



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização experimental e computacional da distribuição da velocidade de atrito na cobertura de edifícios com painéis solares

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Nuno Filipe Alves Freire

Júri

Presidente Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica Industrial

Coimbra, Julho, 2015

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pelo encorajamento, orientação, ajuda na realização de alguns ensaios, cedência dos resultados computacionais, discussão de ideias e pela confiança em mim depositada.

À Engenheira Raquel Faria por me ter mostrado os procedimentos para operar o túnel de vento e pela discussão de ideias.

Ao Sr. Cardoso a ajuda nas alterações feitas ao modelo.

Ao colega Nuno Nogueira agradeço pela ajuda na realização dos ensaios laboratoriais e companhia nas horas passadas no LAI.

Aos que aqui referi e a todos os outros que contribuíram o meu muito obrigado.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo da distribuição da pressão estática e da velocidade de atrito na cobertura de edifícios com painéis solares. Para a componente experimental consideram-se várias configurações, variando o número de filas de painéis solares, a orientação dos mesmos e a distância destes à cobertura do edifício. Quanto à componente computacional, são realizadas simulações utilizando diferentes modelos de turbulência para as várias configurações.

Na componente experimental vão ser utilizadas sondas de Irwin para medir a tensão superficial. São apresentados os resultados da distribuição da pressão estática e da distribuição da velocidade de atrito na cobertura do edifício com painéis solares.

São feitas comparações entre os resultados experimentais e computacionais.

Este estudo permitiu concluir que a orientação dos painéis em relação ao escoamento têm uma grande influência nos resultados. Quanto às simulações computacionais, estas seguem a tendência da curva dos resultados experimentais.

Palavras-chave: Erosão pelo vento, Painéis solares, Carga de neve, CFD.

Abstract

The main objective of this work is the study of the distribution of the static pressure and shear velocity on the roof of a building with solar panels. In the experimental part there will be considered several building configurations, varying parameters such as the gap size between the roof and the solar collector, spacing between rows of panels and wind direction. In the computational modelling, the simulations will be done using two different turbulence models.

In the experiments Irwin probes are used to measure the friction velocity. The results of the distribution of the static pressure and of the shear velocity on the roof of building with solar panels will be presented.

Some comparisons are established between the experimental results and CFD simulations.

With this study we were able to conclude the orientation of the wind plays a big part on the results. The CFD simulations follow the curve of the experimental results.

Keywords Wind erosion, Solar panels, Snow load, CFD.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Modelo do edifício.....	2
2. METODOLOGIA LABORATORIAL	3
2.1. Verificação do escoamento na câmara de ensaios	3
2.2. Distribuição da pressão estática na cobertura	6
2.3. Distribuição da velocidade de atrito na cobertura	7
3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	11
3.1. Escoamento de ar em torno de um cubo isolado.....	11
3.2. Escoamento de ar na cobertura de edifício com painéis solares.....	13
4. RESULTADOS	15
4.1. Ensaios laboratoriais	15
4.2. Resultados computacionais e comparação com as medições experimentais	19
4.2.1. Caso do cubo	19
4.2.2. Cobertura de edifício com painéis solares.....	20
5. CONCLUSÕES	23
5.1. Trabalhos futuros	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo com 5 filas de painéis solares e inclinação negativa.....	2
Figura 2.1. Velocidade do escoamento de ar na camara do túnel de vento em função da velocidade de rotação do ventilador.	5
Figura 2.2. Perfil da velocidade do escoamento de ar na câmara do túnel de vento.	6
Figura 2.3. Localização da linha das tomadas de pressão.	7
Figura 2.4. Vista em corte do esquema de uma sonda de Irwin, fonte Ferreira (1993).	8
Figura 2.5. Distribuição das sondas de Irwin na cobertura do modelo.	9
Figura 3.1. Domínio de cálculo para a simulação do cubo (dimensões indicadas em metros).....	12
Figura 3.2. Representação gráfica dos níveis de malha.....	12
Figura 3.3. Perfis de velocidade.	13
Figura 4.1. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão para as diferentes distâncias entre o painel e a cobertura.	16
Figura 4.2. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão com o número de filas de painéis solares.	16
Figura 4.3. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão para as diferentes orientações dos painéis solares em relação ao escoamento de ar.	17
Figura 4.4. Valores experimentais para a variação do C_f para as diferentes distâncias entre o painel e a cobertura.....	18
Figura 4.5. Valores experimentais para a variação do C_f para as diferentes orientações dos painéis solares em relação ao escoamento de ar.....	18
Figura 4.6. Simulações computacionais e os resultados de Castro e Robbins (1977) para o perfil de velocidade na entrada uniforme.	19
Figura 4.7. Simulações computacionais e os resultados de Castro e Robbins (1977) para o escoamento que varia com a altura.....	20
Figura 4.8. Coeficiente de atrito ao longo da cobertura do edifício para o caso dos painéis com inclinação positiva.	21
Figura 4.9. Coeficiente de atrito ao longo da cobertura do edifício para o caso dos painéis com inclinação negativa.	21

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Equações de calibração das sondas de Irwin (Ferreira, 1993).....	8
Tabela 3.1. Níveis de malha.	12

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

C_f – Coeficiente de atrito [adimensional]

C_p – Coeficiente de pressão [adimensional]

H – Altura do edifício [m]

k – Energia cinética turbulenta [m^2/s^2]

V – Velocidade do escoamento não perturbado [m/s]

P – Potência [KVA]

u_* – Velocidade de atrito [m/s]

Δp – Diferença de pressão [Pa]

ε – Dissipação turbulenta [m^2/s^3]

η – Distância na superfície [m]

ρ – Densidade do ar [kg/m^3]

τ_ω – Tensão de atrito [m/s]

ω – Taxa de dissipação de turbilhões [m^2/s^3]

Siglas

CAD – Computer-aided design

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

1. INTRODUÇÃO

A acumulação de neve na cobertura de edifícios durante o Inverno é atenuada pelo derretimento desta devido ao aumento da temperatura e pelo fenómeno de erosão provocado pelo vento. A quantidade de neve que é removida pela erosão é influenciada por vários parâmetros como a geometria do edifício, a exposição deste ao vento, a existência de estruturas, entre outras.

Dado a crescente utilização de painéis fotovoltaicos para a produção de energia limpa, a utilização da cobertura dos edifícios para a colocação destes é uma boa opção, pois são áreas geralmente não aproveitadas dos edifícios. Mas a instalação de estruturas na cobertura dos edifícios vai levar a uma alteração do escoamento de ar.

A instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura de edifícios que tenham sido construídos em zonas onde ocorra queda de neve frequentemente leva à alteração do fenómeno de erosão de neve. Isto leva a que, em algumas zonas da cobertura, a neve removida seja superior ao que seria se os painéis não tivessem sido instalados e, noutras ocorra uma maior acumulação de neve. A quantidade de neve acumulada junto das estruturas montadas nas coberturas planas podem ser calculadas utilizando normas de carga de neve desde que estas sejam contínuas.

Com este estudo pretende-se compreender o comportamento do escoamento de ar na cobertura do edifício onde existam painéis solares instalados.

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. No primeiro é feita uma introdução ao tema, e no segundo está descrita a metodologia experimental. O terceiro capítulo referem-se as simulações utilizando o software OpenFoam para um caso de referência e depois para o caso em estudo. Por fim, no capítulo 4 onde é feita a comparação entre resultados obtidos e no quinto capítulo são apresentadas as conclusões.

1.1. Modelo do edifício

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado o modelo construído por Thiis *et al.* (2014). Este modelo representa um edifício com três andares a uma escala de 1:25, estando as dimensões do mesmo indicadas na Figura 1.1. Os painéis representados no modelo tem 0.075 m de altura e 0.008 m de espessura o que corresponde a aproximadamente 2 m e 0.2 m, respectivamente.

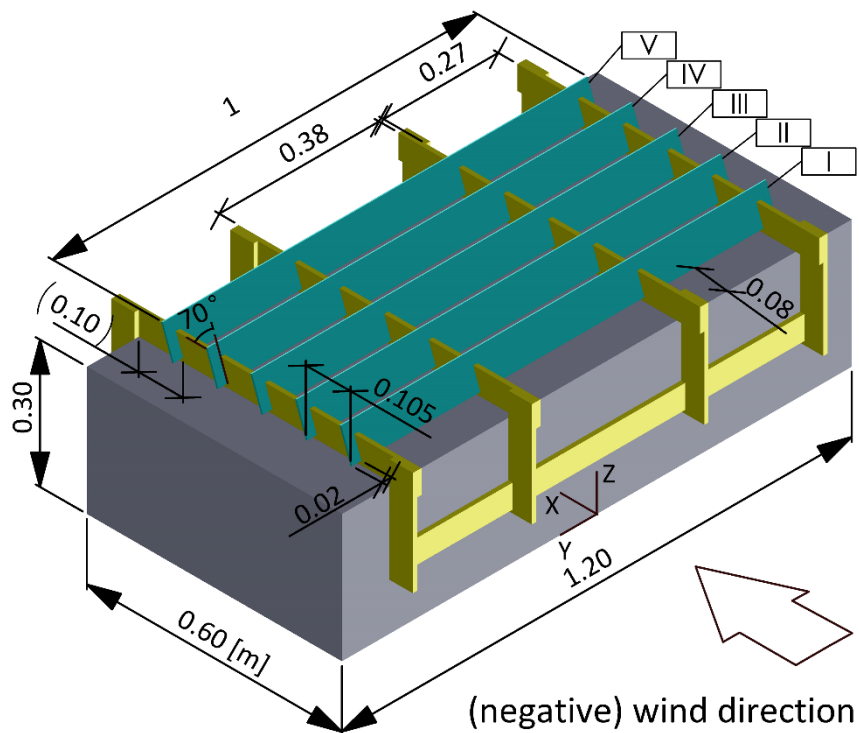


Figura 1.1. Modelo com 5 filas de painéis solares e inclinação negativa.

Na realização dos ensaios laboratoriais, a distância dos painéis solares à cobertura do edifício, variou entre 8 mm, 16 mm e 24 mm que correspondem a distâncias à escala real de 0.2 m, 0.4 m e 0.6 m. Os ensaios foram realizados para configurações de 0, 2, 3 e 5 filas de painéis solares. Para 2 filas foram utilizados os painéis I e V, e para 3 filas foram utilizados I, III e V. Nos ensaios foram utilizadas duas orientações dos painéis em relação ao escoamento de ar, uma negativa (N) quando o painel está inclinado a favor do vento e outra positiva (P) quando o painel está inclinado contra o vento.

2. METODOLOGIA LABORATORIAL

Os ensaios laboratoriais foram efectuados no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) que é parte integrante da Universidade de Coimbra. No LAI, existe uma grande diversidade de equipamentos que são utilizados para a realização de múltiplos trabalhos de investigação. Entre estes equipamentos encontra-se um túnel vento de grandes dimensões que foi utilizado para realização da parte experimental.

Este túnel de vento, de grandes dimensões, possui um sistema de recirculação do ar e tem a câmara de ensaios aberta, o que leva a que grande parte do movimento do ar seja reaproveitado, tornando-o assim mais eficiente. O bocal do túnel de vento possui uma secção transversal quadrada com $2 \times 2 \text{ m}^2$ de área e uma câmara de ensaios com 5 metros de comprimento. A alimentação é feita por um motor eléctrico com uma potência de 230 KVA, o que permite obter uma velocidade máxima de escoamento do ar próxima dos 18 m/s.

O trabalho experimental efectuado foi dividido em três partes:

- Verificação do escoamento na câmara de ensaios
- Medição da distribuição da pressão estática na cobertura do edifício utilizando tomadas de pressão
- Medição da distribuição da velocidade de atrito na cobertura do edifício recorrendo a sondas de Irwin

Neste capítulo pretende-se explicar cada parte do trabalho experimental, referindo os processos e as técnicas utilizadas.

2.1. Verificação do escoamento na câmara de ensaios

A primeira etapa na realização da parte experimental consiste na verificação da relação entre a velocidade do escoamento na câmara de ensaios (V) e a velocidade de rotação do ventilador do túnel. O valor da rotação do ventilador é lido no tacómetro que está inserido no quadro eléctrico de comando do ventilador. O valor da velocidade do escoamento na câmara de ensaios foi medido recorrendo a um tubo de Pitot e a um transdutor de pressão.

Um tubo de Pitot genérico é constituído por duas tomadas de pressão. A diferença de pressão entre estas duas tomadas que é utilizada no cálculo da velocidade do escoamento. O tubo de Pitot está ligado a um transdutor de pressão eléctrico, de marca MULTUR cujo erro de leitura é inferior a 0.5 Pa, de modo a transformar a diferença num sinal eléctrico. Pela equação de Bernoulli podemos obter o valor da velocidade do escoamento, equação 2.1, onde Δp é a diferença de pressão entre as duas tomadas do tubo de Pitot e ρ é a densidade do ar para a qual vai ser considerado o valor de 1.2 kg/m^3 .

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

São então efectuados ensaios nos quais a velocidade de rotação do ventilador do túnel do varia entre as 100 rpm e as 450 rpm com acréscimos de 50 rpm. Para cada valor fixado de rotação do ventilador do túnel foi então medida a correspondente da velocidade do escoamento no túnel. Os ensaios foram repetidos três vezes para cada rotação com um tempo de amostragem de 15 segundos cada adquiridos a uma frequência de amostragem de 50 Hz. Os resultados apresentados no gráfico da Figura 2.1 correspondem ao valor médio de cada velocidade de rotação.

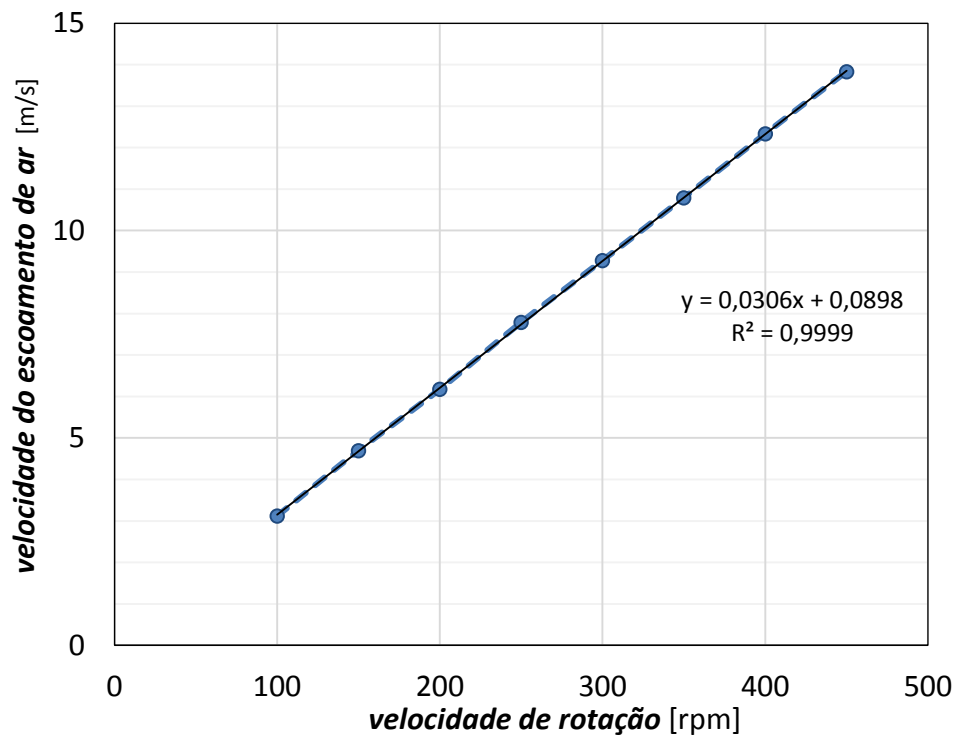


Figura 2.1. Velocidade do escoamento de ar na câmara do túnel de vento em função da velocidade de rotação do ventilador.

O passo seguinte consistiu em medir o perfil da velocidade do escoamento a meio da entrada da câmara do túnel de vento. Este perfil vai ser utilizado na parte computacional, de modo a que as condições utilizadas nas simulações computacionais sejam o mais próximo possível das experimentais. Para isso recorre-se novamente ao tubo de Pitot, este está fixo numa estrutura, variando apenas a distância em relação à base da câmara do túnel. De modo a ter uma melhor perceção do perfil, próximo da base do túnel a distância entre dois pontos sucessivos de aquisição é de 2 cm, com o afastamento da base como a variação passa a ser menos significativa, a distância passa para 5 cm e por fim para 10 cm. Os valores adquiridos encontram-se no gráfico na Figura 2.2.

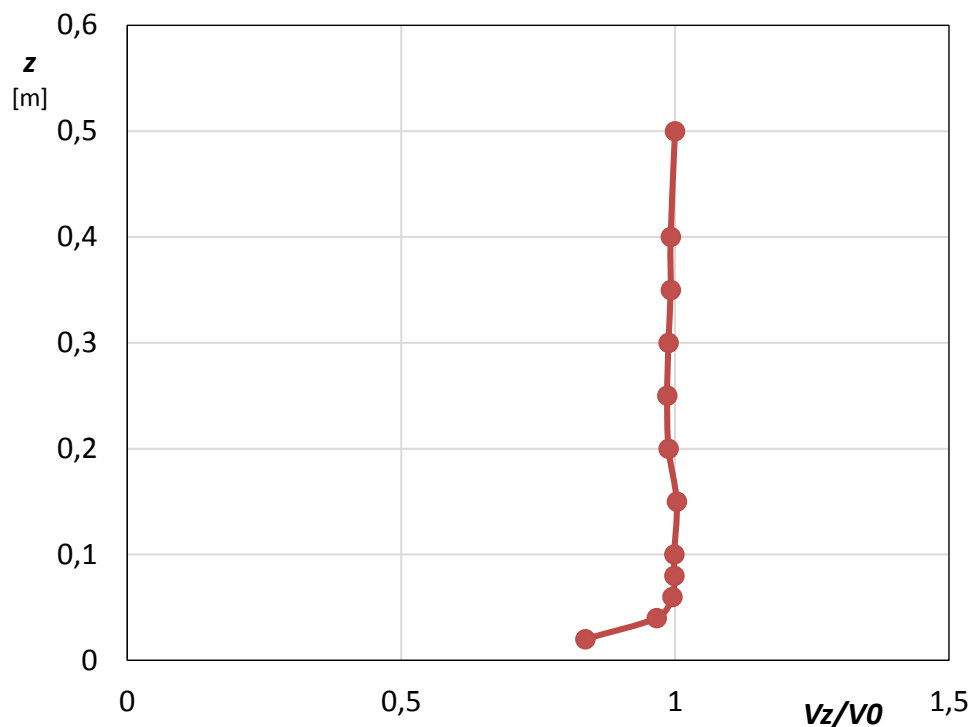


Figura 2.2. Perfil da velocidade do escoamento de ar na câmara do túnel de vento.

Na Figura 2.2, V_0 é o valor máximo obtido que corresponde a 10.16 m/s.

Como podemos verificar na Figura 2.2 o perfil de velocidade é relativamente constante a partir dos 0.06 m de altura, abaixo desta altura o perfil tem uma diminuição brusca de velocidade devido ao atrito entre a superfície e o escoamento.

2.2. Distribuição da pressão estática na cobertura

A instalação de painéis solares na cobertura do edifício leva à alteração do escoamento. A distribuição da pressão estática na cobertura do edifício é um bom parâmetro para quantificar a alteração do escoamento. Para saber a distribuição foram instaladas tomadas de pressão ao longo da cobertura do edifício, ver Figura 2.3, estas estão numa linha paralela ao escoamento de ar, distanciadas da linha central do edifício em 5 cm pois é neste espaço central que posteriormente vão ser colocadas as sondas de Irwin. As tomadas de pressão estão distanciadas entre si 15 mm e a distância à fachada do modelo é também de 15 mm, perfazendo um total de 39 tomadas de pressão.

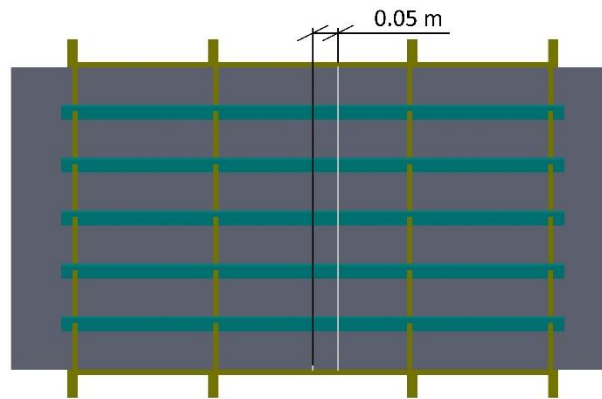


Figura 2.3. Localização da linha das tomadas de pressão.

A aquisição dos dados é feita através do computador, recorrendo a uma válvula de varrimento de 48 canais da marca Scanivalve. Estes equipamentos estão agora ligados a um computador através de uma placa de aquisição DASH16 da Metrabyte. De modo a saber a velocidade do escoamento no decorrer do ensaio está ligado à válvula de varrimento um tubo de Pitot fixo a meio da entrada da câmara do túnel de vento a 1 metro de altura. Os dados apresentados e correspondem a uma média com um intervalo de tempo de 15 segundos, cada ensaio é então repetido duas vezes e é feita a média dos dois, de modo a minimizar o erro.

Para uma mais fácil comparação de resultados, os resultados foram adimensionalizados utilizando o Coeficiente de Pressão (C_p). Este é calculado utilizando a Equação 2.2 na qual $p - p_0$ [Pa] é o valor da pressão em relação à pressão estática, ρ [kg/m³] é a densidade do ar e V [m/s] é a velocidade não perturbada do escoamento.

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.2)$$

2.3. Distribuição da velocidade de atrito na cobertura

A velocidade de atrito (u_*) é um parâmetro que está relacionado com a erosão de partículas, valores elevados da velocidade de atrito levam a quantidades superiores de partículas erodidas, assim sendo é um parâmetro a ter em atenção. Para isso vamos recorrer às sondas de Irwin, podendo-se ver na Figura 2.4 o esquema de uma delas. As sondas utilizadas foram construídas e calibradas por Ferreira (1993). Na Tabela 2.1 estão indicadas as equações de calibração.

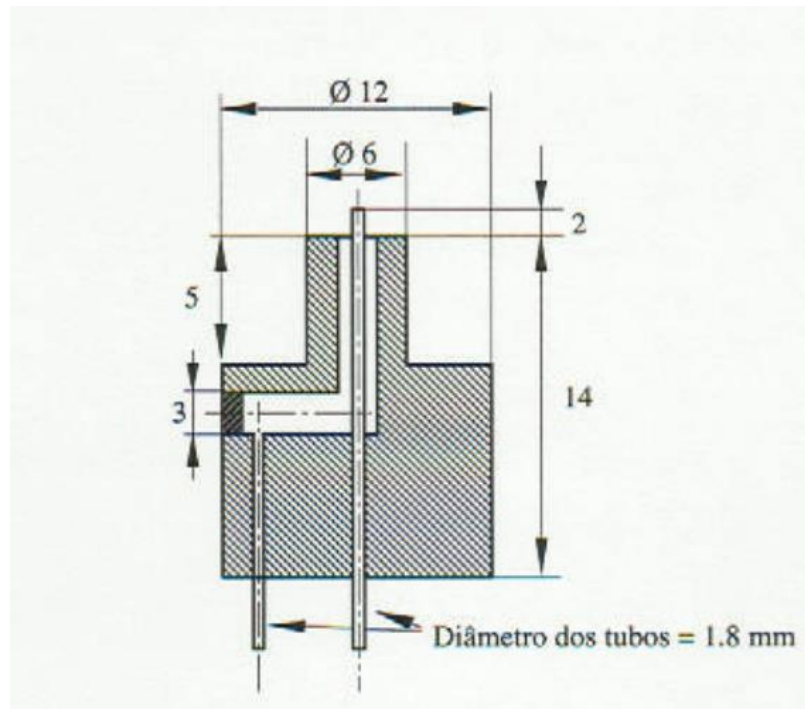


Figura 2.4. Vista em corte do esquema de uma sonda de Irwin, fonte Ferreira (1993).

Tabela 2.1. Equações de calibração das sondas de Irwin (Ferreira, 1993).

Δp [N/m ²]	Equação da curva de calibração
[0 , 12[$\tau_{\omega} = 0.355 \times (\Delta p)^{0.6906}$
[12 , 41.6[$\tau_{\omega} = 0.0439 \times (\Delta p) \times 0.0134$
[41.6 , 200]	$\tau_{\omega} = 0.1229 \times (\Delta p) \times 0.0115$

Segundo Irwin (1980), o efeito de esteira deixa de existir para distâncias entre duas sondas na mesma linha superiores a 25 vezes x/h , em que x [mm] é a distância entre duas sondas na mesma linha e h [mm] é a diferença de altura entre as duas tomadas de pressão da sonda, o que corresponde a 50 mm de distância mínima. Como 50 mm em relação às dimensões do modelo é um valor muito elevado, as sondas foram distribuídas em três filas, estando estas distanciadas entre si 25 mm. Assim, a instalação das sondas foi feita como está indicada na Figura 2.5.

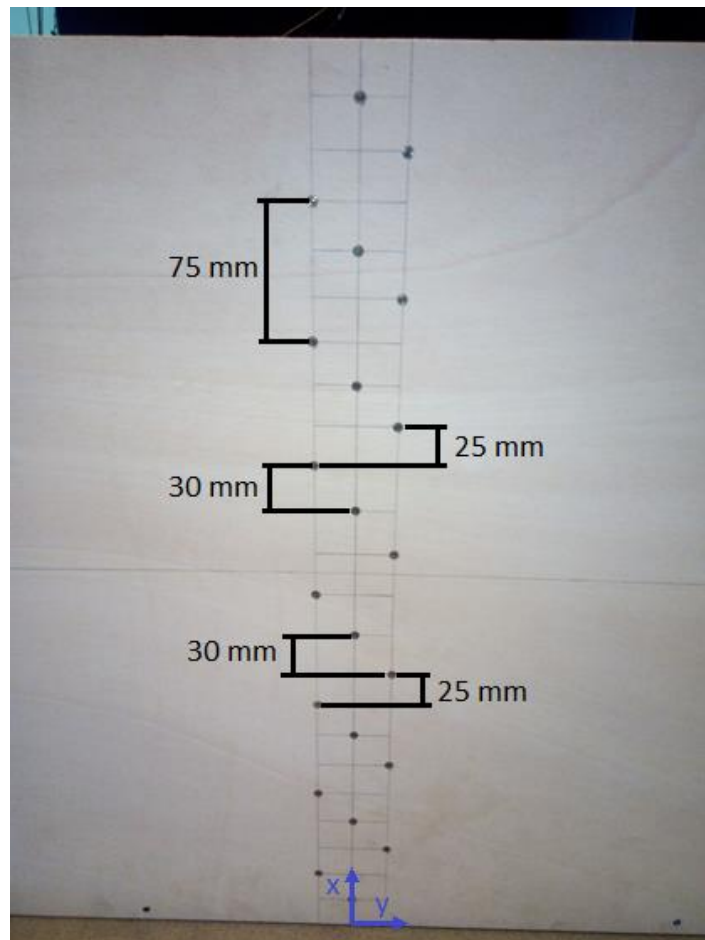


Figura 2.5. Distribuição das sondas de Irwin na cobertura do modelo.

Após a recolha de dados dos ensaios, vai-se proceder ao tratamento dos mesmos. O primeiro passo é o cálculo da diferença de pressão (Δp) entre as duas tomadas de pressão de cada sonda de Irwin. O passo seguinte é o cálculo da tensão de atrito (τ_w) que é feito através das equações de calibração indicada na Tabela 2.1 e é calculada para cada sonda baseada no Δp . Por fim pode ser calculada a velocidade de atrito (u_*) recorrendo à equação 2.3.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \text{ [m/s]} \quad (2.3)$$

De modo a comparar os resultados mais facilmente, vai ser calculado o coeficiente de atrito (C_f) através da equação 2.4.

$$C_f = \frac{u_*^2}{\frac{1}{2}V_0^2} \quad (2.4)$$

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações computacionais são um excelente método para obter resultados com um baixo custo pois na sua maioria podem ser feitas em computadores pessoais. Mas estas simulações carecem de resultados reais de modo a ser feita uma comparação. Para isso foram realizados os ensaios laboratoriais descritos no Capítulo 2.

Nesta componente utilizou-se o *software* OpenFoam pois este é de distribuição gratuita e com uma grande variedade de modelos de turbulência o que o torna uma ferramenta de utilização muito frequente em termos de trabalhos de investigação.

De modo a validar as simulações do escoamento de ar na cobertura de edifícios com painéis solares são realizadas simulações utilizando um caso de referência do escoamento de ar em torno de um cubo que posteriormente vão ser comparados com os resultados experimentais de Castro e Robbins 1980.

3.1. Escoamento de ar em torno de um cubo isolado

O cubo em estudo tem aresta unitária, de valor H . O modelo do mesmo foi desenhado em *SolidWorks* e guardado com a extensão *.STL*. O arquivo STL é um ficheiro de texto que é criado para cada superfície do modelo no qual estão indicadas as coordenadas da superfície. Os ficheiros das diferentes superfícies são depois agrupados num só.

De seguida é utilizado o Helyx OS, que é uma interface gráfica do OpenFoam. Primeiro é importado o ficheiro STL. São inseridos os valores referentes ao domínio de cálculo que está indicado na Figura 3.1. O passo seguinte é a escolha da densidade da malha, para a qual temos 120 elementos no eixo ox , 30 para oy e 60 para oz , esta é considerada a malha nível 0. Na Figura 3.2 está feita uma representação gráfica do que são os níveis de malha. Podem ser criados elementos nos quais é o refinamento da mesma nos locais que sejam de particular interesse, neste caso foi feito o refinamento na superfície do cubo com uma malha de nível 7 e uma malha volumétrica com os níveis indicados na Tabela 3.1.

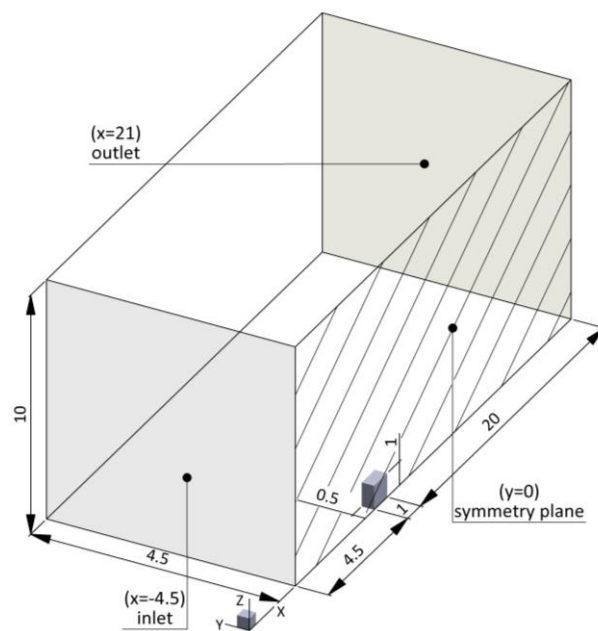


Figura 3.1. Domínio de cálculo para a simulação do cubo (dimensões indicadas em metros).

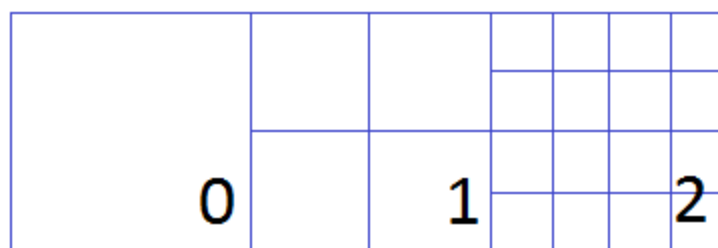


Figura 3.2. Representação gráfica dos níveis de malha.

Tabela 3.1. Níveis de malha.

Distância à superfície do cubo [m]	Nível
0.1	6
0.2	5
0.3	4
0.4	3
0.6	2

Depois de criada a malha faz-se a configuração do caso. Primeiro é escolhido o regime, de seguida o tipo de escoamento e por fim o modelo de turbulência. Neste caso foram utilizados dois modelos, o $k-\epsilon$ e o $k-\omega$ SST.

O passo seguinte é a escolha do fluido e as suas características. No caso em estudo é o ar e as características foram as pré-definidas pelo *software*.

A especificação das condições de fronteira é feita para cada superfície de acordo com a Figura 3.1. Na superfície com a indicação *inlet* é indicado o perfil de velocidade incidente para o qual foram estudados dois casos indicados na Figura 3.3, o caso A onde a velocidade é uniforme e o caso B no qual a velocidade do escoamento varia com a altura. É também aqui que são indicadas as propriedades relativas à turbulência dos modelos, para o modelo k- ϵ são $k = 3.7 \times 10^{-5}$ [m²/s²] e $\epsilon = 2.07 \times 10^{-8}$ [m²/s³] e para o modelo k- ω SST são $k = 3.7 \times 10^{-5}$ [m²/s²] e $\omega = 6 \times 10^{-3}$ [1/s].

Para superfície com a indicação *outlet*, o valor da pressão é fixado e corresponde ao da pressão ambiente. Quanto à velocidade do escoamento é de gradiente zero assim como a turbulência.

A superfície com a indicação *symmetry plane* é o plano de simetria. Por fim, superfície do cubo e as restantes superfícies são indicadas como parede.

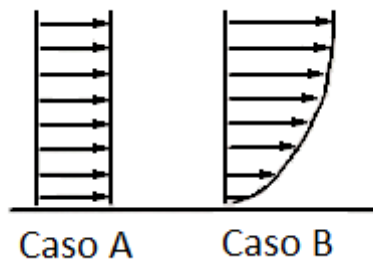


Figura 3.3. Perfis de velocidade.

De seguida temos os esquemas numéricos e as características de resolução, os valores utilizados são os pré definidos pelo *software*.

Falta definir as iterações, para o qual temos o valor final de 6000 iterações e a guardar os resultados a cada 250 iterações. O número de iterações foi escolhido de modo a que a convergência do sistema ocorra antes do valor final. Caso isto não aconteça, é possível fazer a análise dos resíduos para decidir se vale apenas fazer mais iterações.

3.2. Escoamento de ar na cobertura de edifício com painéis solares

O procedimento é igual ao indicado na secção 3.1 com algumas alterações de modo a ajustar ao novo modelo. O primeiro ajuste é o desenho do modelo do edifício em

4. RESULTADOS

Neste capítulo vai ser feita a discussão dos resultados experimentais e computacionais. Em primeiro é feita a discussão dos resultados relativamente aos ensaios laboratoriais e depois as comparações entre os resultados experimentais e os computacionais.

Os resultados apresentados têm uma nomenclatura igual à apresentada a seguir E | 2RG16P, na qual E significa que são resultados experimentais, o 2R do inglês *rows* corresponde ao número de filas de painéis, o G16 do inglês *gap* corresponde à distância entre a cobertura e os painéis solares, por fim P que significa positivo, quando o painel está inclinado contra o vento ou N de negativo, quando o painel está inclinado a favor do vento. Existe ainda o caso especial E | OR, que corresponde à cobertura do edifício sem painéis solares.

Nos gráficos apresentados estão indicados dois símbolos no eixo horizontal + e O, estes indicam a posição das filas de painéis solares, + para a orientação positiva e O a orientação negativa.

4.1. Ensaio laboratoriais

Na Figura 4.1 apresentam-se as distribuições do coeficiente de pressão para as diferentes distâncias entre as filas de painéis solares e a cobertura. Os valores são muito semelhantes como pode ser visto na figura 4.1, sendo que para a distância de 8 mm (G08) existe uma diferença relevante junto à segunda fila de painéis solares.

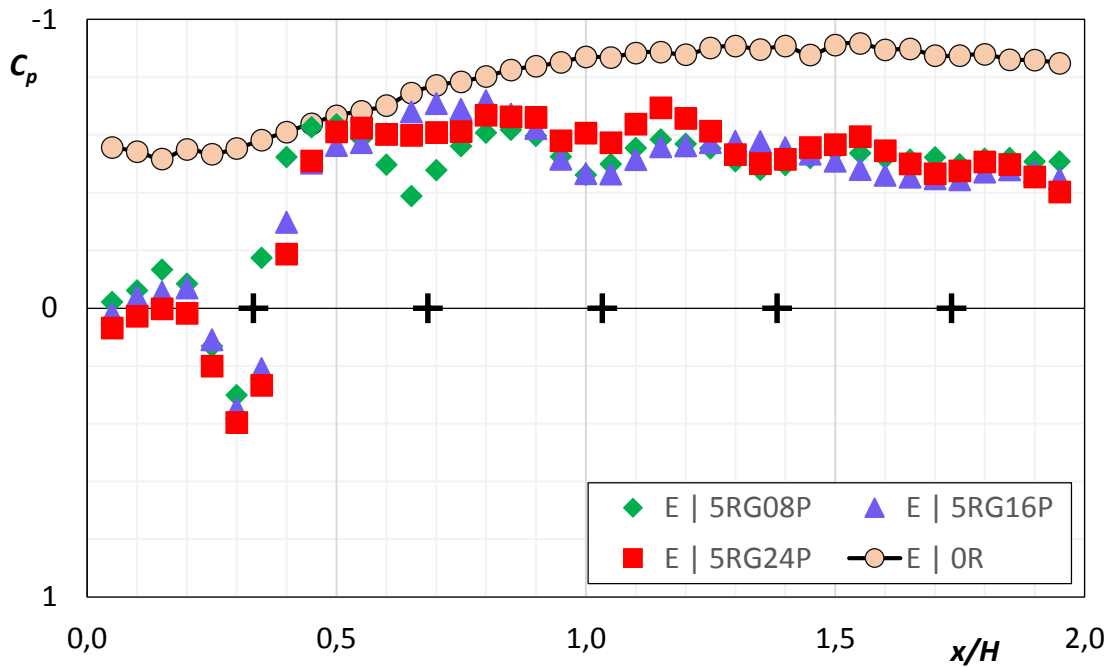


Figura 4.1. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão para as diferentes distâncias entre o painel e a cobertura.

De seguida temos a variação do coeficiente de pressão com o número de filas de painéis solares e, como pode ser visto na figura 4.2, a partir da terceira fila de painéis solares a variação é insignificante.

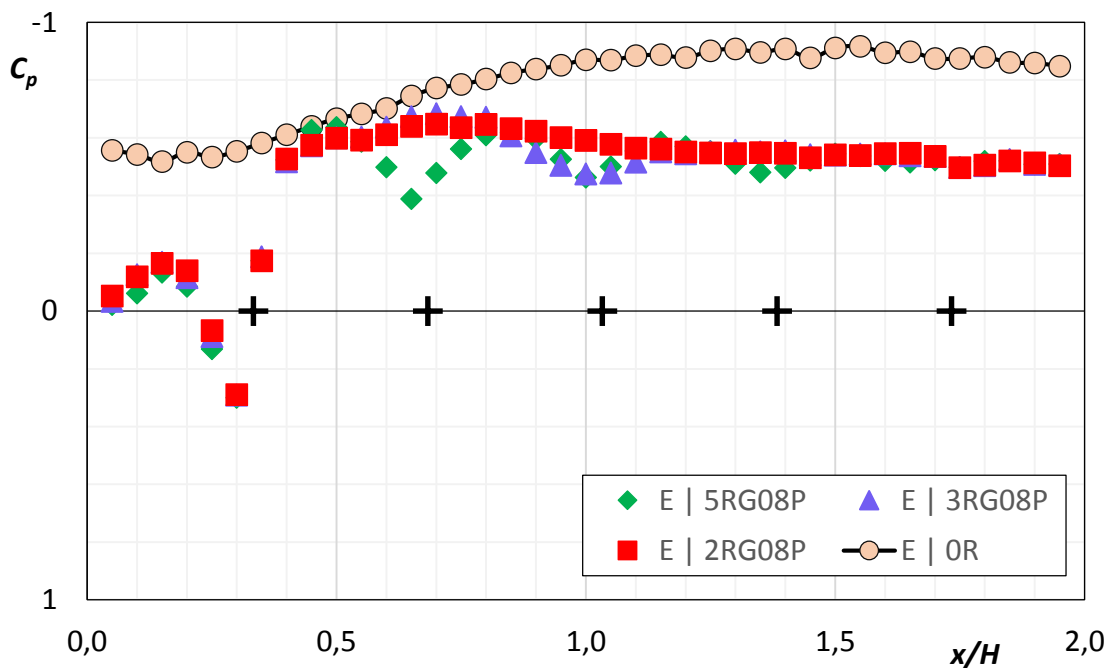


Figura 4.2. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão com o número de filas de painéis solares.

Os resultados referentes à variação da orientação dos painéis solares em relação ao escoamento pode ser vista na Figura 4.3. Para a orientação positiva existem valores do coeficiente de pressão positivos na zona da primeira fila de painéis solares enquanto na orientação negativa na zona da primeira fila de painéis solares existe uma variação mas muito suave quando comparada com a positiva.

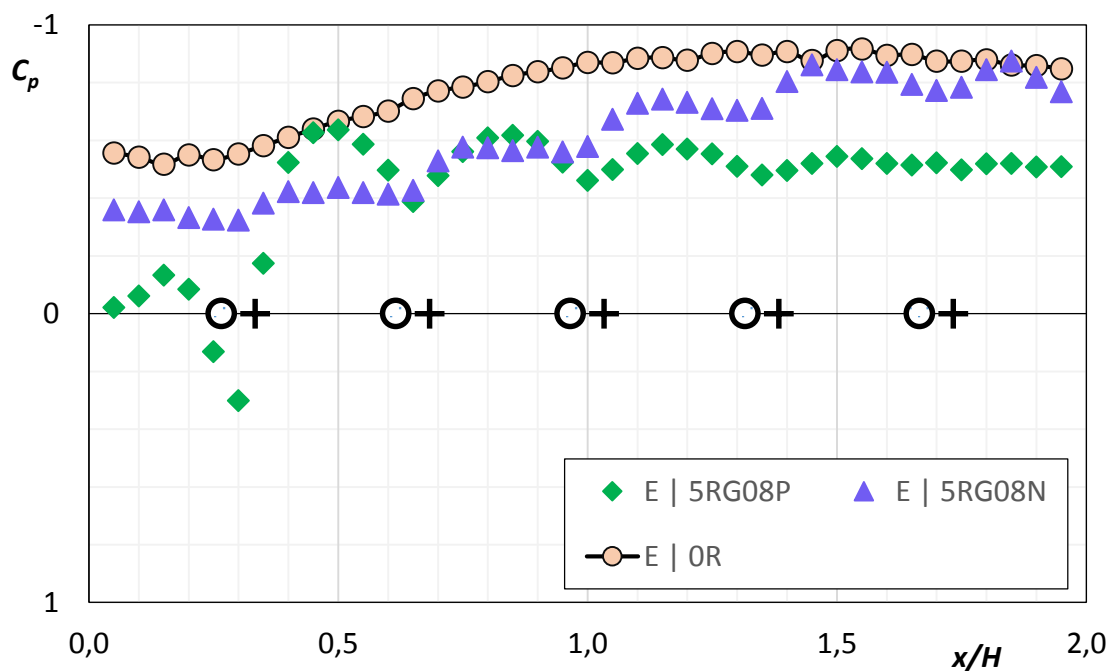


Figura 4.3. Valores experimentais para a variação do coeficiente de pressão para as diferentes orientações dos painéis solares em relação ao escoamento de ar.

Analisa-se agora a influência dos painéis no coeficiente de atrito. Os resultados de C_f apresentados estão multiplicados por 10^3 porque os valores são muito pequenos. Como pode ser verificado na Figura 4.4, as três curvas têm variações semelhantes, sendo os valores proporcionais à distância dos painéis à cobertura do edifício.

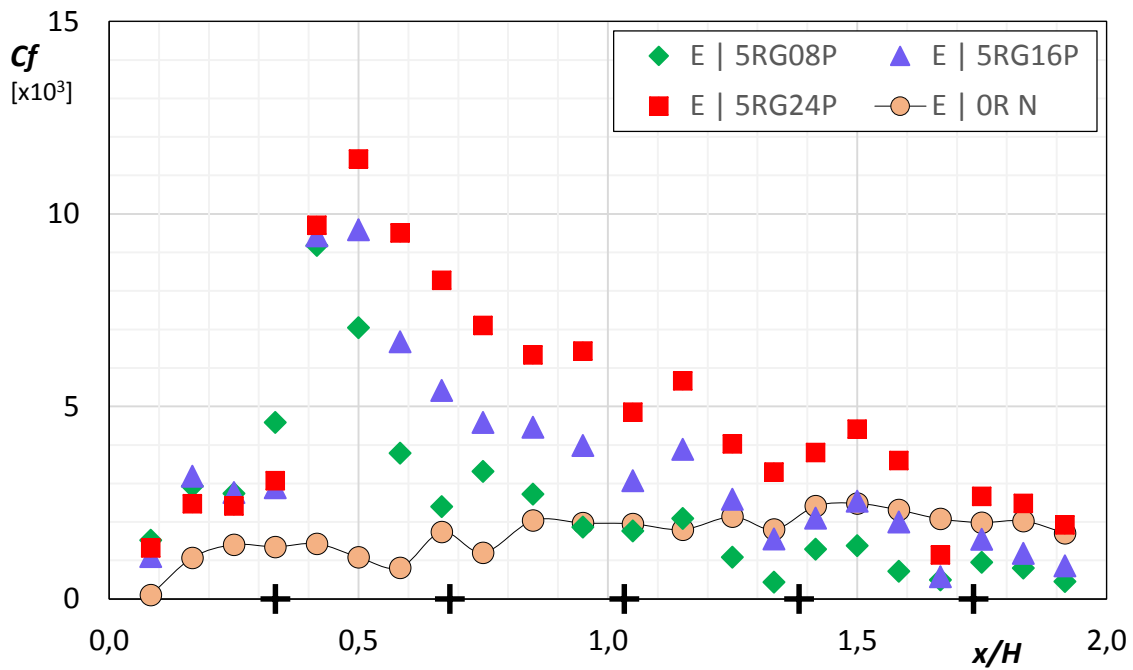


Figura 4.4. Valores experimentais para a variação do C_f para as diferentes distâncias entre o painel e a cobertura.

A diferença do C_f devido à orientação do escoamento é grande como pode ser visto na figura 4.5, sendo que para a orientação positiva os valores de C_f são muito superiores em relação aos obtidos para a orientação negativa.

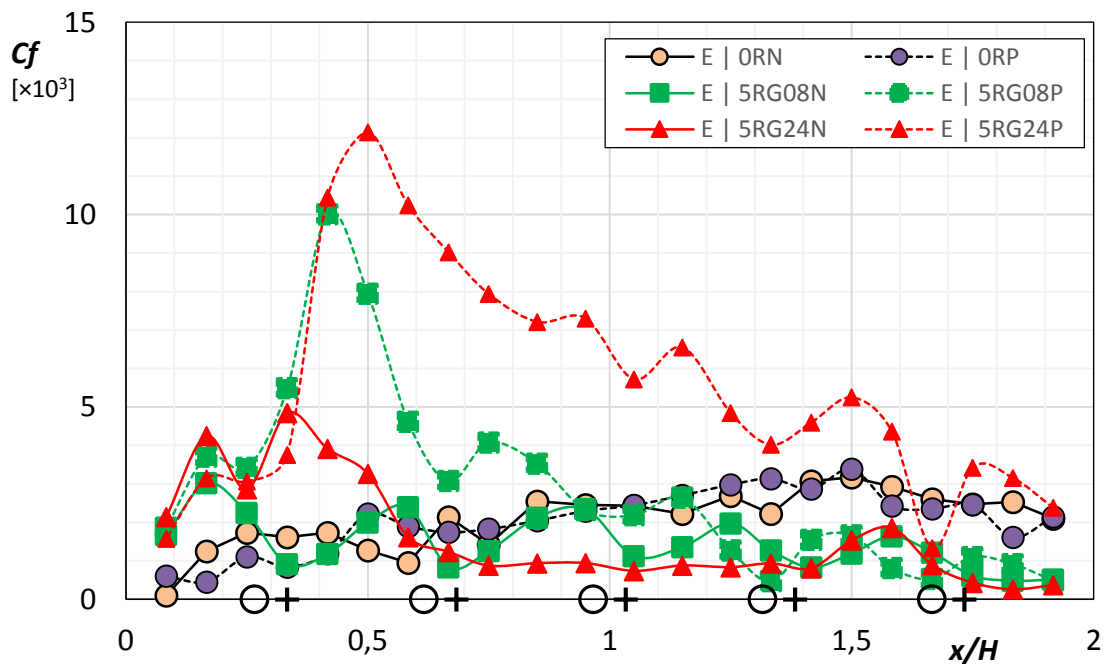


Figura 4.5. Valores experimentais para a variação do C_f para as diferentes orientações dos painéis solares em relação ao escoamento de ar.

4.2. Resultados computacionais e comparação com as medições experimentais

Esta subsecção vai ser dividida em duas, a primeira referente aos resultados obtidos do cubo e uma segunda referente ao modelo em estudo.

4.2.1. Caso do cubo

Para o caso de um perfil de velocidades uniforme, os valores da distribuição da pressão obtidos pela simulação numérica, para o modelo de turbulência k- ϵ , são próximos das medições de Castro e Robbins (1977) relativamente à linha A e C, já no que diz respeito à linha B estes já estão muito afastados na primeira metade da linha como pode ser verificado na figura 4.6. Quanto à simulação utilizando o modelo k- ω SST, os resultados obtidos apresentam uma concordância bastante boa.

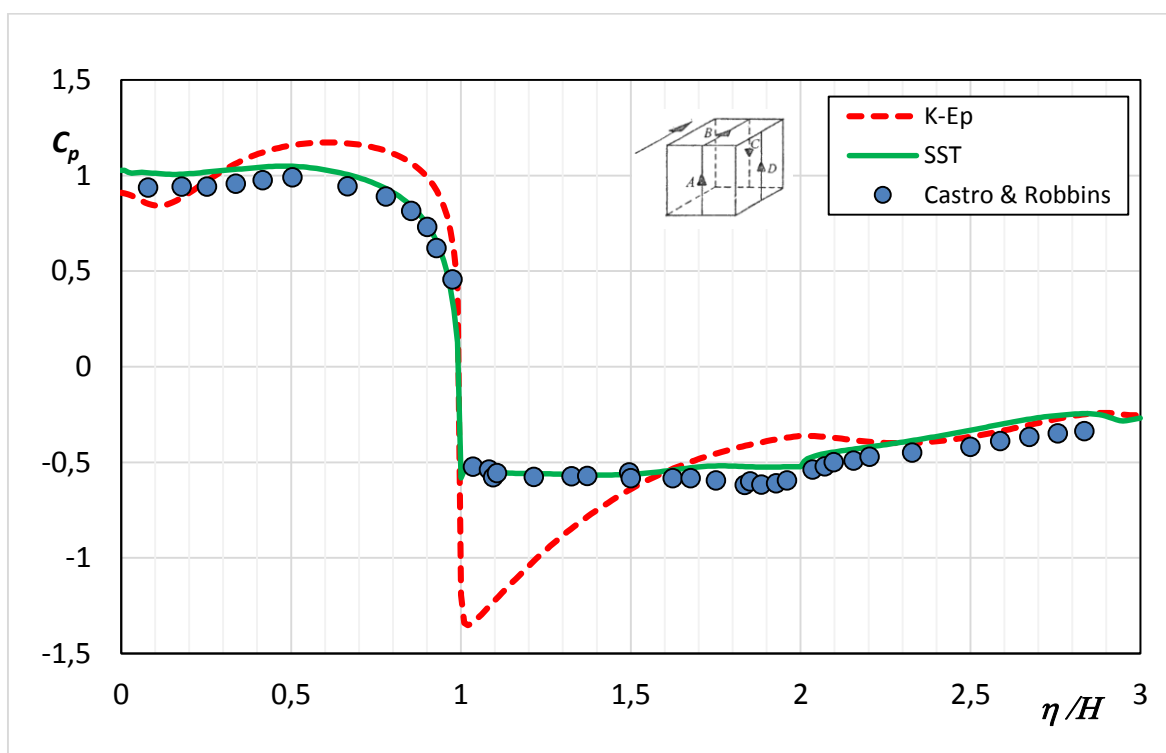


Figura 4.6. Simulações computacionais e os resultados de Castro e Robbins (1977) para o perfil de velocidade na entrada uniforme.

Para o caso em que o perfil de velocidade escoamento na entrada que varia com a altura, como se pode verificar na figura 4.7, os resultados obtidos pelas simulações numéricas não são tão bons como os obtidos no caso anterior. Agora os resultados para o modelo de turbulência k- ϵ estão mais próximos dos valores experimentais de Castro e

Robbins (1977). Na linha A ambas as simulações estão muito próximas dos dados experimentais, na linha B a curva do modelo k- ϵ está mais próxima da experimental mas com valores mais elevados no geral, quanto à linha C ambas estão próximas dos dados experimentais.

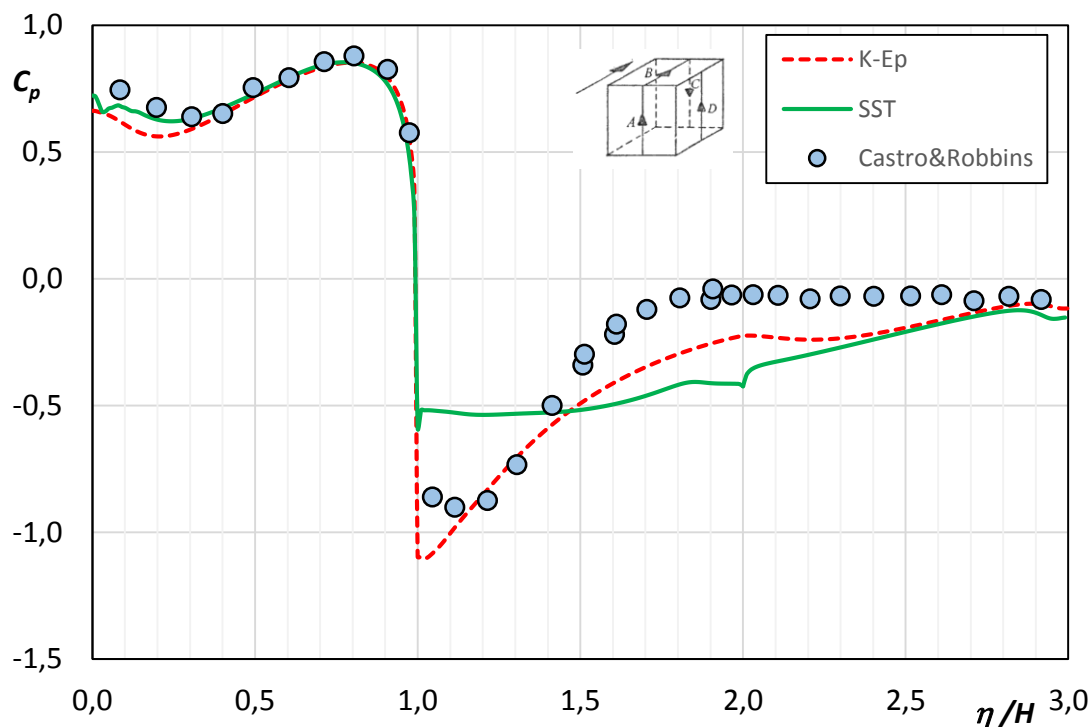


Figura 4.7. Simulações computacionais e os resultados de Castro e Robbins (1977) para o escoamento que varia com a altura.

4.2.2. Cobertura de edifício com painéis solares

Por último faz-se a comparação entre os resultados experimentais e as simulações. Tal como pode ser visto nas figuras 4.8 e 4.9, a curva da simulação computacional segue a tendência da curva de resultados experimentais apesar de existir uma grande diferença entre os resultados obtidos para o escoamento positivo. Para a orientação negativa os resultados da simulação computacional são muito próximos dos resultados experimentais.

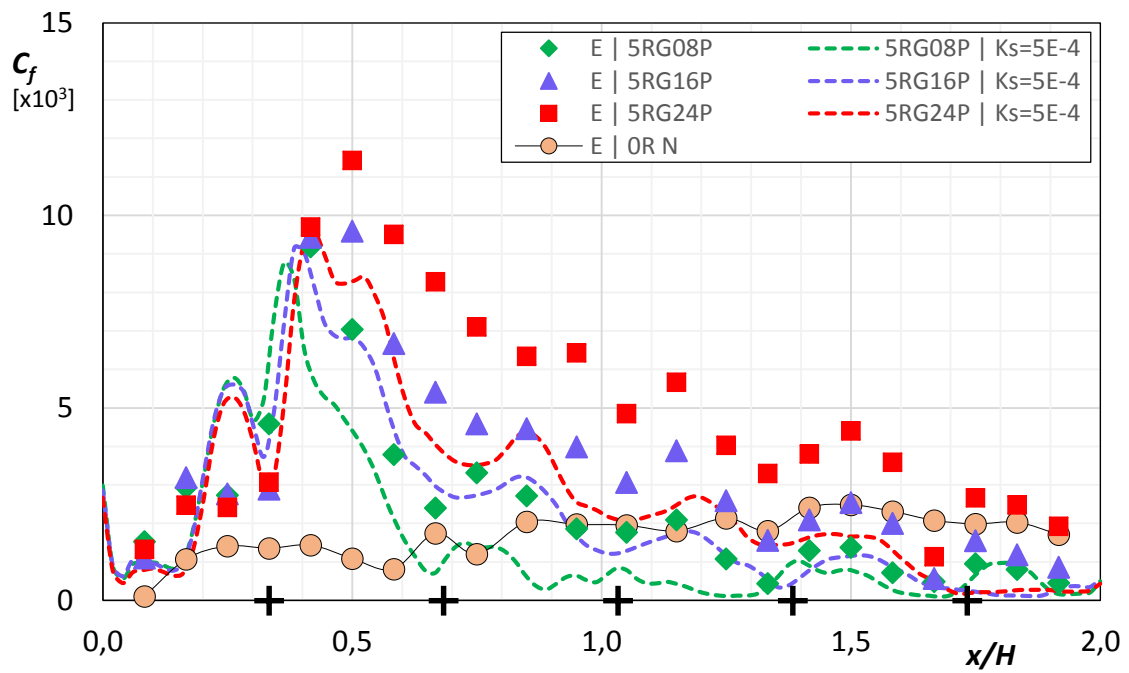


Figura 4.8. Coeficiente de atrito ao longo da cobertura do edifício para o caso dos painéis com inclinação positiva.

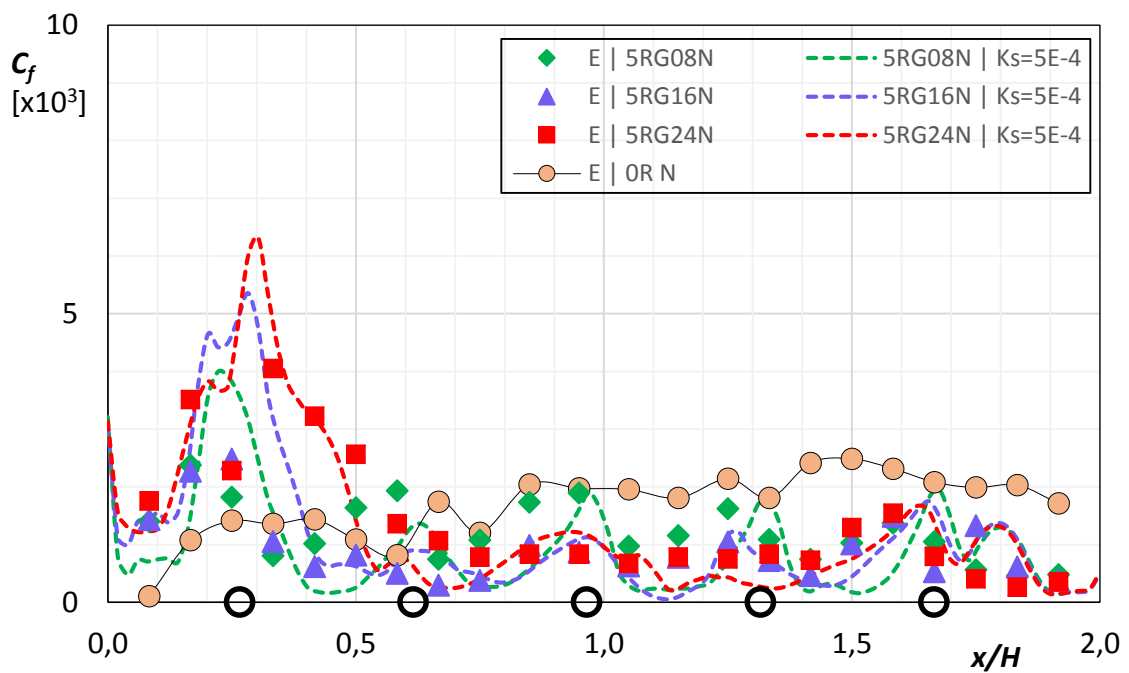


Figura 4.9. Coeficiente de atrito ao longo da cobertura do edifício para o caso dos painéis com inclinação negativa.

5. CONCLUSÕES

A comparação dos resultados obtidos nas simulações com os resultados laboratoriais demonstrou que as curvas das simulações seguem os resultados experimentais, embora com alguma diferença.

Os valores do coeficiente de pressão para a orientação positiva dos painéis são mais elevados junto da fachada de montante do edifício, comparativamente aos valores da orientação negativa.

Para a orientação negativa do escoamento os resultados obtidos para as diferentes distâncias dos painéis à cobertura do edifício têm diferenças muito pouco significativas, já para a orientação positiva o aumento da distância leva a um aumento da velocidade de atrito.

Outra conclusão que se pode tirar é que a primeira fila de painéis em relação à orientação do escoamento é a que mais afeta o escoamento e a partir da terceira fila de painéis solares o escoamento não é afetado para ambas as orientações.

A análise dos resultados revela que a introdução dos painéis solares leva a um aumento da velocidade de atrito e de que a orientação positiva dos painéis solares leva a valores mais elevados da velocidade de atrito, o que geralmente conduz a um aumento da quantidade de neve removida.

5.1. Trabalhos futuros

O assunto tratado neste trabalho têm uma bibliografia muito reduzida, mas com um grande potencial, outras configurações devem ser consideradas. O impacto no escoamento provocado pela introdução de edifícios nas redondezas do edifício com painéis solares na cobertura não é conhecido, pelo que é sugerido um estudo dessa situação.

Recomendam-se estudos nos quais sejam introduzidos defletores de ar na cobertura de modo a analisar qual o impacto dos mesmos na erosão de neve. Estes estudos devem ser realizados em *softwares* CFD e túneis de vento de modo a validar os resultados dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, I.P. e Robins, A.G. (1977), “The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 79, part 2, 307-335.
- Ferreira, A.D. (1993). “Contribuição para o estudo do escoamento turbulento adiabático em torno de colinas bidimensionais”. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Irwin, H.P.A.H. (1981), “A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 7, 219-239.
- Thisis, T., Ferreira, A.D., Molnar, M. e Erichsen, A.V. (2014), “Measurements of shear stress distribution on a flat roof with solar collectors” comunicação para 7th International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort.