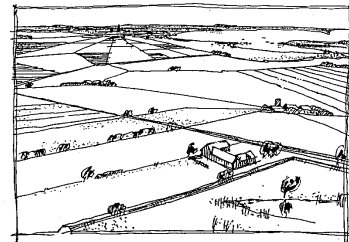
Categoria de terreno 0

Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar



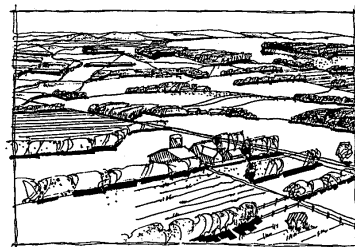
Categoria de terreno I

Lagos ou zona com vegetação negligenciável e livre de obstáculos



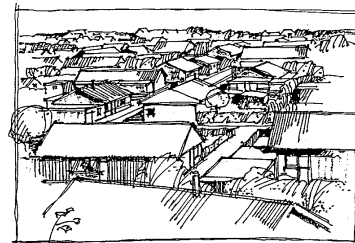
Categoria de terreno II

Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura



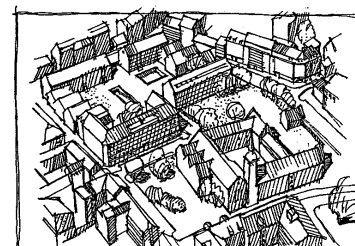
Categoria de terreno III

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)



Categoria de terreno IV

Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m



**.6 Anexo Nacional NA.2.3 - Princípios e Regras de Aplicação
com prescrições a nível nacional págs. 155-156**

prescinde-se de introduzir prescrições a nível nacional, devendo adoptar-se as correspondentes prescrições constantes desta Norma e, se tal for o caso, os procedimentos ou os valores aí recomendados.

NA.2.3 – Princípios e Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional

a) NA–1.5(2)

A título suplementar, é possível recorrer a ensaios em túnel de vento e a alguns métodos numéricos particulares a fim de obter informações relativas à acção do vento e à resposta estrutural.

No que diz respeito à utilização de métodos numéricos, realça-se que, em geral, devem estar comprovados ou devidamente validados; nestes termos, não é recomendado que no projecto de estruturas sejam utilizados valores de pico de pressões ou de forças baseados em valores calculados por métodos enquadrados no domínio da dinâmica computacional de fluidos, em face das limitações que tais métodos ainda apresentam no que diz respeito à simulação dos efeitos do vento atmosférico em estruturas.

b) NA–4.2(1)P, Nota 2

Para efeitos da quantificação do valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, considera-se o País dividido nas duas zonas seguintes:

Zona A - a generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B - os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.

O valor de $v_{b,0}$ a ser considerado para cada uma das zonas do País é o constante do Quadro seguinte:

Quadro NA.I – Valor básico da velocidade de referência do vento

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

c) NA–4.2(2)P, Nota 1

Em Portugal, a influência da altitude no valor de referência da velocidade do vento é tida em conta no zonamento do País (ver NA–4.2(1)P, Nota 2).

d) NA–4.2(2)P, Nota 2

Em geral, o valor a adoptar para o coeficiente de direcção, c_{dir} , é igual a 1,0. Não obstante, em situações tais que o efeito em causa esteja associado a uma direcção particular do vento e que a esta correspondam velocidades claramente inferiores às máximas no local – facto a ser justificado com base em dados estatísticos do regime de ventos na zona em causa e, eventualmente, com recurso a ensaios em túnel de vento ou modelação numérica adequada –, poderá ser considerada uma redução na velocidade de referência mas limitada a 15 % do valor básico, ou seja, $c_{dir} \geq 0,85$.

NP
EN 1991-1-4
2010

p. 156 de 162

e) NA-4.2(2)P, Nota 3

Nos casos em que a situação de projecto a ser considerada ocorra integralmente entre Maio e Agosto do mesmo ano – por exemplo, uma estrutura provisória ou fases construtivas de uma estrutura –, poderá ser considerada uma redução na velocidade de referência mas limitada a 10 % do valor básico, ou seja, $c_{season} \geq 0,90$.

f) NA-4.2(2)P, Nota 5

Na expressão (4.2) devem adoptar-se os seguintes valores: $K = 0,11$ e $n = 1,0$.

g) NA-4.3.2(1)

O coeficiente de rugosidade deve ser determinado através do procedimento recomendado na presente Norma tendo em consideração as quatro categorias de terreno caracterizadas no Quadro NA-4.1, o qual substitui o Quadro 4.1.

Quadro NA-4.1 – Categorias de terreno e respectivos parâmetros

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	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	3
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: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15
<i>NOTA 1: As categorias de terreno II, III e IV estão ilustradas em A.1.</i>			
<i>NOTA 2: O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, é ilustrado na Figura NA.1.</i>			

h) NA-4.3.2(2)

Em relação ao sector angular, deve ser considerado o sector de 30° definido por $\pm 15^\circ$ em relação à direcção do vento.

No que diz respeito à extensão para barlavento, deve ser utilizado o seguinte procedimento:

Se a construção está situada na proximidade de uma alteração de rugosidade do terreno, a qual ocorre a uma distância:

- inferior a 2 km, com transição de uma superfície de categoria I,
 - inferior a 1 km, com transição de um terreno menos rugoso de categoria II ou III,
- deverá ser utilizada a categoria de terreno menos rugosa na direcção de barlavento.

As zonas de pequena área (inferior a 10 % da área da zona considerada) que tenham uma rugosidade diferente poderão ser ignoradas.

Anexo B - Informações Técnicas do Painel SILK PLUS

.7 Ficha técnica



PERC | TECHNOLOGY
INSIDE

550 W 21.28 %

Maximum power

Maximum efficiency

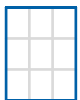
KEY BENEFITS AND FEATURES



Power from **540 to 550 Watt**



144 M10 PERC half-cut cells



Silver frame and white backsheet



Ideal for **Commercial** and
Industrial installations



Long cable as standard suitable
for landscape configurations



2279 x 1134 x 35 mm

Performance guarantee

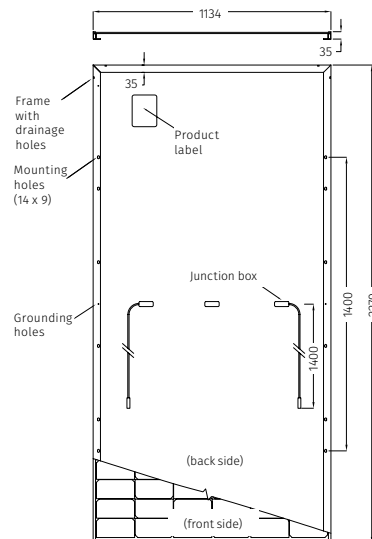
- **25-years** performance warranty with max power decrease from 2nd year **0.5%/year**
- **97%** at the end of first year
- **90%** at the end of 20th year
- **87%** at the end of 25th year

Product guarantees

- **15-year** product warranty
- Third-party product **liability** insurance
- All FuturaSun's modules are designed and guaranteed by the **Italian** headquarters

Mechanical Specifications

Dimensions	2279 x 1134 x 35 mm
Weight	28.2 kg
Glass	High transmission, Low iron, Tempered, ARC, Thickness 3.2 mm
Cells	144 monocrystalline half-cut MBB PERC cells 182 x 91 mm
Frame	Anodized aluminium frame with mounting and drainage holes
Junction boxes	Certified according to IEC 62790, IP 68 approved, 3 bypass diodes
Cables	Solar cable, length 1400 mm or customized assembled with 4mm ² compatible connectors
Backsheet	Composite Multilayer film - white
Maximum reverse current (I _r)	25 A
Maximum system voltage	1000 V (1500 V on request)
Mechanical load (snow)	Design load: 3600 Pa, (5400 Pa including safety factor 1.5)
Mechanical load (wind)	Design load: 1600 Pa, (2400 Pa including safety factor 1.5)



Electrical data - STC*

		FU 540 M	FU 545 M	FU 550 M
Sorting tolerance	%		0/+5	
Module power (P _{max})	W	540	545	550
Open circuit voltage (V _{oc})	V	49.66	49.81	49.96
Short circuit current (I _{sc})	A	13.77	13.84	13.91
Maximum power voltage (V _{mpp})	V	41.8	41.96	42.12
Maximum power current (I _{mp})	A	12.92	12.99	13.06
Module efficiency	%	20.89	21.09	21.28

Electrical data - NOCT**

		FU 540 M	FU 545 M	FU 550 M
Module power (P _{max})	W	407	411	415
Open circuit voltage (V _{oc})	V	46.53	46.65	46.78
Short circuit current (I _{sc})	A	11.05	11.09	11.13
Maximum power voltage (V _{mpp})	V	39.03	39.26	39.49
Maximum power current (I _{mp})	A	10.43	10.47	10.51

Temperature ratings

Temperature coefficient I _{sc}	%/°C	0.05
Temperature coefficient V _{oc}	%/°C	-0.27
Temperature coefficient P _{max}	%/°C	-0.35
NOCT**	°C	45
Operating temperature	°C	from -40 to +85

Certifications

Factory	ISO 9001 - 14001 - 45001
Product	IEC EN 61215 - IEC EN 61730 Class 1 UNI9177, IEC EN 61701, IEC EN 62716, MCS

Packaging

Quantity / Pallet	31 pcs
Container 40' HC	620 pcs / 20 pallets

The information included in this module datasheet is subject to change without notice and is provided for informational purposes only. No contractual rights are established or should be inferred because of user's reliance on the information contained in this module datasheet. Please refer to the appropriate module user guide and module product specification document for more detailed technical information regarding module performance, installation and use.

*Standard Test Conditions STC: 1000 W/m² - AM 1.5 - 25 °C - tolerance: P_{max} (±3%), V_{oc} (±4%), I_{sc} (±5%)
 **Nominal Operating Cell Temperature NOCT: 800 W/m² - T=45 °C - AM 1.5

EN_04