

**Estudo de Escoamentos em Seguidores Fotovoltaicos  
Conceção, Modelação, Dimensionamento na Martifer Solar**

*Leandro Caetano Neves da Silva Oliveira*

**Dissertação de Mestrado**

**Versão Provisória**

Orientador na FEUP: Prof. José Laginha Palma

Orientador na Martifer Solar: Eng.º José Carlos Amador



**FEUP**

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

2013-XX-XX

*A todos os que me apoiaram*

## Resumo

A Martifer Solar é uma empresa do Grupo Martifer dedicada às energias renováveis, nomeadamente, à energia solar. Devido ao crescente mercado de novas soluções, focadas na eficiência destes sistemas fotovoltaicos, a Martifer Solar pretende inovar e otimizar estruturas já existentes, visto que desempenham um papel de liderança neste sector.

Esta dissertação foca-se na modelação matemática de uma ferramenta de cálculo completa que permita estudar diversas situações possíveis, na aplicação de um painel fotovoltaico.

Com o crescente esforço que a Martifer Solar exerce diariamente para manter uma postura de nível no mercado internacional, surge a necessidade de estudar detalhadamente as situações desfavoráveis a que uma instalação fotovoltaica se encontra sujeita bem como compreender os fenómenos existentes nesta área para que surtam estruturas mais competitivas quer em custo quer em fiabilidade.

Os Eurocódigos têm um papel importante no dimensionamento de uma estrutura fotovoltaica normalizada. Contudo, com a presente dissertação, pretende-se obter dados para resultados mais eficientes e alcançar um lugar de destaque no mercado face aos outros *players*. Fornecem orientações para a determinação das ações do vento natural, a utilizar no projeto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil. No entanto, a norma abrange várias tipologias de estruturas podendo conduzir a resultados conservativos.

Foi realizado primeiramente um estudo teórico, e posteriormente procedeu-se à implementação numa ferramenta de cálculo com vista a rápida resposta das situações que analisadas.

A presente dissertação demonstra que é possível, com a modelação matemática efetuada, obter melhores resultados bem como formas para ultrapassar e melhor compreender situações até então não estudadas.

## **Study of Wind Flows on Photovoltaic Followers – Design and Modelling in Martifer Solar**

### **Abstract**

Martifer Solar is a company of the Martifer Group dedicated to renewable energy in particular solar energy. Due to the growing market for new solutions, focused on the efficiency of photovoltaic systems, Martifer Solar plans to innovate and optimize existing structures, since they play a leading role in this sector.

This dissertation focuses on the mathematical modeling of a complete calculation tool that allows studying various possible situations for application of a photovoltaic panel.

Due to the effort that Martifer Solar exercises daily to maintain a level attitude in the international market, comes the need to study further the unfavorable situations that a photovoltaic system is subject and understand the phenomena in this area for more reliable and economical structures.

The Eurocodes have an important role in the design of a standard photovoltaic structure but I intend with this thesis, data to achieve results less defensive and more efficient, thus achieving superiority over its competitors.

It was performed a theoretical study subsequently implemented in a calculation tool aimed at rapid response situations that were analyzed.

This thesis demonstrates that it is possible to obtain better results with the mathematical modeling done and ways to better understand and overcome situations not previously understood.

It was concluded that mathematical modeling in engineering may be the fundamental key to quickly get a product with superior features and economically more favorable, giving the company an advantage in the current market.

## **Agradecimentos**

<Máximo 1 página.

Agradecimentos a todas as pessoas da empresa ou organização que estiveram diretamente envolvidas no trabalho realizado, ou que contribuíram para o seu sucesso.

Agradecimentos a todas as pessoas da FEUP que de algum modo apoiaram a realização do trabalho, ou que contribuíram para o seu sucesso.

Eventuais agradecimentos a outras pessoas, incluindo amigos ou familiares.

Finalmente referir e agradecer os financiamentos recebidos (por exemplo, bolsa de empresa, apoio de um programa nacional ou internacional)

Não incluir agradecimentos despropositados ou com gosto duvidoso. Exemplo: “Agradeço a mim próprio”.>

## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	7
1.1	Âmbito da Dissertação .....	7
1.2	Apresentação da Martifer Solar .....	7
1.3	Objetivos .....	7
1.4	Análise comparativa de abordagens existentes e suas vantagens ou inconvenientes .....	8
1.5	Temas abordados e sua organização no presente relatório .....	8
2	Metodologia .....	9
2.1	Introdução .....	9
2.2	Modelo Matemático .....	9
2.2.1	Equações do Eurocódigo .....	9
2.2.2	Equações possíveis para um cálculo simplificado .....	11
	• Arrasto e Sustentação .....	11
	• Equações de Navier-Stokes .....	12
	• Escoamento em torno de um cilindro (Bernoulli - Corpos de Rankine) .....	12
	• Coeficiente de Arrasto CD .....	14
2.2.3	Equações do modelo de turbulência k-epsilon padrão .....	16
2.3	Método Numérico <i>RANS</i> para resolução do modelo matemático .....	18
2.4	Conclusões .....	18
3	Definição do Problema .....	19
3.1	Introdução .....	19
3.2	Descrição do problema .....	19
3.3	Definição de variáveis .....	20
3.4	Cálculos preliminares .....	20
3.4.1	Eurocódigo .....	20
3.4.2	Equação do Coeficiente de Arrasto CD .....	21
3.5	Pré processamento .....	21
3.5.1	Definição da Geometria .....	21
3.5.2	Definição do Domínio Numérico .....	21
3.5.3	Definição das Condições de Fronteira .....	21
3.5.4	Definição da Malha .....	22
3.6	Pós processamento .....	23
3.6.1	Análise do Domínio Numérico .....	23
3.6.2	Análise da Malha .....	23
3.6.3	Análise de Resultados .....	24
3.7	Conclusões .....	25
4	Resolução do problema .....	26
4.1	Introdução .....	26
4.2	Definição de variáveis .....	26
4.3	Cálculos analíticos .....	26
4.3.1	Eurocódigo .....	26
4.3.2	Equação do Coeficiente de Arrasto CD .....	27
4.4	Pré processamento .....	27
4.4.1	Definição da geometria, domínio e malha .....	27

4.4.2	Definição do Perfil de Velocidades .....	28
4.4.3	Definição da Intensidade Turbulenta .....	28
4.4.4	Definição do Rácio de Viscosidade Turbulenta .....	28
4.4.5	Controlo dos Limites da Solução .....	29
4.4.6	Definição dos Valores Residuais e do $Y^+$ .....	29
4.5	Pós processamento .....	30
4.5.1	Análise dos Perfis de Pressão .....	30
4.5.2	Análise das Forças Aplicadas e Centro de Gravidade.....	31
4.5.3	Análise dos Perfis de Velocidade .....	32
4.5.4	Análise da Turbulência .....	33
4.5.5	Verificação Efeitos Não Lineares.....	34
4.5.6	Análise dos Coeficientes de Pressão vs. Eurocódigo .....	38
4.5.7	Análise do Erro .....	40
4.5.8	Análise da convergência e $Y^+$ .....	41
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	43
	Referências .....	45
	Bibliografia.....	47
ANEXO A:	Eurocódigo 1991.4 - Efeitos do Terreno.....	48
ANEXO B:	Eurocódigo 1991.4 – Coeficientes para proteção de paredes e vedações.....	49
ANEXO C:	Eurocódigo 1991.4 – Elementos estruturais de secção retângular.....	50
ANEXO D:	Efeitos de Esteira.....	51
ANEXO E:	Gráficos da distribuição da Pressão na superfície .....	52
ANEXO F:	Tabela das equações lineares aproximadas da distribuição da Pressão no Painel Fotovoltaico .....	53
ANEXO G:	Contornos da Pressão vs. Vetores da Velocidade .....	54
ANEXO H:	<Título do Anexo D, 1º anexo em volume separado> (em volume separado) .....	55

**Siglas**

CE	Conformidade Europeia;
MIEM	Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica;
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
EC	Eurocódigo;
I&D+I	Investigação, Desenvolvimento & Inovação;
$q_p$	Pressão dinâmica de Pico;
$F_w$	Forças do vento;
$v_b$	Velocidade base do vento a 10m do solo;
$v_{b,0}$	Velocidade base fundamental do vento;
$C_{dir}$	Factor de direção;
$C_{season}$	Factor de época;
$v_m$	Velocidade média do vento
$C_0$	Factor de orografia;
$C_r$	Factor de rugosidade;
$k_r$	Coeficiente de terreno;
$I_v$	Intensidade de turbulência do vento;
$C_e$	Coeficiente de exposição;
$C_f$	Coeficiente de força;
$z_a$	Altura ao Solo;
$e$	Excentricidade horizontal;
$\tau_p$	Tensão de corte
$p$	Pressão
$\rho$	Densidade
$\mu$	Viscosidade
D	Arrasto
L	Sustentação
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>




<Ordenar alfabeticamente.>

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Logotipo da Martifer Solar .....	7
---	---

**Índice de Tabelas (opcional)**

<Usar o mesmo formato do índice de conteúdos.>

# 1 Introdução

## 1.1 Âmbito da Dissertação

O presente documento foi elaborado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) na opção de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel (PDEA), no contexto do projeto proposto pela Martifer Solar, pertencente ao Grupo Martifer e que consiste no estudo do efeito do vento em relação aos seguidores fotovoltaicos de solo recorrendo à modelação matemática e numérica.

## 1.2 Apresentação da Martifer Solar



**Figura 1.1 - Logotipo da Martifer Solar**

A Martifer é um grupo multinacional com mais de três mil colaboradores em todo o mundo, focada em duas áreas de negócio: construção metálica e energia solar.

No decorrer de 2012, o Grupo aumentou a sua exposição fora da Europa, com a entrada em mercados promissores. Na construção metálica destaca-se no primeiro semestre do ano o início da construção da fábrica de estruturas no Brasil, e na energia solar a adjudicação do primeiro projeto de energia solar fotovoltaica na Índia.

A Martifer Solar desempenha um papel de liderança na indústria fotovoltaica, suportado pela experiência e presença a nível internacional, pela sua tecnologia, qualificações técnicas e uma equipa qualificada. A presente dissertação foi elaborada no departamento de investigação, desenvolvimento e inovação (I&D+I) da Martifer Solar em Oliveira de Frades.

## 1.3 Objetivos

O projeto nesta dissertação surge na necessidade de caracterizar a distribuição de forças do vento incidente sobre painéis fotovoltaicos. Pretende-se abordar as ações do vento a que estão expostos os painéis fotovoltaicos de forma a enriquecer as componentes de cálculo que integram a resolução de um projeto solar. Até à realização do presente trabalho, a ação do vento encontrava-se integrada com uma abordagem simplista onde se desprezavam alguns fatores que poderiam fazer diferença no dimensionamento da estrutura.

De forma a alcançar objetivos iniciados pela política do grupo em ser um dos cinco maiores do Mundo na área da Energia Renovável, o departamento de I&D+I tem a necessidade de aprofundar a complexidade de variáveis para o dimensionamento destas estruturas de modo a fiabilizar componentes, flexibilizar estruturas e reduzir custos. Estas situações permitirão à Martifer Solar aumentar a sua competitividade no mercado em que se insere.

Como departamento multidisciplinado, a equipa de I&D+I da Martifer Solar é integrada por pessoas com formação em diferentes áreas. Surgiu a necessidade de estudar as ações do vento recorrendo a um estudo mais aprofundado sobre os seus efeitos sobre superfícies, perceber determinados acontecimentos para os quais ainda não tinham justificação e verificar se os

resultados obtidos descritos no capítulo respectivo desta dissertação são vantajosos para o dimensionamento estrutural face aos valores calculados pelo Eurocódigo (ver capítulo 2.2.1).

Com esta análise detalhada pretende-se, acima de tudo, demonstrar a vantagem do trabalho realizado no que toca aos valores obtidos para o dimensionamento estrutural face aos dados do Eurocódigo.

#### **1.4 Análise comparativa de abordagens existentes e suas vantagens ou inconvenientes**

Para o dimensionamento das estruturas de suporte aos painéis fotovoltaicos é preciso ter em consideração uma série de fatores existentes quando em serviço.

Na Martifer Solar, as normas usadas até ao início desta dissertação traduziam-se através dos Eurocódigos Estruturais [10] que englobam os fatores supracitados. No capítulo 2.2.1. podem ser verificados os passos de cálculo referentes ao problema proposto.

Os documentos que formam o EC - Eurocódigo visam a reunião de um conjunto de procedimentos e regras para o projeto estrutural. Os produtos que se dimensionam através destes documentos técnicos têm validade nos países que requerem a aprovação e marcação CE, simplificando, desta forma, o processo de certificação.

Embora a simplificação do processo seja uma enorme vantagem, os dimensionamentos efetuados seguindo estes procedimentos poderão ser conservadores devido, em parte, à amplitude de aplicações possíveis, não permitindo a obtenção de soluções competitivas.

#### **1.5 Temas abordados e sua organização no presente relatório**

Esta dissertação está organizada em capítulos tendo um total de cinco.

O capítulo 1 refere uma introdução breve ao tema da presente dissertação e seus objetivos, apresentação da empresa onde foi efetuada e as abordagens existentes a este tema. Termina com a apresentação da estrutura do documento;

O capítulo 2 apresenta a modelação matemática e as equações do Eurocódigo utilizadas, algumas definições relativas ao assunto e o método numérico para a simulação computacional;

O capítulo 3 inclui uma descrição do problema, cálculos preliminares das equações obtidas no capítulo 2, a definição de alguns parâmetros como domínio, geometrias, malhas e condições de fronteira e a sua validação com um primeiro ensaio numérico simples no ANSYS FLUENT<sup>®</sup>. Pretende-se também apresentar o *software* supracitado percebendo as potencialidades disponíveis para serem utilizados no capítulo seguinte;

O capítulo 4 descreve a resolução do problema proposto. Apresenta a resolução das equações matemáticas, o pré processamento envolvido para a definição e preparação das simulações numéricas e o pós processamento onde são analisados os resultados obtidos e comparados com os resultados dos cálculos analíticos;

O capítulo 5 revela as conclusões do presente estudo e faz referência a trabalhos futuros.

## 2 Metodologia

### 2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático com as equações usadas para resolver o problema e o modelo numérico usado para resolver as equações citadas.

De forma criar uma ferramenta de cálculo analítica sem necessidade de recorrer a métodos de cálculo complexos estudou-se uma simples equação que visa englobar todos os casos de estudo propostos recorrendo a coeficientes de pressão e aproximações de áreas de projeção.

### 2.2 Modelo Matemático

#### 2.2.1 Equações do Eurocódigo

A Parte 1-4: Ações Gerais / Ações do Vento do Eurocódigo 1 estuda os efeitos do vento sobre superfícies e a situação de interesse para o presente estudo inicia-se no capítulo 7.3 – Coberturas Isoladas. De forma a obter resultados possíveis de serem comparados com as simulações numéricas, foi usado o seguinte método:

#### Ações do Vento – Procedimento de Cálculo

- Pressão dinâmica de pico,  $q_p$
- Pressão do vento em superfícies: fachadas, apoios e elementos estruturais;
- Forças do vento  $F_w$  nas estruturas: considerar efeitos globais do vento;

#### Velocidade do Vento e Pressão Dinâmica:

- Valores básicos:
  - Os valores fundamentais da velocidade básica do vento,  $v_{b,0}$  é a velocidade característica da velocidade média num período de 10 minutos;
  - Independentemente da direção do vento e época do ano;
  - Ao nível do solo, acima de 10m em terreno campo aberto, com vegetação baixa como grama e obstáculos isolados com separações de alturas (categoria II).

(As categorias do terreno podem ser consultadas no Anexo A)

- A velocidade básica do vento deve ser calculada de acordo com:

$$v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0} \quad (2.1)$$

Onde:

- $v_b$  é a velocidade base do vento a 10m do solo, para um terreno de categoria II;
- $v_{b,0}$  é a velocidade base fundamental do vento;
- $C_{dir}$  é o factor de direção (valor recomendado 1,0);
- $C_{season}$  é o factor de época (valor recomendado 1,0).

- Velocidade Média (sofre variação com a altura)

$$v_m(z) = C_r(z) \times C_0(z) \times v_b \quad (2.2)$$

Onde:

- $C_0(z)$  é o factor de orografia, tomado como 1;
- $C_r(z)$  é o factor de rugosidade;
- $C_r(z) = k_r \times \ln \frac{z}{z_0}$  para  $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ ;
- $C_r(z) = C_r(z_{min})$  para  $z \leq z_{min}$ ;
- $k_r = 0.19 \times \frac{z_0^{0.07}}{z_{0,II}}$ .

- Intensidade da Turbulência do Vento

- $I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{C_0(z) \times \ln z / z_0}$  para  $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ ;
- $I_v(z) = I_v(z_{min})$  para  $z \leq z_{min}$ .

- Pressão Dinâmica de Pico

- $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ;
- $C_e(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times C_r^2(z) \times C_0^2(z)$ ;
- $q_p = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = C_e(z) \times q_b$ ;
- $q_p = C_e(z) \times q_b = C_e(z) \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2$ .

Com os painéis fotovoltaicos inclinados a  $90^\circ$  foi utilizada uma abordagem para calcular os coeficientes de força e pressão para paredes isoladas, platibandas, vedações e painéis de sinalização:

- Afastados do solo numa altura  $z_g$  superior a  $h/4$ ;

$$c_f = 1,80$$

- Excentricidade horizontal a atuar no centro do painel:

$$e = \mp 0,25 \times b$$

- Caso altura ao solo  $z_g < h/4$  e  $b/h > 1$ , deverão ser considerados como paredes isoladas.

### 2.2.2 Equações possíveis para um cálculo simplificado

O regime turbulento continua a ser um tema da Mecânica dos Fluidos em constante progressão esperando-se que os avanços numéricos e computacionais tornem este tipo de análises mais acessíveis e fiáveis. Foram estudados alguns métodos de forma a tentar enquadrar o problema em estudo:

- **Arrasto e Sustentação**

Quando um corpo se move através de um fluido, a interação das forças que atuam na superfície do corpo pode ser descrita em função da tensão de corte ( $\tau_p$ ) existente na parede devido a efeitos viscosos e da tensão normal devido à componente da pressão ( $p$ ).

A componente da força resultante na direção do escoamento é denominada de Arrasto (D-“*Drag*”) e a força que atua na direção normal ao escoamento tem o nome de Sustentação (L-“*Lift*”). Estas forças podem ser obtidas pela integração das tensões de corte e das tensões normais à superfície:

$$D = \int dF_x = \int p \cos(\theta) dA + \int \tau_p \sin(\theta) dA \quad (2.3)$$

$$L = \int dF_y = \int p \sin(\theta) dA + \int \tau_p \cos(\theta) dA \quad (2.4)$$

Torna-se necessário conhecer as distribuições da  $\tau_p$  e  $p$  pela superfície. Por norma, é um processo bastante complicado obter tais equações. A distribuição da pressão pode ser obtida experimentalmente com a instalação de tomadas de pressão pela superfície mas a tensão de corte requer um processo diferente.

Como no presente estudo não são conhecidas tais equações, este método não foi considerado.



- **Equações de Navier-Stokes**

As três equações de Navier-Stokes combinadas com a equação da conservação da massa fornecem uma descrição matemática completa do escoamento incompressível de um fluido Newtoniano, visto que temos quatro equações e quatro incógnitas ( $u, v, w$  e  $p$ ).

-Direção x:

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

-Direção y:

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

-Direção z:

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

A complexidade dos cálculos das equações diferenciais de segunda ordem não lineares, impede a utilização corrente deste método. Nos casos onde é possível (escoamentos laminares e permanentes) obter soluções analíticas por esta via, obtêm-se resultados extremamente próximos dos dados experimentais.

Estas equações são válidas para um regime laminar ou turbulento. Os escoamentos turbulentos apresentam flutuações aleatórias ao longo do tempo dificultando a obtenção da solução pela via analítica.

Estas equações serão utilizadas nas simulações numéricas intitulando-se como *RANS* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). São feitas variações às equações iniciais permitindo a sua aplicabilidade a um vasto leque de situações.

- **Escoamento em torno de um cilindro (Bernoulli - Corpos de Rankine)**

Nesta aproximação consideramos o escoamento em torno de um cilindro. Obtemos a equação de função corrente:

$$\psi = Ursin(\theta) - \frac{Ksin(\theta)}{r} \quad K = Ua^2 \quad r = a \quad (2.9)$$

E a equação do perfil de velocidade:

$$\phi = Urcos(\theta) - \frac{Kcos(\theta)}{r} \quad (2.10)$$

As componentes do vetor velocidade do escoamento são:

$$v_{tangencial} = U\cos(\theta) \quad v_{radial} = -U\sin(\theta) \quad (2.11)$$

Estas equações mostram que a velocidade radial do escoamento é nula na superfície do cilindro e a velocidade tangencial vale:

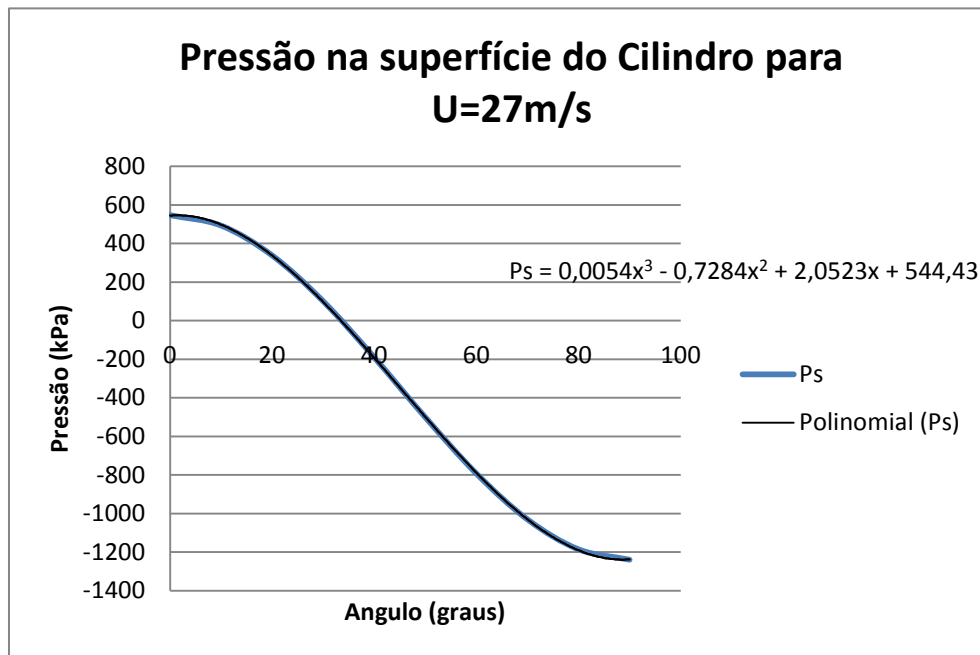
$$v_{\theta_s} = -2U\sin(\theta) \quad (2.12)$$

Retira-se que a velocidade máxima acontece em  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$  e é igual a  $2U$ .

A pressão na superfície do cilindro é traduzida por:

$$P_{sup} = P_0 + 0,5 * \rho * U^2 * (1 - 4 \sin(\theta)^2) \quad (2.13)$$

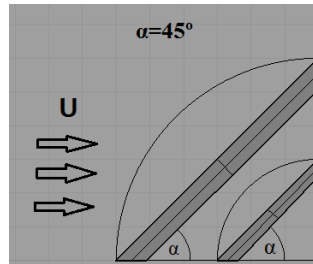
Variando  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , coincidindo os  $0^\circ$  com o início da placa e os  $90^\circ$  com o fim ( $1,65m$ ) podemos verificar graficamente como se distribui a pressão ao longo da superfície para uma velocidade do vento de  $27m/s$  (Portugal) pela Figura 2.1:



**Figura 2.1 - Pressão na Superfície do cilindro**

Existe uma componente de pressão com valores positivos e negativos e que se pode traduzir a equação do perfil de pressão, para esta velocidade, numa função polinomial de 3ª ordem, como indicado no gráfico.

O facto da forma geométrica do modelo considerado ser um cilindro faz com que a inclinação  $\alpha$  da placa seja sempre  $45^\circ$ , independentemente do valor do raio, como demonstra a Figura 2.2:



**Figura 2.2 - Demonstração da posição do painel fotovoltaico com o aumento do raio do cilindro**

Este método não preenche os requisitos necessários visto que a inclinação do painel fotovoltaico é um parâmetro de entrada fundamental e neste caso não pode ser variado.

- **Coeficiente de Arrasto  $C_D$**

É necessário uma solução analítica versátil que nos permita variar a velocidade do escoamento, ângulo do painel e a sua área.

Através do cálculo de coeficientes é possível interagir com todas variáveis numa equação. A equação 2.13 já mencionada devolve a distribuição da pressão na superfície do cilindro.

Esta equação pode ser trabalhada de forma a obtermos uma outra com a possibilidade de introduzir os parâmetros desejados e conseguir uma situação onde seja possível extrair uma força ou pressão equivalente.

Suprime-se a componente  $P_0$  de forma a obter pressões relativas:

$$P_{sup} = 0,5 * \rho * U^2 * (1 - 4 \sin(\theta)^2)$$

A componente da pressão é dada pelo termo  $0,5 * \rho * U^2$ . O termo que faz a pressão variar ao longo do cilindro,  $1 - 4 \sin(\theta)^2$ , está dimensionado para se conseguir calcular a pressão para qualquer ponto da superfície cilíndrica.

A aproximação a um cilindro traduz restrições já verificadas, vamos usar a componente da pressão mas, esta será multiplicada por um outro coeficiente  $C$ . Este coeficiente varia com o ângulo de inclinação do painel, visto que este modifica a área de projeção frontal, como demonstrado na figura XX. Por norma, são valores obtidos experimentalmente.



Desta forma, conseguimos obter a pressão equivalente a variar com a velocidade do vento e com a inclinação do painel fotovoltaico. Vem:

$$P_{sup} = 0,5 * \rho * U^2 * C$$

Se multiplicarmos pela área frontal  $A_{frontal}$  do painel obtemos a força equivalente:

$$F_{sup} = 0,5 * \rho * U^2 * A_{frontal} * C$$

Assim temos um coeficiente de arrasto que será a soma de dois componentes: Arrasto devido ao atrito e arrasto devido à pressão:

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp}$$

A equação final será:

$$F_{sup} = 0,5 * \rho * U^2 * A_{frontal} * C_D$$

Como já descrito anteriormente, qualquer objeto que se movimenta num fluido sofre um arrasto que se caracteriza por uma força paralela ao escoamento composta pelas forças de pressão e de corte que atuam na superfície do objeto. Desde que se conheçam as equações destas duas componentes, é possível determinar a força de arrasto. Como raros são os casos onde é possível serem determinadas sem ser experimentalmente, é com este mesmo método ou recorrendo a simulações computacionais que se obtém coeficientes de arrasto para serem tabelados. O coeficiente de arrasto é função de outros parâmetros adimensionais como número de Reynolds, Mach, Froude e rugosidade da superfície.

- *Arrasto devido ao atrito  $C_{Df}$*

O coeficiente local de atrito é um número adimensional que traduz a oposição entre um corpo e um fluido ao deslizar em relação um ao outro. São considerados os efeitos viscosos do fluido sobre as tensões de corte instaladas na superfície e a forma do objeto.

O arrasto devido ao atrito influencia de forma muito pouco significativa num escoamento de um fluido como o ar e com altos números de Reynolds. Numa força equivalente para uma superfície com uma área de um painel fotovoltaico, a componente do atrito poderá representar 7% do valor e, daí que nem sempre será considerado neste estudo.

- *Arrasto devido à Pressão  $C_{Dp}$*

O arrasto devido à pressão  $D_p$  é a parte do arrasto provocada diretamente pela distribuição da pressão sobre a superfície. Esta contribuição é extremamente dependente com o formato do objeto. É função da magnitude da pressão e da orientação da superfície onde esta atua. Teoricamente, a pressão numa placa paralela ao escoamento, independentemente da sua magnitude em nada contribui para o arrasto pelo facto da pressão ser normal à placa. Por outro lado, a força de pressão que atua perpendicularmente ao escoamento fornece todo o arrasto.

No nosso caso de estudo o  $C_{Dp}$  será a componente que mais contribuirá para a força de arrasto.

○ *Cálculo do  $C_D$*

Segundo os dados retirados do livro PRO - TEC [8] e segundo Bruce R. Munson [7], podemos usar um  $C_D$  por aproximação da área de projeção vertical a uma placa plana vertical.

Desta forma, ligando este parâmetro à fórmula alcançada, podemos tabelar valores em função do ângulo de inclinação e velocidade do escoamento e comparar com a resolução das equações seguintes.

**2.2.3 Equações do modelo de turbulência k-epsilon padrão**

Um dos modelos de turbulência mais proeminentes, o modelo *k-epsilon* (k-ε), é considerado o modelo padrão da indústria de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Este revelou-se estável e numericamente robusto. Para as simulações de uso geral, o modelo oferece um bom compromisso em termos de precisão e robustez.

O princípio de conservação para as equações da massa e da quantidade de movimento dão origem as equações de continuidade XX e de conservação da quantidade de movimento XX:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0$$

$$\frac{\partial \rho U_t}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M$$

O modelo k-ε é baseado em duas equações de transporte modeladas: A equação da energia cinética turbulenta (k) XX e a equação da dissipação da energia cinética XX.

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

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

Onde:

$G_k$  - Produção de energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes e é calculado pela equação XX:

$$G_k = -\rho \overline{v_i' v_j'} \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$G_b$  - Produção de energia cinética de turbulência devido à flutuação;

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

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  - Constantes;

$\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  - Número de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respetivamente;

$S_k$  e  $S_\varepsilon$  - Parâmetros definidos pelo utilizador.

A modelação da viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$$

As constantes enunciadas assumem os seguintes valores:

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

Estes valores são considerados por defeito numa análise seguindo o modelo k- $\varepsilon$ . Funcionam com precisão aceitável para qualquer problema de escoamentos de fluidos. São passíveis de serem alteradas de forma a aumentar a precisão do método. Este modelo é um dos pertencentes ao método RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes* apresentado de seguida.

### 2.3 Método Numérico *RANS* para resolução do modelo matemático

Os modelos derivados do método *RANS* são a abordagem mais econômica para o cálculo de fluxos turbulentos. Exemplos típicos de tais modelos são o  $k-\varepsilon$  ou o  $K-\omega$ . Estes modelos simplificam o problema com a resolução de duas equações adicionais de transporte e introduzem a viscosidade de Eddy (viscosidade turbulenta) para calcular as tensões de Reynolds. Os modelos *RANS* mais complexos estão disponíveis para resolver individualmente uma das seis equações independentes de Stress de Reynolds. Os modelos *RANS* são adequados para muitas aplicações de engenharia e proporcionam tipicamente o nível de precisão pretendido, uma vez que nenhum modelo tem aceitação universal na comunidade científica. Mediante a precisão e duração do estudo pretendidos a escolha recairá para o modelo  $k-\varepsilon$ .

### 2.4 Conclusões

A equação do coeficiente de arrasto  $C_D$  foi utilizada para tabelar valores em função dos *parâmetros de entrada*. Foi assumida a equação visto ser função do ângulo do painel e da velocidade do escoamento e dispensar o conhecimento prévio das equações de distribuição de pressão e tensão de corte na superfície.

O modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão está definido para os termos do problema em estudo e será o modelo utilizado para a resolução numérica das equações de Navier-Stokes.

### 3 Definição do Problema

#### 3.1 Introdução

Pretende-se neste capítulo determinar e validar os parâmetros utilizados no caso de estudo.

Com esse intuito foi feita uma análise de sensibilidade dos vários parâmetros com vista a determinar a melhor combinação dos mesmos adequados ao problema em estudo.

Um problema relacionado com CFD pode ser dividido em três partes fundamentais:

##### 1. Pré processamento:

- Definição da geometria a analisar;
- Definição do domínio numérico onde o fluido escoar sobre a geometria placa plana;
- Definição das condições de fronteira para o volume numérico:
  - *Inlet*: Condição de entrada do fluido, nomeadamente o perfil de velocidade;
  - *Outlet*: Condição de saída do fluido;
  - *Wall*: Fronteira de parede do volume, onde a rugosidade influencia o regime do escoamento;
  - *Symmetry*: É usado quando a geometria física de interesse e o padrão do fluxo incorrem em simetria de condições.
- Divisão do domínio numérico em volumes de controlo – construção da malha. Foi utilizado o *software* ICEM CFD®.
- Definição dos parâmetros do escoamento de forma a adequar às condições de turbulência requeridas no modelo já especificado. Definição das características do fluido e velocidade.

##### 2. Computação Numérica:

- Resolução das equações acima modeladas que constituem o modelo matemático, as equações de continuidade e movimento (Navier Stokes) e de turbulência.

##### 3. Pós processamento:

- Representação do problema de forma gráfica e tratamento dos dados obtidos de forma a tornar os resultados facilmente inteligíveis.

#### 3.2 Descrição do problema

O problema proposto consistiu em analisar os efeitos do vento sobre os painéis fotovoltaicos. Para um escoamento turbulento existem uma série de variáveis que tornam o cálculo analítico inviável.

Recorrendo ao *software* ANSYS FLUENT®, foi possível modelar o nosso problema e extrair resultados numéricos próximos dos analíticos, como distribuições escalares e vetoriais de pressão e velocidade ao longo do volume de controlo. É ainda possível obter distribuição de pressão numa superfície e obter a força equivalente da mesma na superfície. (centro de



gravidade é obtido em pós-processamento). Estas funcionalidades são uma pequena amostra do potencial deste *software*.

Analisando estes resultados, é possível compreender os fenômenos que regem o dimensionamento de estruturas e com isso otimizar este processo, conferindo uma maior competitividade ao produto garantindo a integridade estrutural.

### 3.3 Definição de variáveis

O problema apresentado reflete-se num seguidor fotovoltaico de solo a dois eixos:

- Um eixo - Movimento Azimutal (Este-Oeste):  
Ajusta a posição do painel para manter a perpendicularidade à posição do sol ao longo do dia;
- Dois eixos - Movimento Azimutal e Zenital (Norte-Sul):  
Ajusta a posição do painel para manter a perpendicularidade à posição do sol ao longo do dia e do ano;

Considerando que o painel irá estar instalado com a inclinação azimutal de  $30^\circ$  e o escoamento terá uma velocidade a variar entre 10 e 60 m/s.

Definindo:

- Velocidade do ar ( $V_0$ ): 10, 30 e 60 [m/s];
- Inclinação azimutal do painel:  $30^\circ$ ;
- Altura ao solo ( $H_0$ ): 0,75 m;
- Direção do vento:  $0^\circ$ ;
- Dimensões painel fotovoltaico: 0,980 m x 1,640 m x 0,035 m;
- Área painel fotovoltaico:  $1,61\text{m}^2$ ;
- # de painéis: 1 na vertical;

### 3.4 Cálculos preliminares

#### 3.4.1 Eurocódigo

Através dos procedimentos de cálculo descrito em 2.2.1 para o dimensionamento estrutural do vento a  $0^\circ$  e usando um  $C_D = 3,4$  foi possível a força resultante aplicada a um painel fotovoltaico como demonstra a **tabela XX**:

$V(\text{m/s}) \backslash \text{Alfa}(\text{graus})$	$30^\circ$	
10	170,0	<b>N</b>
30	1490,0	
60	6980,0	

### 3.4.2 Equação do Coeficiente de Arrasto $C_D$

A tabela XX apresenta a resolução analítica para a eq. XX com o vento a  $0^\circ$ , variando a velocidade do escoamento mas mantendo a inclinação do painel a  $30^\circ$ :

$V(m/s) \backslash \text{Alfa}(graus)$	$30^\circ$	
10	173,5	<b>N</b>
30	1561,8	
60	6247,3	

Estes valores serão utilizados para comparação com as simulações numéricas e poderão sofrer correções de forma a serem validados.

## 3.5 Pré processamento

### 3.5.1 Definição da Geometria

A geometria foi criada a partir do *software* Rhinoceros® em 2D. O tamanho da placa a analisar é o equivalente ao comprimento de um painel fotovoltaico,  $L = 1,64 \text{ m}$ , com uma espessura de  $b = 0,035 \text{ m}$ . Devido ao parâmetro  $\alpha$ , foi necessário criar cinco ficheiros *STEP* com as diferentes inclinações requeridas.

### 3.5.2 Definição do Domínio Numérico

A geometria do volume de controlo não pode influenciar os dados recolhidos na superfície do painel. Desta forma, vem:

- Tipo de geometria: Quadrilátero;
- Comprimento ( $c$ ):  $c \approx 12 * L \approx 20m$ ;
- Altura ( $h$ ):  $h \approx c/2 \approx 10m$ .
- Distância do início do volume à placa:  $4m$ ;
- Altura da base do volume ao painel ( $h_0$ ):  $0,075m$ ;

As arestas deste volume permitem criar as condições de fronteira e delimitar a zona de escoamento.

### 3.5.3 Definição das Condições de Fronteira

O *software* utilizado para a atribuição das condições de fronteira e geração da malha de elementos finitos foi o ICFM CFD®.

Nesta secção atribui-se às arestas obtidas, o seu comportamento na análise:

- Entrada do vento: *velocity\_inlet* (onde vamos variar as velocidades do vento);
- Saída do vento: *outflow* (condição atmosférica);
- Topo/base do domínio: *wall* (condição de parede);

- Superfície superior e inferior do painel: *wall*.

#### 3.5.4 Definição da Malha

Com o volume atribuído, foi utilizado o *software* ICEM CFD<sup>®</sup> para definir o tamanho e disposição dos elementos finitos com uma qualidade superior aos métodos automáticos para geração da malha disponíveis. Assim, reduz-se o custo computacional e aumenta-se a precisão dos resultados.

Desta forma, vamos definir quatro malhas diferentes:

- Nível 1 (R1):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0.4 x 0.4 [m];
  - Aproximadamente 4114 nós;
- Nível 2 (R2):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0,4 x 0,4 [m];
  - Refinamento Nível 3 na área adjacente ao painel;
  - Aproximadamente 5622 nós;
- Nível 3 (R3):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0,4 x 0,4 [m];
  - Refinamento Nível 3 na área adjacente ao painel;
  - Refinamento Nível 3 horizontal e vertical na linha da placa em todo o domínio;
  - Aproximadamente 9868 nós;
- Nível 4 (R4):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0,2 x 0,2 [m];
  - Refinamento Nível 3 na área adjacente ao painel;
  - Refinamento Nível 3 horizontal e vertical na linha da placa em todo o domínio;
  - Aproximadamente 43262 nós;
- Nível 5 (R5):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0,1 x 0,1 [m];
  - Refinamento Nível 3 na área adjacente ao painel;
  - Refinamento Nível 3 horizontal e vertical na linha da placa em todo o domínio;
  - Aproximadamente 111151 nós;
- Malha gerada de forma automática (para comparação com Nível 4) (R6):
  - Dimensão dos elementos quadrados: 0,1 x 0,1 [m];
  - Refinamento Nível 3 na área adjacente ao painel;
  - Refinamento Nível 3 horizontal e vertical na linha da placa em todo o domínio;
  - Aproximadamente 61197 nós;

A última malha foi criada de forma automática pelo ICEM CFD<sup>®</sup> de forma a comparar a precisão dos resultados e verificar se a redução do tempo requerido para esta operação justifica os dados obtidos.

Antes de cada simulação, a malha foi adaptada para corresponder a um  $Y_{plus}$  entre 30 e 60 como indica o estudo realizado por Salim .M. Salim e S.C. Cheah [1].

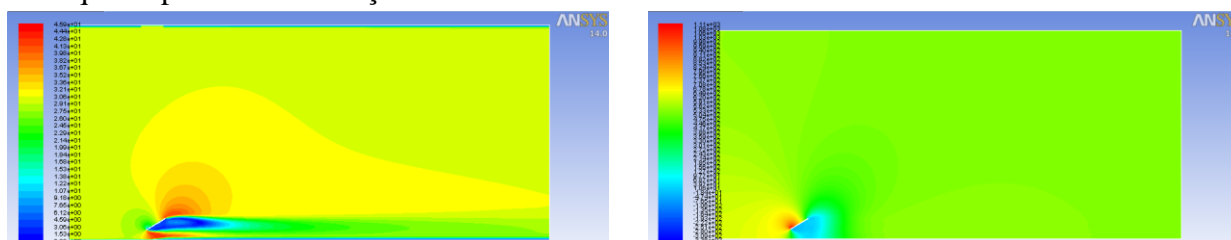
As simulações foram realizadas tendo em conta a capacidade do computador utilizado com as seguintes características:

CPU: Intel Core2Quad Q8400 @ 2670Mhz; RAM: Kingston 8Gb DDR2 800Mhz Dual Channel; HDD: Samsung 320Gb Sata II; GPU: nVidia 8500 GT; Motherboard: Asus P5QL-PRO Skt 775.

### 3.6 Pós processamento

#### 3.6.1 Análise do Domínio Numérico

Como demonstram os resultados gráficos da **figura XX** da pressão e da velocidade do escoamento para o caso mais crítico, 60m/s, o domínio foi corretamente dimensionado uma vez que se permite a formação da esteira no domínio considerado.



É possível verificar que o escoamento junto à fronteira superior ocorre em condições semelhantes às condições de admissão no *inlet* e desta forma não influencia os efeitos no painel.

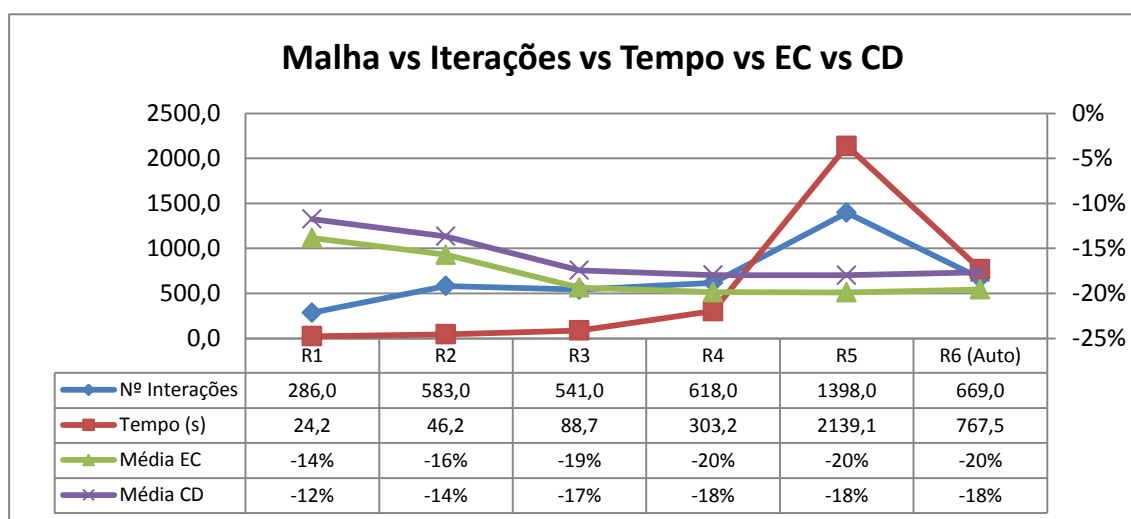
#### 3.6.2 Análise da Malha

Os sucessivos refinamentos da malha inicial traduzem valores que tendem a convergir até um limite em que o custo computacional não justifica a precisão obtida. Visto que as malhas foram criadas de forma manual e controlada, conseguimos convergências rápidas e precisas desde a primeira análise. Pela **tabela XX** é possível concluir que o refinamento R4 é o mais apropriado para a resolução do problema.

Análise	Média CD	Média EC	Nº Interações	Tempo (s)	Tempo Total (min)	Nós	Aumento Custo Computacional	
							em relação a R1	em relação a Ri-1
R1	-12%	-14%	286,0	24,2	0,4	4114	-----	-----
R2	-14%	-16%	583,0	46,2	0,8	5622	2	2
R3	-17%	-19%	541,0	88,7	1,5	9686	4	2
R4	-18%	-20%	618,0	303,2	5,1	29262	13	3
R5	-18%	-20%	1398,0	2139,1	35,7	111151	88	7
R6 (Auto)	-18%	-20%	669,0	767,5	12,8	61197	32	-3
Totais	-16%	-18%	4095,0	3368,9	56,1	221032,0	-----	-----

O custo computacional de R4 é sete vezes superior ao de R3. Este facto traduz-se numa análise que poderá ser concluída em cinco minutos ao invés de trinta e cinco minutos com uma precisão semelhante.

Analisando o **gráfico XX** verifica-se que a divergência de valores em relação ao Eurocódigo estabiliza nos -20% a partir de R4.



Relativamente à malha R6 Automática, embora a resultante da força aplicada ao painel seja equivalente às outras análises, pode-se verificar pelo **anexo XX** que esta análise prevê uma força no topo do painel inferior compensada por uma força superior na base. Desta forma não iremos considerar uma geração automática da malha automática visto que se pretende compreender os efeitos existentes em cada superfície.

Desta forma, o nível de refinamento R4 foi o escolhido para as próximas análises.

### 3.6.3 Análise de Resultados

Os resultados apresentados no **anexo XX** demonstram, numa análise preliminar, que as simulações computacionais traduzem resultados com menores cargas em relação a um dimensionamento realizado pelo Eurocódigo.

Para velocidades do vento baixas foram obtidos valores semelhantes entre os diferentes tipos de método. Conforme a velocidade do escoamento vai aumentando, o Eurocódigo resulta em valores orientados para o lado da segurança.

Numa análise preliminar, foi possível, portanto, reduzir a carga cerca de 37% em relação aos valores do Eurocódigo para casos onde as forças envolvidas são elevadas.

Os valores obtidos pelo cálculo analítico através da **equação do CD XX** são semelhantes aos resultados do Eurocódigo.

### **3.7 Conclusões**

Este primeiro contacto com o ANSYS FLUENT® foi importante para conhecer o seu funcionamento e optar pelas melhores escolhas dos parâmetros para as próximas análises.

A dimensão do domínio numérico arbitrado foi corretamente dimensionada visto não afetar o desenvolvimento do escoamento na placa.

O nível de refinamento escolhido para a simulação numérica foi o R4, visto o incremento de elementos finitos não trazer melhor precisão de resultados e aumentar sete vezes o custo computacional, algo que se pretende evitar dado o foco na redução de custos.

Os valores das cargas obtidas pelo Eurocódigo e pela equação da força de arrasto foram superiores aos resultados das forças das simulações numéricas, independentemente da malha utilizada.

## 4 Resolução do problema

### 4.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se a resolução do problema proposto que é tema da dissertação. Após a validação do modelo numérico a ser utilizado, analisam-se os efeitos do desenvolvimento do escoamento sobre os painéis fotovoltaicos para os diferentes casos requeridos.

### 4.2 Definição de variáveis

Adequando a simulação numérica às condições onde se poderá aplicar um seguidor fotovoltaico podemos distinguir as variáveis como:

- Velocidade do ar ( $V_0$ ): 10, 20, 30 (velocidade máxima de dimensionamento em Portugal pelo EC) e 60 [m/s];
- Inclinação azimutal do painel ( $\alpha$ ): 0° (posição de segurança), 10°, 20°, 30° e 90°;
- Altura ao solo ( $h_0$ ): 0,750 m;
- Direção do vento: 0°, 180°;
- Orografia: Zona plana e horizontal com vegetação insignificante e sem obstáculos;
- Dimensões painel fotovoltaico: 0,980 x 1,640 x 0,035 [m];
- Área painel fotovoltaico: 1,61m<sup>2</sup>;
- # de painéis: 2 na vertical;

### 4.3 Cálculos analíticos

#### 4.3.1 Eurocódigo

Para o dimensionamento estrutural do vento a 0° e a 180°, temos as seguintes forças aplicadas:

#### **EC – Força resultante para vento a 0°**

V (m/s) \ $\alpha$	0 °	10 °	20 °	30 °	90 °	
10	60	140	220	350	496	
20	220	550	880	1410	1985	<b>N</b>
30	540	1360	2180	3480	4903	
60	2080	5200	8330	13310	18734	

#### **EC – Força resultante para vento a 180°**

V (m/s) \ $\alpha$	0 °	10 °	20 °	30 °	90 °	
10	-140	-250	-360	-530	496	
20	-550	-990	-1430	-2120	1985	<b>N</b>
30	-1360	-2450	-3540	-5230	4903	
60	-5200	-9370	-13530	-19970	18734	

Para o caso de 90°, a resultante da força é a mesma para as duas direções do vento mudando apenas a superfície respetiva onde é aplicada.

## FALTAM AS DISTRIBUICOES GRAFICAS DO EC

### 4.3.2 Equação do Coeficiente de Arrasto $C_D$

A resolução da eq. XX conforme as condições do problema proposto estão descritas na tabela XX:

$$F_{CD} = 0,5 \times \rho \times V^2 \times A_{frontal} \times C_D$$

V(m/s)\Alfa(graus)	0	10	20	30	90	
10	60,0	125,8	240,5	347,8	502,3	
20	240,1	503,2	961,9	1391,4	2009,0	<b>N</b>
30	540,2	1132,1	2164,2	3130,6	4520,3	
60	2160,9	4528,4	8656,9	12522,3	18081,0	

Para 0°, visto que a área de aproximação nula, foi considerada a espessura do painel (0,035m \* 0,980m) o que produz um erro significativo. Para que os valores possam ser comparados, o  $C_D$  adquire um valor igual a 28, situação que não está contemplada na bibliografia.

Para a inclinação de 90°, segundo Bruce R. Munson [7], temos uma placa vertical com escoamento perpendicular sem recorrer a aproximações anteriormente consideradas. Neste caso iremos considerar  $C_D = 2,5$ .

Os restantes valores foram obtidos com um  $C_D = 3,4$ , por aproximação a uma placa plana.

**Todos os cálculos podem ser verificados em ficheiro anexo a esta dissertação.**

## 4.4 Pré processamento

### 4.4.1 Definição da geometria, domínio e malha

A placa analisada tem o comprimento de dois painéis fotovoltaicos, 3,28 m, mantendo a espessura de 0,035 m.

O domínio foi calculado em função do comprimento da placa. Desta forma, vem:

- Tipo de geometria: Quadrilátero;
- Comprimento: Aproximadamente 12x superior ao comprimento do painel → 30 m;
- Altura: Metade do comprimento → 15 m.
- Distância do início do volume à placa: 6 m;
- Altura da base do volume ao painel ( $h_0$ ): 0,075 m;

O refinamento escolhido foi o de nível 4, R4 e as condições de fronteira são as designadas em 3.5.2.



Foi preparada, também, uma análise para três seguidores com  $h_0 = 0,75m$  em sequência. Estes seguidores estão distanciados por um ângulo de  $15^\circ$  que evita a sombra sobre os painéis a jusante (ângulo de sombreamento). Em concordância, para um comprimento dos painéis igual a  $3,28m$  inclinados a  $30^\circ$  perfaz uma distância entre seguidores de  $6,12m$ .

#### 4.4.2 Definição do Perfil de Velocidades

Por norma, a velocidade do vento aumenta numa proporção não linear com o aumento da distância ao solo até uma zona de fluxo livre onde a velocidade deixa de ser perturbada pela superfície (rugosidade aerodinâmica do solo) [2]. É consequência dos efeitos de atrito e tensões de corte provocadas pela geometria e rugosidade do terreno. Esta lei pode ser definida por:

$$\frac{U_{Z_r}}{U_{Z_n}} = \left(\frac{Z_r}{Z_n}\right)^\alpha$$

Em que  $U_{Z_r}$  e  $U_{Z_n}$  são valores de velocidade médias correspondentes, respectivamente, a uma altura  $Z_r$  e a uma altura referência  $Z_n$  [11].

Segundo Miguel Lopes (2008), de forma a obter uma maior intensidade do escoamento sobre os painéis em terreno livre visto a pequena altura dos seguidores consideramos a potencia que depende da rugosidade aerodinâmica do terreno  $\alpha = 0,16$  e  $Z_n = 260$ .

#### 4.4.3 Definição da Intensidade Turbulenta

A intensidade turbulenta, também conhecida por nível de turbulência, traduz-se pelo rácio entre a raiz quadrada média das velocidades turbulentas (em x, y e z),  $u'$ , e pela média das velocidades do fluxo (em x, y e z),  $U$ .

$$I = \frac{u'}{U}$$

Um valor aproximado para este parâmetro para um escoamento de alta turbulência pode variar entre 5 e 20%. O valor assumido foi de 10% conforme a informação do sítio CFD-Online [10].

#### 4.4.4 Definição do Rácio de Viscosidade Turbulenta

O Rácio de Viscosidade Turbulenta,  $\mu_t/\mu$ , em que  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $\mu$  representa a viscosidade laminar, é diretamente proporcional ao Numero de Reynolds turbulento. Para altos Números de Reynolds em escoamentos internos este rácio tem um valor geralmente alto mas para escoamentos externos assume valores baixos. Pode-se definir este parâmetro usando:

$$1 < \frac{\mu_t}{\mu} < 10$$

No modelo k- $\epsilon$  escolheu-se o valor de 10, visto que abaixo deste os modelos não convergiram após as simulações realizadas no capítulo 3.

#### 4.4.5 Controlo dos Limites da Solução

O *software* ANSYS FLUENT<sup>®</sup> aplica valores limite para a pressão, temperatura e turbulência. Estes limites têm a função de manter a estes parâmetros dentro de valores aceitáveis, prevenindo assim, que se tornem valores excessivamente baixos, no caso da pressão ou temperatura, ou altos para o caso da turbulência. Geralmente não é necessário alterar os valores por defeito, mas como para os casos com maior velocidade do escoamento temos altos Números de Reynolds, o parâmetro Rácio Máximo da Viscosidade Turbulenta foi alterado. Segundo Frank M. White [6] um valor realista para a transição para turbulento equivale a  $5 * 10^5$ , que por si só já é superior ao limite aplicado pelo FLUENT<sup>®</sup>.

Para determinar este rácio foi usada a função do FLUENT<sup>®</sup> *Isovalue Adaption* que rastreia as células que adquirem valores próximos dos limites definidos e optou-se por alterar o valor de  $1 * 10^5$  (por defeito) para  $1 * 10^7$ .

#### 4.4.6 Definição dos Valores Residuais e do $Y+$

No fim de cada iteração, a soma residual para cada uma das variáveis conservadas é calculada e armazenada. De modo a que a precisão das soluções obtidas aumentasse foi necessário reduzir os valores residuais para as iterações. Por defeito, o FLUENT<sup>®</sup> considera  $10^{-4}$  mas este valor foi alterado para  $10^{-6}$  visto que o aumento do custo computacional e aparecimento da instabilidade da resolução numérica não traduziu uma precisão significativa em relação a um residual mais pequeno.

A função  $Y+$  representa um número adimensional semelhante ao número de Reynolds local que determina se as influencias nos elementos finitos adjacentes a uma *wall* são laminares ou turbulentas, referindo a parte da camada limite turbulenta que a função resolve. Para que seja executado com qualidade e precisão é necessário que a malha construída use um nível de refinamento adequado nas zonas adjacentes a uma parede.

Segundo um estudo realizado por Mohd Ariff, Salim M. Salim e Siew Cheong Cheah (2009), é indicado que para escoamentos totalmente turbulentos os valores de  $Y+$  devem seguir o seguinte intervalo:

$$30 < y^+ < 300$$

Desta forma, a qualidade da malha terá que satisfazer este critério para que a convergência da solução numérica seja atingida com estabilidade.

## 4.5 Pós processamento

### 4.5.1 Análise dos Perfis de Pressão

A tabela XX apresenta os dados obtidos após as simulações numéricas. Estes dados foram tratados de forma a Escalar os valores de forma a poder compará-los independentemente da grandeza dos mesmos.

Os relatórios extraídos do FLUENT<sup>®</sup> com distribuição da pressão na parte superior e inferior da placa, assim com o cálculo da resultante da pressão encontram-se em **ficheiro anexo XX** a esta dissertação.

	Inclinação Painel	Velocidade Vento	Pressão (Pa) x=0m	Pressão (Pa) x=3,28m	Força Resultante (N)	Centro de gravidade (m)
Vento a 0 graus		60m/s	9387,3	2317,7	29294,0	
		30m/s	2351,0	588,7	7329,9	
		20m/s	1047,7	265,2	3263,0	1,49
	90 graus	10m/s	264,2	68,5	820,7	45%
		60m/s	5398,0	29,3	9305,2	
		30m/s	1362,4	6,5	12342,5	
		20m/s	610,4	3,2	1048,4	1,11
	30 graus	10m/s	156,4	0,8	267,6	34%
		60m/s	4598,8	-466,8	6490,7	
		30m/s	1165,9	-112,4	1658,4	
		20m/s	525,0	-48,3	752,0	1,03
	20 graus	10m/s	136,2	-11,1	198,1	31%
		60m/s	3448,2	-564,2	4230,9	
		30m/s	842,5	-138,2	1058,3	
		20m/s	358,5	-53,6	453,6	0,95
	10 graus	10m/s	90,6	-14,1	113,9	29%
	60m/s	-129,5	50,7	-141,9		
	30m/s	-35,4	12,7	-40,2		
	20m/s	-16,5	5,7	-19,2	0,42	
0 graus	10m/s	-4,4	1,4	-5,4	13%	
Vento a 180 graus		60m/s	-1365,0	-2577,1	-11991,4	
		30m/s	-369,5	-1480,9	-3097,9	
		20m/s	162,1	-336,2	-1372,7	1,94
	30 graus	10m/s	-38,8	-166,0	-335,8	59%
		60m/s	-867,4	-4963,1	-9567,2	
		30m/s	-211,9	-1259,3	-2398,6	
		20m/s	-92,7	-396,8	-1070,0	2,03
	20 graus	10m/s	-22,1	-147,2	-271,0	62%
		60m/s	392,0	-4881,0	-6719,3	
		30m/s	108,1	-1252,3	-1704,2	
		20m/s	51,6	-566,8	-764,4	2,27
	10 graus	10m/s	14,7	-146,8	-194,3	69%

Todas as distribuições foram aproximadas a uma equação linear de primeira ordem (anexo E) aplicada a parte superior da placa com o fim de simplificar a inserção destas mesmas equações num programa de simulação estrutural e tornar mais rápido a comparação com o Eurocódigo.

A tabela XX apresenta a pressão de entrada e saída na placa para uma determinada inclinação e velocidade do vento.

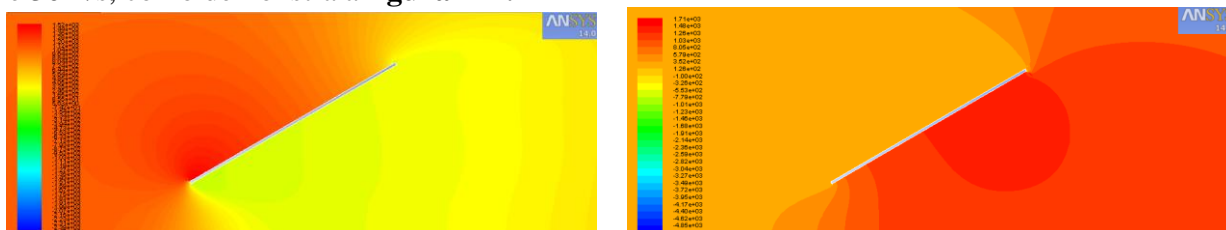
Numa primeira análise verificou-se que não existe linearidade entre os valores da pressão de entrada e saída para diferentes inclinações. Por exemplo, para 90 graus, a razão entre a entrada e saída foi aproximadamente 4. Já para 30 graus, essa razão passou para 200 e para 20 graus voltou para -10. Por ser um escoamento turbulento será complicado generalizar todos os efeitos que o vento provoca no painel.

Para o vento a 0 graus, a pressão de entrada foi sempre superior à de saída o que provocou uma alteração no ponto de aplicação da força resultante, como será descrito no ponto seguinte. Para a placa a 10 e 20 graus a pressão apresentou valores negativos no final do seu

comprimento. Já para a placa a 0 graus, a pressão passou a negativo na entrada já que não existe um ângulo de ataque ao escoamento. Para qualquer caso existe uma pressão em direção ao solo.

Para o vento a 180 graus, as pressões são maioritariamente negativas sendo superiores para o final do seu comprimento (3,28m). Novamente, não existe linearidade entre a pressão de entrada e saída para os diferentes ângulos. Quanto maior a inclinação do painel mais uniforme será a distribuição da pressão. Quando a inclinação baixa dos 20 graus, a distribuição da pressão (aproximada a uma equação polinomial de 2ª ordem) ao longo da placa sofre um ponto de inflexão, novamente devido à característica turbulenta do escoamento e à forma rombuda do objeto. Este ponto de inflexão provoca um momento com um determinado ponto de aplicação que terá que ser considerado numa análise estrutural. Nesta situação, a ação do vento provoca um efeito de sustentação no painel semelhante a um perfil alar.

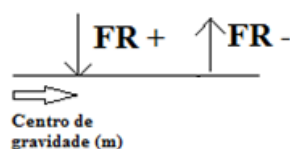
Visualmente a pressão caracteriza-se, a título exemplificativo, para uma inclinação de 30 graus e 30m/s, como demonstra a **figura XX**:



No **anexo XX** encontra-se as figuras relativas aos outros casos de estudo.

#### 4.5.2 Análise das Forças Aplicadas e Centro de Gravidade

Foi calculada uma força resultante para cada caso, assim como o seu sentido e o seu ponto de aplicação. A direção é sempre perpendicular à placa independentemente do ângulo. Todos os cálculos intermédios encontram-se em anexo no **ficheiro XX**. Considera-se:



A **tabela XX** demonstra os resultados obtidos assim como uma visualização gráfica da relação entre as grandezas.

A força resultante aplicada diminui com a diminuição do ângulo e com a diminuição da velocidade do escoamento. Os valores mais elevados obtêm-se para a velocidade de 60m/s, como seria previsível.

Para 0 graus, pelo facto da pressão ser superior na base do painel devido à proximidade ao solo, existe uma força que resulta em sustentação.

Utilizando os mesmos ângulos e variando a orientação do vento obtemos, em módulo, forças resultantes superiores para o vento a 180 graus.

Após o tratamento dos dados verificou-se que existe um padrão no decréscimo do valor da resultante conforme o decréscimo da velocidade, independentemente da inclinação do painel.

A **tabela XX** descreve a razão do aumento da força resultante relativamente à velocidade do escoamento mais baixa:

Razão	Velocidade (m/s)
1	10
4	20
9	30
34	60

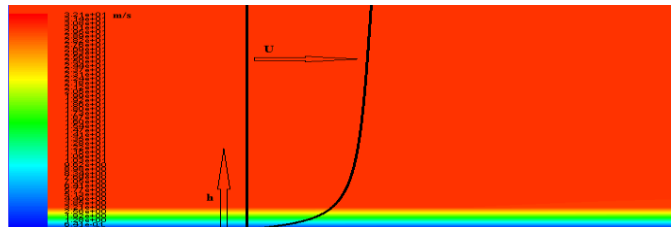
O valor da resultante para 60m/s aumenta, em média, 34 vezes relativamente ao valor da resultante para 10m/s.

Para o vento a 0 graus, o centro de gravidade da força equivalente para uma inclinação dos painéis a 10, 20 e 30 graus está aplicado a  $\frac{1}{3}$  do comprimento total, em média. Já para o escoamento a 180 graus o ponto de aplicação passa para  $\frac{2}{3}$ .

Na inclinação de 90° o centro de gravidade está aplicado abaixo 5% do centro do comprimento total dos painéis devido às equações de aproximação da pressão de 1ª ordem consideradas e devido à altura ao solo ser de 0,75m o que provoca um aumento da velocidade do escoamento entre a placa e o solo e um aumento de pressão no painel na área adjacente ao solo, sucessivamente.

#### 4.5.3 Análise dos Perfis de Velocidade

A velocidade segue um perfil potencial como já demonstrado em 4.4.2 e podemos verificar este facto graficamente através da **figura XX** que representa a velocidade do fluido em escoamento já desenvolvido no domínio numérico utilizado:



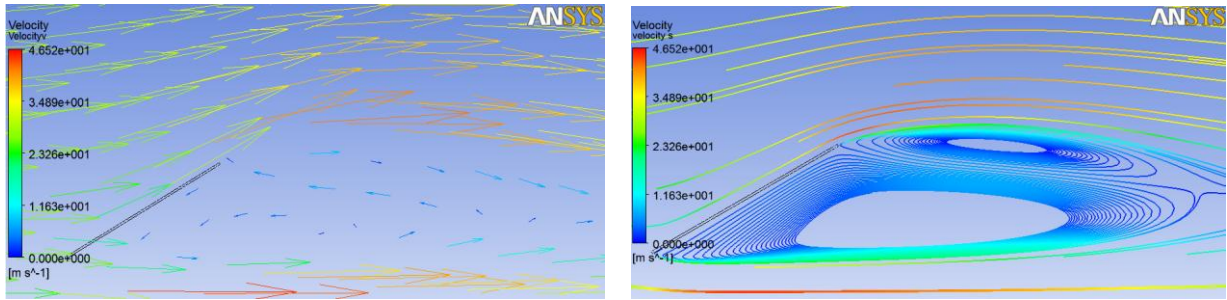
A condição de *wall* na base do domínio numérico, onde foi considerada uma rugosidade baixa, obriga a que a velocidade se aproxime de zero (visível pela escala de cores na imagem supracitada) junto à parede e conforme o afastamento do solo a velocidade aumenta até atingir a velocidade do vento considerado na simulação em causa.

Desta forma conseguimos obter alta intensidade do escoamento já na altura dos painéis e obter resultados para situações extremas.

Fazendo uma análise vetorial através da figura XX podemos observar as diferentes direções que o escoamento adquire ao longo do domínio.

Para a velocidade de entrada na placa foi considerada a velocidade inicial atribuída ao vento e a velocidade de saída, até inclinações dos painéis inferiores a 45°, foi generalizada pela expressão:

$$U_{max} = \frac{3}{2} * U_0 [m/s]$$



Para inclinações próximas dos 90°, a velocidade máxima que contorna a placa também pode ser generalizada por:

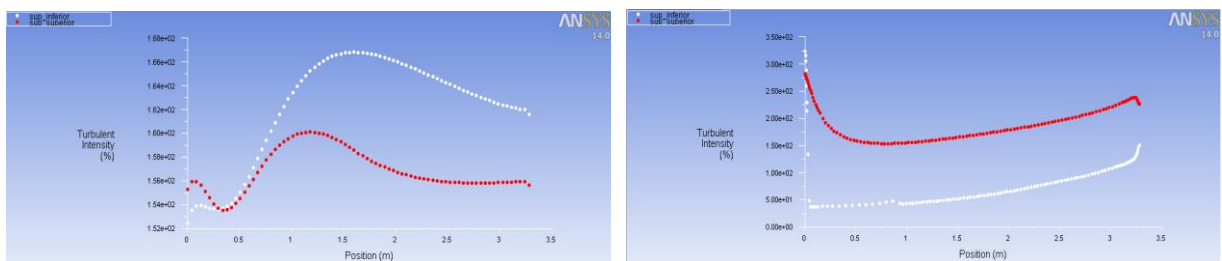
$$U_{max} = 2 * U_0 [m/s]$$

Foi possível verificar que existem vórtices a jusante do painel e mediante a velocidade do escoamento, visto que existem forças viscosas [3], podem existir separações da camada limite a montante, como representado na **figura XX**. A velocidade do escoamento na zona sob o painel aproxima-se de zero durante um determinado comprimento dependente da velocidade do vento e outros fatores da análise. Este ponto será explicado no ponto 4.5.4.

Outras figuras podem ser consultadas no **Anexo G**

#### 4.5.4 Análise da Turbulência

De forma a analisar a Intensidade de Turbulência (*IT*) no painel podemos recorrer à **figura XX** onde está representada a diferença entre este fator para a superfície superior e inferior do painel:

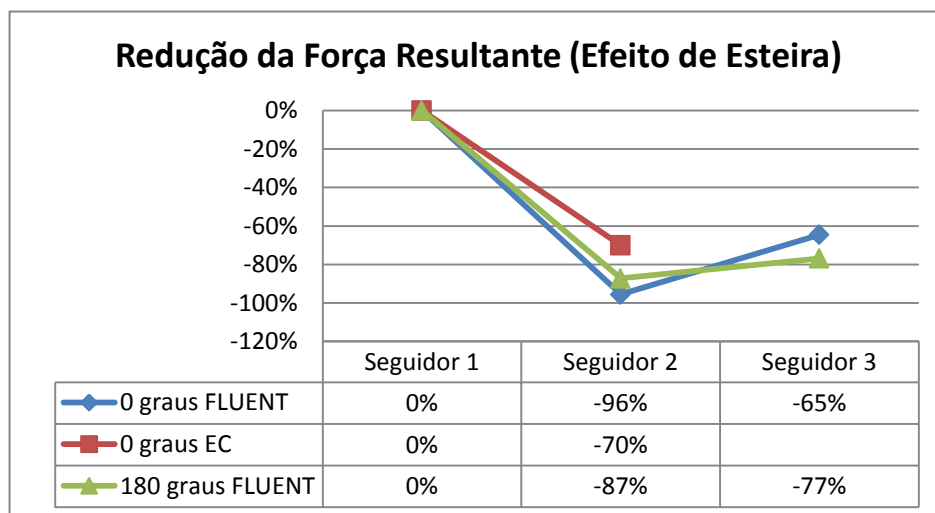


À esquerda temos representado o caso da IT para uma placa inclinada a 0° e à direita para 30°. Independentemente da velocidade do escoamento é importante salientar que para 0° existe maior percentagem de IT para a superfície inferior devido à proximidade da placa ao solo e o consecutivo aumento da velocidade do fluido, como se se tratasse de um escoamento interior com um elevado Número de Reynolds. A IT também aumenta ao longo do comprimento da placa. Para uma inclinação de 30° a IT passa a ser superior no topo do painel havendo uma diferença de 100% para as duas faces. Valor que é superior aos 10% de diferença para o caso anterior. Este efeito será justificado em 4.5.5. Para as inclinações intermédias os resultados encontram-se dentro destes dois casos, dependendo do ângulo.

#### 4.5.5 Verificação Efeitos Não Lineares

- *Efeitos de Esteira*

Foram realizadas simulações para 30 e 60m/s de forma a verificar se a velocidade do escoamento iria influenciar o comportamento da esteira existente. Em percentagem, a redução que a esteira apresenta nas forças resultantes sobre os painéis dos seguidores está representado na **figura XX**:



Os painéis do segundo seguidor sofrem uma redução da força de 90%, aproximadamente, encontrando-se numa zona de elevada turbulência e pressão negativa representado no Anexo C. Este valor é significativo em relação à força exercida nos painéis do primeiro seguidor.

O terceiro seguidor só pode ser analisado com o resultado numérico visto que o EC contempla o efeito da esteira para uma segunda estrutura apenas.

Com terceiro seguidor, a diferença reduz-se para 70%, aproximadamente. Deve-se ao afastamento deste seguidor em relação ao primeiro mas continua com um valor significativo.

Poder-se-ia estimar os valores para mais seguidores em sequência se considerarmos que a distância do terceiro para o primeiro seguidor é igual a 18 metros e temos uma redução de 70%, ou seja,  $\frac{1}{3}$  do valor inicial. Estimando que o efeito segue uma função linear, para o quarto seguidor, a redução do valor inicial seria igual a 40% e para o quinto seria igual 10%.

Numa aproximação mais concreta, a percentagem da redução estabilizaria num valor pouco inferior a 30% após o quarto seguidor, independentemente do número de seguidores em sequência a jusante, visto que cada um contribua para o levantamento da camada limite.

A influência da orientação do vento é pouco significativa, inferior a 10%. O perfil de ataque ao fluido em escoamento será diferente para as duas orientações consideradas ( $0^\circ$  e  $180^\circ$ ) e provoca uma esteira diferente como é visível nas imagens do Anexo C.

A inclinação dos painéis contribui para a espessura da esteira assim como o Número de Reynolds [2]. Na esteira mais próxima da face posterior consideram-se velocidades baixas e sentidos aleatórios mas com o afastamento desta face os vórtices vão ficando mais organizados e geram-se alternadamente em relação ao eixo central da esteira como pode ser exemplo a **figura XX acima deste texto**.

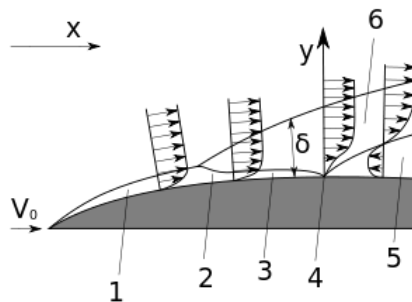
O vento que abandona o primeiro seguidor solar tem um conteúdo energético inferior, criando um “abrigo” turbulento e abrandado na direção a favor do vento [4]. Este efeito não seria

desejado num parque eólico, por exemplo, mas devido a este facto é possível rever o dimensionamento da estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos.

- *Efeito da Camada Limite de Prandtl*

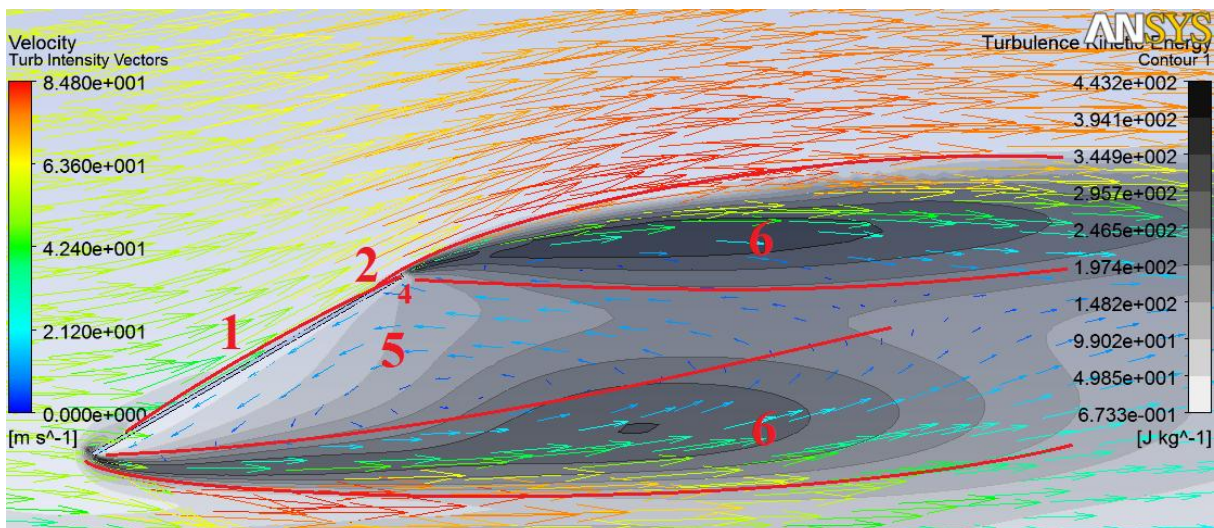
Segundo Prandtl, mesmo quando Número de Reynolds de um escoamento é elevado o que tornaria o efeito da viscosidade desprezável, o regime é laminar nas proximidades ao objeto imerso no fluido [6].

Adaptando esta realidade ao painel solar em estudo nesta dissertação, verificamos que o escoamento não é afetado até ao momento em que a partícula de fluido encontra o início do corpo. A partir deste ponto o corpo começa a perturbar o escoamento.



**Legenda Imagem [5]**

Este ponto, para  $x = 0$ , chama-se o ponto de estagnação porque a velocidade nesse ponto é nula. Devido à rugosidade do painel que provoca atrito devido à viscosidade do fluido, a velocidade é baixa o suficiente para que a zona 1 seja laminar. Na Zona 2 passa a uma zona de transição onde surge uma camada turbulenta por cima da laminar. A Zona 3 representa uma diminuição da altura da camada limite laminar até se chegar ao Ponto 4 – ponto de separação onde a velocidade atinge um valor nulo e a camada laminar desaparece. A partir deste ponto surge a Zona 5 onde o movimento do fluido é contrário ao original. Este fluxo pode ser chamado de fluxo secundário e cria uma camada limite de separação onde a pressão e velocidade são baixas. Relativamente à forma do objeto, ele torna-se mais aerodinâmico quanto mais o ponto de estagnação estiver afastado do ponto de separação.





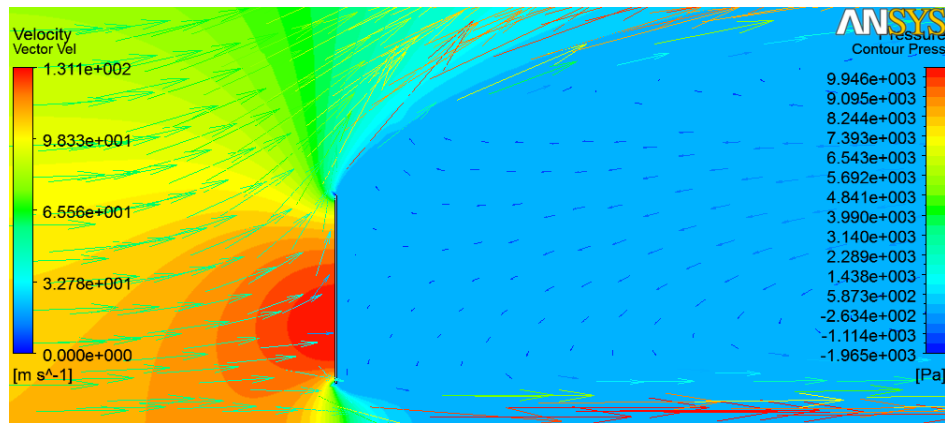
Por analogia, a **figura XX** demonstra as zonas acima descritas para um exemplo de um painel inclinado a  $30^\circ$  com uma velocidade de escoamento de 60 m/s. É possível observar a zona e separação (Zona 5) onde os vetores de velocidade à escala adquirem sentido contrário ao do escoamento inicial ( $0^\circ$ ) e com menor velocidade. Sob a placa também é perceptível, através da escala de cores, a diferença energética entre os vórtices turbulentos (Zona 6) e a zona da esteira com um cinza mais claro a indicar uma zona mais calma relativamente à turbulência.

A camada limite separada tem um comprimento até quatro vezes a altura do perfil. No entanto o efeito de esteira continua por proporções já indicadas e pode ser observado na figura supracitada, para jusante do painel, que os vetores de velocidade indicam um valor baixo para este fator. Esta observação juntamente com a diferença de pressão para a mesma zona indicada pela **figura XX pressão** provoca os efeitos de esteira referidos anteriormente.

A camada laminar (Zona 1) reflete-se para grande parte do comprimento total dos painéis. Devido à forma pouco aerodinâmica do perfil, embora de baixa espessura, a camada laminar só se forma após o início do bordo de ataque.

- *Efeito provocado pela proximidade ao solo*

Para compreender este fator podemos utilizar os dois painéis inclinados a  $90^\circ$ . Neste caso a distribuição da pressão deveria ser simétrica em relação ao centro dos painéis, tanto para a superfície anterior como posterior. A figura XX revela com escala de cores a pressão e com vetores à escala, a velocidade.



Para o caso indicado, a altura ao solo definida em 4.2 é igual a  $0,75\text{ m}$ . Devido à obstrução na fluidez do escoamento que esta pequena altura traduz (em relação a fluido livre do outro lado), verifica-se um aumento de pressão junto ao solo entre o início do domínio até ao painel. Este aumento de pressão localizado provoca que o fluido se desloque desta zona para uma zona de menor pressão, ou seja, para uma altura superior no domínio. Verifica-se que na metade superior do painel a direção da velocidade não é perpendicular à superfície e existe um aumento de velocidade do fluido. Segundo Frank M. White [6], o aumento da velocidade traduz-se na diminuição da pressão e tal facto pode ser verificado na imagem.

Por conseguinte, como demonstra a figura XX, existe uma maior pressão e velocidade perpendicular à superfície para a zona mais próxima ao solo e com o afastamento a direção da velocidade torna-se perpendicular à superfície e existe uma diminuição da pressão exercida. Foi possível fazer uma aproximação a funções lineares dos perfis de pressão e para a inclinação descrita, o declive das funções foi negativo, o que confirma analiticamente este facto. Tais dados podem ser consultados no Anexo E e no Anexo F.

#### 4.5.6 Análise dos Coeficientes de Pressão vs. Eurocódigo

	Inclinação Pannel	CP Médio FLUENT	CP x_min	CP x_max	CP Médio EC	CP x_min	CP x_max	Diferença FLUENT vs. EC
Vento a 0 graus	0 graus	0,0	-0,1	0,0	0,3	0,6	0,0	-108%
	10 graus	0,6	1,5	-0,2	0,7	1,4	0,0	-19%
	20 graus	0,9	2,1	-0,2	1,1	2,3	0,0	-18%
	30 graus	1,3	2,5	0,0	1,8	3,4	0,0	-28%
	90 graus	4,1	4,3	1,1	2,6	2,6	2,6	59%
Vento a 180 graus	10 graus	-0,9	0,2	-2,3	-1,3	0,0	-0,9	-26%
	20 graus	-1,3	-0,4	-2,1	-1,9	0,0	-1,3	-28%
	30 graus	-1,7	-0,3	-2,0	-2,7	0,0	-1,8	-38%

Após o tratamento dos dados foi possível extrair os Coeficientes de Pressão obtidos pelo FLUENT para comparação com o Eurocódigo. Na **tabela XX** pode ser verificado, além do CP médio, o valor deste coeficiente para o início do comprimento dos painéis,  $x_{min}$ , e para o fim,  $x_{max}$ .

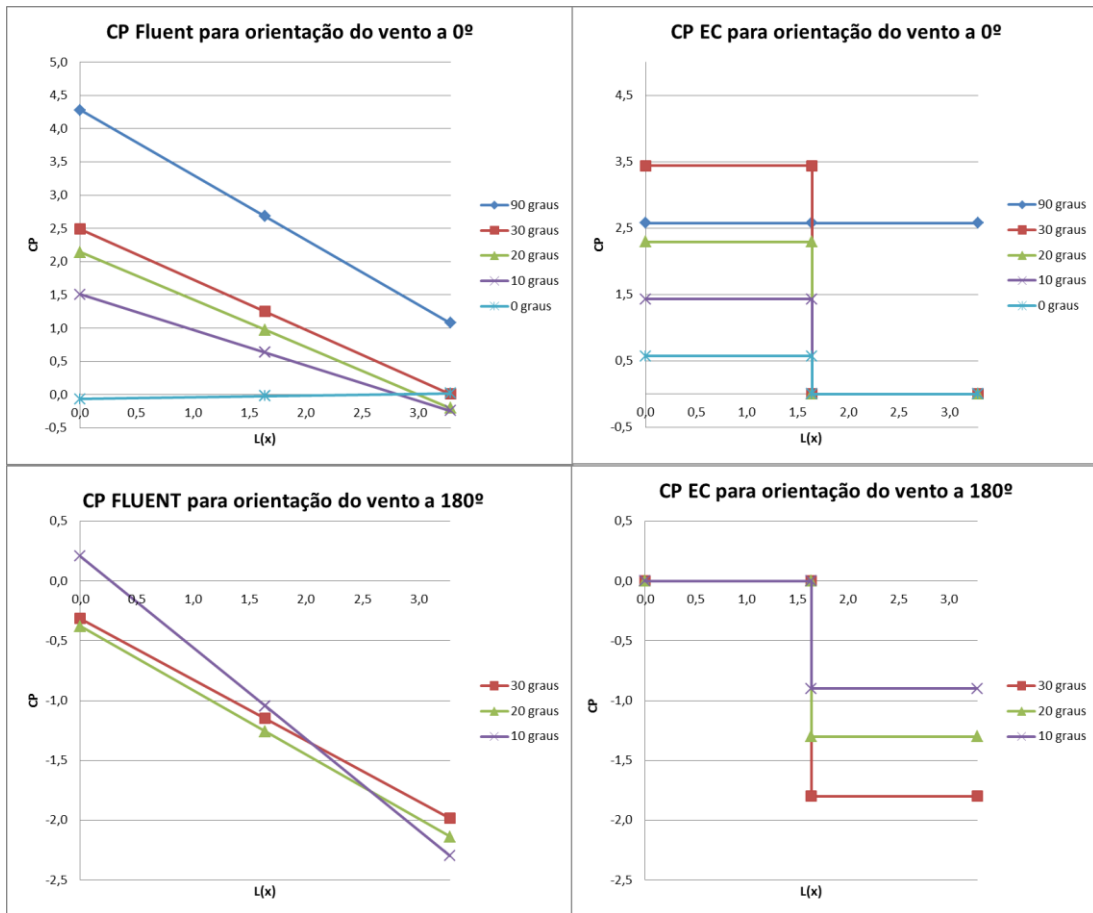
É possível verificar que existe uma diferença significativa de valores médios entre as duas abordagens. O aumento dos coeficientes de pressão dá-se com o aumento da inclinação dos painéis, tanto para o vento orientado a  $0^\circ$  como para  $180^\circ$ .

O FLUENT adquire valores para o CP inferiores aos calculados para o Eurocódigo para todas as inclinações, excetuando para  $90^\circ$ . Isto deve-se à abordagem considerada no EC em que esta inclinação é calculada através da aproximação a uma parede e considera um CP máximo, constante para todo o comprimento, igual a 2,4 como é visível no Anexo C. O FLUENT considera, para uma inclinação de  $90^\circ$ , um CP médio igual a 4,1. Este valor é superior aos valores considerados por Frank White [6]. O **anexo XX** demonstra os resultados das forças obtidas para todas as análises efetuadas e pode ser verificado que para a inclinação de  $90^\circ$  o FLUENT revela valores mais defensivos em relação ao EC.

Para todos os outros casos o FLUENT encontra-se menos defensivo nos coeficientes obtidos em cerca de 20%.

Conforme a orientação do vento, o CP é máximo no momento em que o fluido encontra a placa e decresce até um valor aproximado a zero ao longo do comprimento.

A distribuição dos coeficientes de pressão considerada pelo EC e pelo FLUENT são distintas. Como se pode observar na **figura XX**, o FLUENT utiliza uma distribuição linear e o Eurocódigo utiliza uma retangular.



O declive das retas para o FLUENT é semelhante para as duas orientações do vento analisadas. Para os 90° de inclinação não se verifica um CP constante devido à proximidade ao solo explicado em 4.5.4.

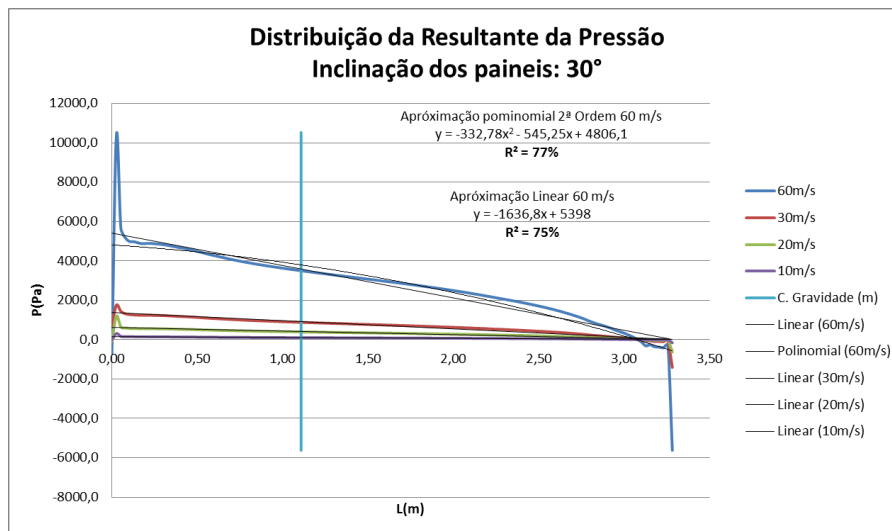
O Eurocódigo, como já referido, considera uma distribuição retangular. Este fato obriga a que o centro de gravidade da força equivalente seja sempre aplicado a  $\frac{1}{4}$  do comprimento do total, dependendo da orientação do escoamento. Os resultados obtidos pelo FLUENT variam o centro de gravidade dessa força como pode ser verificado na **tabela XX acima**.

Pelo EC, o ponto de aplicação da força equivalente seria a 25% do comprimento total, caso o vento estivesse orientado a 0° ou a 75°, caso estivesse orientado a 180°. O FLUENT considera um ponto de aplicação entre os 29 e 35% para o vento a 0° e inclinações do painel entre 10 e 30°, respetivamente e, entre 59 e 69% para o vento a 180°, sendo o primeiro valor referente a uma inclinação de 30° e o segundo para 10°.

#### 4.5.7 Análise do Erro

Após a extração dos relatórios referentes à distribuição da pressão na superfície dos painéis, executou-se o tratamento dos dados e o perfil da pressão foi aproximado a uma função linear com o objetivo de simplificar os cálculos para futuras aplicações e reduzir o custo computacional.

Na **figura XX** pode ser observado o perfil da pressão ao longo dos dois painéis considerados neste estudo inclinados a 30° com o escoamento orientado a 0°:



A título exemplificativo, na **figura XX** encontra-se uma aproximação polinomial de 2ª ordem de modo a verificar a diferença do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre a aproximação linear e a quadrática para uma velocidade de 60 m/s.

O coeficiente de determinação é a qualidade com um termo da função de aproximação está a prever o termo da função aproximada. Varia entre 0 e 100%, onde 100% corresponde à qualidade máxima [12].

Pode ser verificado que para a função linear o  $R^2$  é igual a 75% e para a polinomial sobe para 77%. Valores semelhantes foram obtidos para outras análises.

Numa análise visual à figura XX, é possível observar que a reta linear está praticamente sobreposta sobre a linha que demonstra a distribuição da pressão para 60 m/s embora o valor de  $R^2$  seja de 75%. A diferença encontrada está nos valores dos extremos dos painéis apenas e não contribui para a precisão dos resultados obtidos.

A força de resultante e o centro de gravidade respetivo foram calculados recorrendo à regra dos trapézios [12].

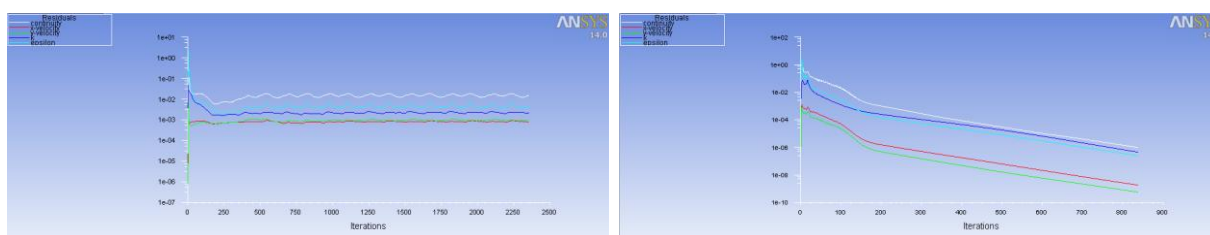
A **tabela XX** demonstra o erro induzido por este método ao ser utilizado como meio de simplificação dos dados das forças resultantes para análise em relação aos dados extraídos diretamente do FLUENT:

	Inclinação Painel	Velocidade Vento	Força Resultante		Erro Regra dos Trapézios
			FLUENT	Regra dos Trapézios	
Vento a 0 graus		60m/s	29293,99	24532,17	16,3%
		30m/s	7329,89	6151,06	16,1%
		20m/s	3263,01	2743,60	15,9%
	90 graus	10m/s	820,668	693,15	15,5%
		60m/s	9305,19	9054,28	2,7%
		30m/s	2342,49	2271,69	3,0%
		20m/s	1048,43	1023,29	2,4%
	30 graus	10m/s	267,57	262,08	2,1%
		60m/s	6490,695	6808,13	4,7%
		30m/s	1658,4	1736,00	4,5%
		20m/s	751,95	785,76	4,3%
	20 graus	10m/s	198,11	206,30	4,0%
		60m/s	4230,93	4766,84	11,2%
		30m/s	1058,29	1180,93	10,4%
		20m/s	453,64	503,86	10,0%
	10 graus	10m/s	113,86	126,24	9,8%
	60m/s	-141,88	-130,12	8,3%	
	30m/s	-40,2	-37,27	7,3%	
	20m/s	-19,15	-17,81	7,0%	
0 graus	10m/s	-5,35	-4,99	6,6%	
Vento a 180 graus		60m/s	-11991,4	-12050,32	0,5%
		30m/s	-3097,9132	-3097,87	0,0%
		20m/s	-1372,71	-1376,46	0,3%
	30 graus	10m/s	-335,8	-338,70	0,9%
		60m/s	-9567,2	-8751,55	8,5%
		30m/s	-2398,59	-2202,87	8,2%
		20m/s	-1069,98	-985,95	7,9%
	20 graus	10m/s	-271,04	-251,64	7,2%
		60m/s	-6719,3	-7424,27	9,5%
		30m/s	-1704,19	-1892,45	9,9%
		20m/s	-764,4	-852,10	10,3%
	10 graus	10m/s	-194,32	-218,38	11,0%
				<b>Média Erro:</b>	<b>7,4%</b>

Foi possível verificar que o erro pode variar entre percentagens próximas de zero até valores iguais a 16% sendo a média igual a 7,4%.

#### 4.5.8 Análise da convergência e Y+

É possível definir o valor mínimo para a convergência do processo iterativo relativo à continuidade, às três componentes da velocidade, à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta.



O valor assumido em 4.4.6 para estes pontos resultou na precisão desejada embora, nem sempre tenha sido possível atingir estes residuais devido à instabilidade trazida pela profundidade dos cálculos, como demonstra a figura XX.

Para compensar esta situação seria necessário alterar os fatores de relaxação de forma a aumentar a estabilidade trazendo um maior tempo de computação ou de forma a diminuir o tempo necessário para a convergência, diminuindo o custo computacional mas podendo provocar instabilidade numérica.

Todas as simulações convergiram para os valores residuais iguais a  $10^{-5}$  e 90% dos casos foram até aos residuais estipulados no capítulo respetivo.

Relativamente ao Y+, superfície inferior demonstrou um valor praticamente constante de 200. Já os valores de Y+ para a superfície superior ficaram compreendidos entre os 275 e os 400. Este último valor ultrapassa os admitidos em 4.4.6 embora seja pouco expressivo. O seu pico para a superfície superior verificou-se no centro da placa visto que a malha junto dos extremos encontrava-se mais refinada. Na superfície inferior o valor mantém-se constante devido à uniformidade da malha, visto encontrar-se a 0,75m do solo onde a área adjacente também foi refinada.

A **figura XX** revela o tempo demorado pelas simulações numéricas e a quantidade de iterações necessárias.

<i>Orientação do Vento</i>	<i>Inclinação</i>	<i>Nº Interações</i>	<i>Tempo (min)</i>	<i>Nós</i>
<b>0°</b>	<b>0°</b>	2470	0,7	44831
	<b>10°</b>	1867	40,4	49551
	<b>20 graus</b>	2620	46,3	56466
	<b>30 graus</b>	3343	56,9	59147
	<b>90 graus</b>	2338	52,5	57843
<b>180°</b>	<b>10 graus</b>	1170	28,0	-
	<b>20 graus</b>	922	19,9	-
	<b>30 graus</b>	1239	28,7	-
	<b>Totais:</b>	<b>15969</b>	<b>273,4</b>	<b>267838</b>
	<b>Horas Totais:</b>	<b>4,6</b>		

Verifica-se que o tempo total das simulações numéricas foi de 4,6 horas e 15969 iterações calculadas. Com o vento orientado a 0° confere-se que com o aumento da inclinação dos painéis, o número de iterações necessárias para atingir a convergência aumenta assim como o tempo de computação devido ao consecutivo aumento da intensidade turbulenta.

## 5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

A realização deste estudo permitiu adquirir sensibilidade nos vários parâmetros que o influenciam o escoamento do ar sob estruturas fotovoltaicas e determinar as cargas que a fustigam neste tipo de solicitação.

Da sua análise foi possível tirar as seguintes ilações referentes à distribuição de pressões , forças, centro de gravidade, efeitos não lineares, entre outros:

Os resultados relativos à distribuição da pressão no painel para inclinações iguais ou inferiores a 30° foram mais conservativos em média 22%.

Com a inclinação a 90°, o Eurocódigo usa uma abordagem diferente para os outros casos. Com tal, é utilizada uma abordagem de parede e considera-se um CP médio igual a 2,5 enquanto que o FLUENT<sup>®</sup> usa um CP igual a 4. Esta situação traduz em forças menos conservativas pelo Eurocódigo;

A velocidade do fluido é independente da relação das pressões na superfície dos painéis devido aos efeitos criados pela esteira do escoamento;

A inclinação dos painéis e o Número de Reynolds influenciam a altura e extensão da esteira, aumentando ambos com o aumento quer da inclinação do painel quer do número de Reynolds;

No capítulo 4.5.5 referente aos efeitos da esteira pode-se verificar que existe uma redução significativa das pressões e forças para as estruturas que estão a jusante da primeira que é encontrada pelo escoamento, visto encontrarem-se numa zona de alta turbulencia e baixa velocidade. Desta forma, é possível dimensionar as estruturas conforme a sua posição na esteira e conseguir uma redução no peso/custo da estrutura. Este efeito é contemplado pelo EC cuja redução varia entre até 70% obtendo-se valores conservadores em relação aos 90% extraídos das simulações numéricas.

A distancia existente entre os painéis solares e o solo tem que ser considerada visto funcionar como restritor ao escoamento aumentando a pressão na zona a montante do painel. Este fator provoca que o fluido se direcione para uma zona de menor pressão (mais afastada do solo) e a pressão numa placa inclinada será inferior conforme o afastamento ao solo.

O centro de gravidade da força resultante obtido pelas simulações numericas aproxima-se mais do centro dos painéis do que o obtido pelo eurocodigo. Este ponto de aplicação varia entre 29 e 34% do comprimento total, para o vento a 0° e entre 59 e 69% para o vento no sentido contrario. No EC este valor é fixo a 25% ou 75%, sendo o primeiro para o vento orientado a 0° e o segundo para o vento a 180°. Este facto traduz diferentes considerações no dimensionamento da estrutura dos seguidores, dando o EC valores muito defensivos uma vez que considera a carga aplicada a ¼ do comprimento total;

A contribuição da velocidade para a alteração da posição do centro de gravidade da força resultante não é significativa;

No capítulo 4.5.7 refere-se que aproximação da resultante da pressão a uma função polinomial em relação a uma linear incrementa apenas dois pontos percentuais no valor de  $R^2$ , passando de 75% para 77%. Este incremento não é significativo visto as equações de segunda ordem aumentam o custo computacional e não são compatíveis para utilização em alguns *softwares* de dimensionamento estrutural. A qualidade da aproximação depende da linearidade do perfil e apenas para valores nos extremos da superfície esta condição não se verifica.



A Regra do Trapézio provoca uma diferença média de 7,4% no cálculo das forças resultantes em relação ao integral da pressão na superfície obtida diretamente pelo FLUENT.

## Referências

- [1] Mohd ARIFF, Salim M. SALIM e Siew Cheong CHEAH (2009), “WALL Y+ APPROACH FOR DEALING WITH TURBULENT FLOW OVER A SURFACE MOUNTED CUBE: PART 2 – HIGH REYNOLDS NUMBER”, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Austrália;
- [2] Lopes, Miguel Filipe Pinho (2008), “Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da ação do vento sobre edifícios”, Instituto Superior Politécnico, Lisboa;
- [3] Sarmiento, Prof. António (2004), “Mecânica dos Fluidos II”, DEM/IST;
- [4] Portal das Energias Renováveis, último acesso: Janeiro 2013, <http://www.energiasrenovaveis.com>;
- [5] Wikilivros, “Mecânica dos Fluidos/Camada Limite”, ultimo acesso: Janeiro 2013, [http://pt.wikibooks.org/wiki/Mec%C3%A2nica\\_dos\\_fluidos/Camada\\_limite](http://pt.wikibooks.org/wiki/Mec%C3%A2nica_dos_fluidos/Camada_limite);
- [6] White, Frank M. (2002), “Fluid Mechanics – Fifth Edition”, McGraw-Hill, University of Rhode Island;
- [7] Bruce R. Munson, Donald F. Young e Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics 4th ed.”, Edgard Blücher, Iowa – Estados Unidos da América;
- [8] Provenza, Engº. Francesco (1996),” PRO-TEC – Projetista de Máquinas”, Editora F. Provenza, São Paulo – Brasil;
- [9] FLUENT® User's Guide (2011), USA;
- [10] CFD Online, ultimo acesso: Novembro 2012, <http://www.cfd-online.com/>;
- [11] Linard, Flavio José Alexandre, “Estimativas da velocidade do vento em altitude usando o *software* Windographer”, Dissertação do autor, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza – Ceará;
- [12] Apontamentos teóricos, Escola de Engenharia de Lorena, Ultimo acesso: Dezembro 2012, <http://www.alunos.eel.usp.br/numerico/notasDeAula/integracao.pdf>
- [13] Eurocódigos – Qualidade de produtos e desenvolvimentos, Ultimo acesso: Novembro 2012; <http://www.lnec.pt/qpe/eurocodigos>;
- [14]

Continuar a utilizar a numeração das páginas do relatório. Nunca exceder as 52 páginas no total da Dissertação até fim desta secção. A secção “Referências” não é numerada.

Todos os documentos citados no texto devem ser listados sob o título “Referências”. As referências no texto do relatório devem ser feitas através do nome do(s) autor(es) e ano de publicação do documento.

*Exemplo de uma referência no texto do relatório:*

Para uma introdução à programação em ASP, consultar Vieira (2000).

*Exemplo de uma lista de referências:*

Vieira, J. (2000), “Programação Web com Active Server Pages”, Edições Centro Atlântico, Lisboa.

Nielsen, J. (2002), “Intranet Portals: A Tool Metaphor for Corporate Information”, 31 março 2003, último acesso: maio 2009, <http://www.useit.com/alertbox/20030331.html>.

TAC (2001), “Trading Agent Competition”, último acesso: abril 2009, <http://tac.eecs.umich.edu/>.

## Bibliografia

1. Brederode, Vasco de (1997), “Fundamentos de Aerodinâmica Incompressível”, Edição do Autor;
2. Zhang, Xiaodong (2009), “CFD simulation of neutral ABL Fows”, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark;
3. Idez CIK?
- 4.

**Nota:** Documentos relevantes para o trabalho e que não sejam citados num texto devem ser listados numa secção com o título “Bibliografia”. Numa dissertação deste tipo apenas devem ser incluídas referências citadas no texto.

>

## ANEXO A: Eurocódigo 1991.4 - Efeitos do Terreno

NP  
EN 1991-1-4  
2010

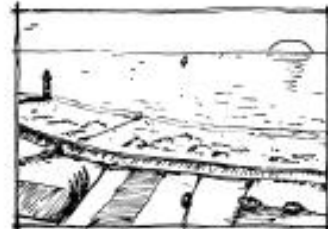
p. 97 de 162

### 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



## ANEXO B: Eurocódigo 1991.4 – Coeficientes para protecção de paredes e vedações

NP  
EN 1991-1-4  
2010

p. 69 de 162

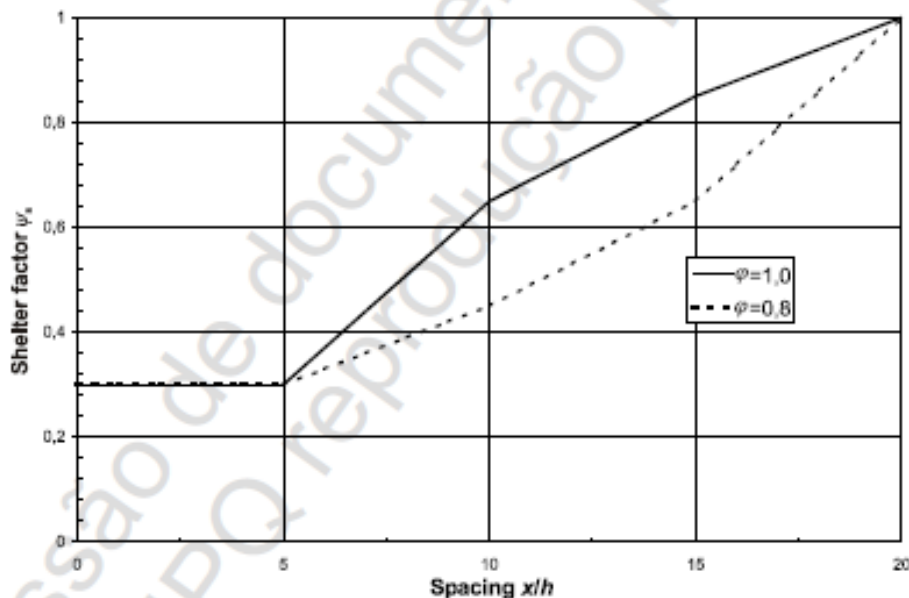
### 7.4.2 Coeficientes de protecção para paredes e vedações

(1) Se a barlavento da parede ou da vedação considerada existirem outras paredes ou vedações de altura igual ou superior à altura  $h$  da parede ou da vedação em causa, pode ser utilizado um coeficiente de protecção em complemento aos coeficientes de pressão resultante relativos a paredes e a vedações. O valor do coeficiente de protecção,  $\psi_s$ , depende do afastamento  $x$  entre as paredes ou vedações, assim como do índice de cheios  $\varphi$  da parede ou vedação situada a barlavento (a que confere efeito de protecção). Na Figura 7.20 são fornecidos valores de  $\psi_s$ .

O valor efectivo do coeficiente de pressão resultante na parede protegida,  $c_{p,net,s}$ , é determinado pela expressão (7.6):

$$c_{p,net,s} = \psi_s \cdot c_{p,net} \quad (7.6)$$

(2) O coeficiente de protecção não deverá ser aplicado nas zonas de extremidade, numa extensão igual a  $h$  medida a partir da extremidade livre da parede.



#### Legenda:

shelter factor      coeficiente de protecção  
spacing              afastamento

Figura 7.20 – Coeficiente de protecção  $\psi_s$  aplicável a paredes e vedações, para valores de  $\varphi$  entre 0,8 e 1,0

## ANEXO C: Eurocódigo 1991.4 – Elementos estruturais de secção retângular

NP  
EN 1991-1-4  
2010

p. 72 de 162

### 7.6 Elementos estruturais de secção rectangular

(1) O coeficiente de força  $c_f$  para elementos estruturais de secção rectangular, com o vento incidindo perpendicularmente a uma face, deverá ser determinado através da expressão (7.9):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_f \cdot \psi_{fa} \quad (7.9)$$

em que:

$c_{f,0}$  coeficiente de força para elementos de secção rectangular com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades, fornecido na Figura 7.23;

$\psi_f$  coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados; o valor de  $\psi_f$  depende do número de Reynolds (ver a Nota 1);

$\psi_{fa}$  coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento, conforme é definido em 7.13.

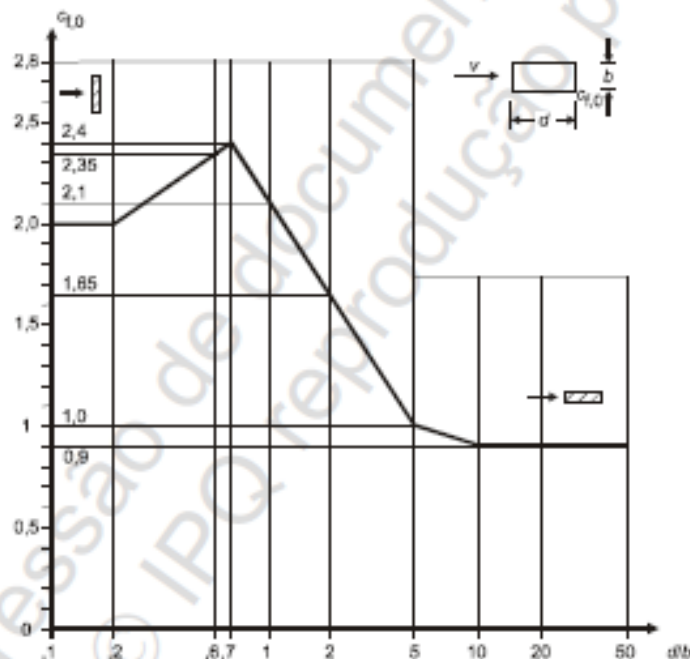


Figura 7.23 – Coeficiente de força  $c_{f,0}$  para secções rectangulares com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades do elemento

NOTA 1: Os valores de  $\psi_f$  poderão ser fornecidos no Anexo Nacional. Na Figura 7.24 são fornecidos valores aproximados, recomendados, para os limites superiores de  $\psi_f$ . Estes valores são obtidos em condições de baixa turbulência. Em termos de segurança, admite-se que são valores conservativos.

NOTA 2: A Figura 7.24 também poderá ser utilizada para edifícios com  $h/d > 5,0$ .

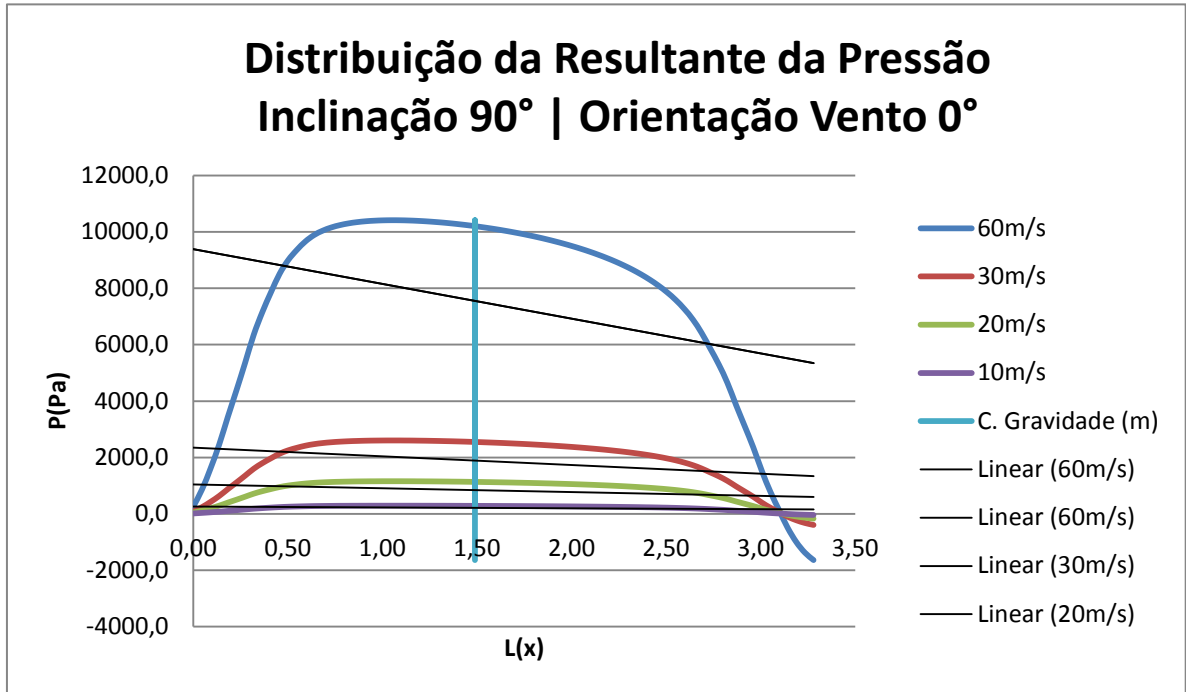
## ANEXO D: Efeitos de Esteira

Análise	Velocidade (m/s)	Seguidor 1				Seguidor 2				Seguidor 3			
		Superior (N)	Inferior (N)	Resultante (N)	Diferença	Superior (N)	Inferior (N)	Resultante (N)	Diferença	Superior (N)	Inferior (N)	Resultante (N)	Diferença
0 graus	30	1090,8	-1235,4	2326,2	0%	-499,9	-429,6	-70,3	-97%	102,2	-729,7	831,9	-64%
	60	4546,1	-4681,5	9227,6	0%	-1832,9	-1420,7	-412,2	-96%	642,7	-2631,8	3274,5	-65%
180 graus	30	34,1	741,1	-707,0	-76%	-122,3	267,0	-389,3	-87%	-442,6	2551,6	-2994,2	0%
	60	159,7	2937,2	-2777,5	-77%	-537,1	992,1	-1529,2	-87%	-1736,7	10242,2	-11978,9	0%





**ANEXO E: Gráficos da distribuição da Pressão na superfície**



**ANEXO F: Tabela das equações lineares aproximadas da distribuição da Pressão no Painel Fotovoltaico**

<b>Inclinação Painel</b>	<b>Velocidade Vento</b>	<b>Equações lineares da distribuição da Pressão</b>	
		<b>0°</b>	<b>180°</b>
<b>90°</b>	60 m/s	$y = -1231,6x + 9387,3$	
	30 m/s	$y = -307,02x + 2351$	
	20 m/s	$y = -136,33x + 1047,7$	
	10 m/s	$y = -34,102x + 264,21$	
<b>30°</b>	60 m/s	$y = -1636,8x + 5398$	$y = -1360,9x - 1365$
	30 m/s	$y = -413,37x + 1362,4$	$y = -338,83x - 369,54$
	20 m/s	$y = -185,12x + 610,37$	$y = -151,91x - 162,05$
	10 m/s	$y = -47,454x + 156,4$	$y = -38,082x - 38,778$
<b>20°</b>	60 m/s	$y = -1544,4x + 4598,8$	$y = -1056,6x - 867,36$
	30 m/s	$y = -389,73x + 1165,9$	$y = -270,2x - 211,94$
	20 m/s	$y = -174,78x + 524,98$	$y = -122,38x - 92,705$
	10 m/s	$y = -44,908x + 136,19$	$y = -32,277x - 22,077$
<b>10°</b>	60 m/s	$y = -1223,3x + 3448,2$	$y = -1607,6x + 392$
	30 m/s	$y = -295,89x + 842,5$	$y = -414,78x + 108,14$
	20 m/s	$y = -125,63x + 358,47$	$y = -188,54x + 51,602$
	10 m/s	$y = -31,928x + 90,579$	$y = -49,255x + 14,749$
<b>0°</b>	60 m/s	$y = 54,931x - 129,45$	
	30 m/s	$y = 14,677x - 35,406$	
	20 m/s	$y = 6,7702x - 16,529$	
	10 m/s	$y = 1,7849x - 4,4469$	

## **ANEXO G: Contornos da Pressão vs. Vetores da Velocidade**

**ANEXO H: <Título do Anexo D, 1º anexo em volume separado>  
(em volume separado)**

<Os últimos anexos, de dimensão suficiente para não serem incluídos no volume do relatório (se existirem), podem ser apresentados em documentos encadernados em volumes separados. Utilizar a capa e a encadernação realmente utilizada durante o projeto, seguindo por exemplo as normas da empresa ou organização, ou adaptar a capa do presente relatório, de forma a ser claro que se trata de um anexo>.