

## **Agradecimento**

Ao professor Almerindo Domingues Ferreira, pela oportunidade e prontidão em ajudar e motivar, mas principalmente pela grande capacidade de orientação, sabendo distinguir da melhor forma, quando ajudar a ultrapassar passos difíceis mas principalmente quando me obrigava a pensar e a ultrapassá-los sozinho, aumentando a minha autonomia e capacidade mas principalmente a minha auto-confiança e motivação. Um muito obrigado

Aos meus colegas e amigos pelo companheirismo e ajuda, mas principalmente pela amizade tanto nos momentos de estudos, bem como nos momentos de diversão não esquecendo os mais distantes na terra natal, os que criei na faculdade mas principalmente os que comigo partilharam a mesma casa, substituindo da melhor forma possível a família distante.

A minha família, os meus avós, a minha irmã e os meus pais que sempre me apoiaram e deram os melhores conselhos e condições para poder da melhor forma concretizar esta etapa da minha vida.

E por fim, a todos os que contribuíram e ajudaram de alguma forma para a realização deste trabalho um muito obrigado.

## Resumo

A crescente valorização dos terrenos, principalmente nas grandes cidades, levou à necessidade de obter o maior benefício das construções, como por exemplos dos edifícios de forma a obter o maior proveito dos mesmos.

Esse facto conduziu a que se tornassem mais altos e, conseqüentemente, mais susceptíveis à acção do vento. Os regulamentos de segurança às acções em estruturas de edifícios, códigos e normas, por vezes são limitados quando as construções apresentam estruturas complexas.

Nessas situações, o ensaio em túnel de vento, usando um modelo à escala, é a solução mais viável por forma a determinar o efeito do vento no edifício, quando respeitadas condições de semelhança, ainda que parcial, nos ensaios.

O estudo aqui apresentado tem como objectivo determinar a carga aerodinâmica num edifício. Para tal foram realizados ensaios em túnel de vento, de forma a obter os coeficientes de pressão, usando uma maqueta do edifício construída à escala 1:100. Os ensaios foram realizados para oito rumos de incidência. A partir do coeficiente de pressão medido experimentalmente, traçaram-se as respectivas isolinhas nas faces das torres com auxílio de um programa apropriado, e calcularam-se as forças e momentos resultantes em cada face, valores que obtidos podem ser usados no projecto de estrutura do edifício.

Com o estudo da acção do vento neste edifício foi possível concluir que as torres que se encontram mais a barlavento do escoamento são as mais afectadas, e que para alguns rumos, algumas faces estão sujeitas a grandes pressões ou sucções podendo isso causar efeitos indesejáveis na estrutura, nos edifícios vizinhos, nos utentes, bem como nos pedestres que circulem na sua proximidade.

Palavras-chave: acção do vento; pressão; força; edifício.

## Abstract

The increasing value of land, mainly in large cities, led to the need of getting as much benefit as possible from constructions, such as buildings, in order to obtain the greatest benefit from them.

This has led to higher buildings which are, therefore, more vulnerable to wind action. Security regulations towards actions in structures of buildings, codes and standards are, sometimes, limited when the constructions present complex structures.

In these situations, tests in a wind tunnel with a scale model, are the most viable solution to establish the effects of wind on the building, whenever conditions of similarity, although some times just partial, are respected.

The main goal of the present study is to establish the aerodynamic load on the building due to wind action. For this, tests were made in a wind tunnel, in order to get pressure coefficients in a representative 1:100 scale model of a building. The tests were performed for eight different directions. The building consists in a base and four towers of rounded shape.

With the got under experience, The pressure coefficients isolines were obtained for the facades of the towers with the aid of an appropriate program, and the resulting forces and moments on each buinding face calculated, and can be used for the project of the building.

By studying the wind action in this building it was possible to conclude that the towers facing the windward direction are the ones more affected by the wind, and, for some directions, a few facades are under great pressure or suction which may cause undesired effects in the structure, surrounding buildings, occupants, as well as on pedestrian moving in its vicinity.

Key words: wind action; pressure; force; building.

# Índice

|  |     |
|--|-----|
| <b>Agradecimento</b> .....   | i   |
| <b>Resumo</b> .....  | ii  |
| <b>Abstract</b> .....  | iii |
| <b>Índice</b> .....  | iv  |
| <b>Lista de Figuras</b> .....  | vi  |
| <b>Lista de Tabelas</b> .....  | vi  |
| <b>Lista de abreviaturas</b> .....   | vii |
| <b>1 Introdução</b> .....  | 1   |
| 1.1 Breve pesquisa bibliográfica .....   | 2   |
| 1.2 Aplicações .....   | 3   |
| 1.3 Objectivo .....  | 3   |
| <b>2 Conceitos</b> .....   | 5   |
| 2.1 Vento .....  | 5   |
| 2.2 Camada limite atmosférica (CLA) .....  | 5   |
| 2.3 Escoamento .....   | 7   |
| 2.4 Pressão (P) .....  | 7   |
| 2.5 Forças (F) e momentos (M) .....  | 8   |
| 2.6 Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP) ..... | 8   |
| <b>3 Efeito do vento em edifícios</b> .....  | 13  |
| <b>4 Túnel de vento e modelo experimental</b> .....  | 17  |
| 4.1 Túnel de vento .....   | 17  |
| 4.2 Modelo experimental .....  | 18  |
| 4.3 Instrumentação e procedimento experimental .....                                       | 21  |
| 4.4 Verificação das condições de independência do número de Reynolds .....                 | 24  |
| <b>5 Apresentação e discussão de resultados</b> .....                                      | 25  |
| 5.1 Representação bidimensional de isolinhas de pressão .....                              | 25  |
| 5.2 Representação tridimensional (3D) de isolinhas de pressão .....                        | 27  |
| 5.3 Forças e Momentos .....  | 30  |

|          |                           |           |
|----------|---------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Conclusão</b> .....    | <b>35</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliografia</b> ..... | <b>37</b> |
|          | <b>Anexo I</b> .....      | <b>39</b> |
|          | <b>Anexo II</b> .....     | <b>45</b> |
|          | <b>Anexo III</b> .....    | <b>48</b> |
|          | <b>Anexo IV</b> .....     | <b>64</b> |
|          | <b>Anexo V</b> .....      | <b>68</b> |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1.</b> - Troposfera dividida em duas partes: camada limite (parte cinza, acima da superfície terrestre) e atmosfera livre (acima da camada limite). <b>Fonte:</b> Stull (1998). ..... | 5  |
| <b>Figura 2.2</b> – Perfis médios de vento para diferentes terrenos. Fonte: Mendis (2007).....  | 6  |
| <b>Figura 2.3</b> - Valor característico da pressão dinâmica, $wk$ (KN/m <sup>2</sup> ) Fonte: RSAEEP (2007) .....  | 11 |
| <b>Figura 3.1</b> – Esquema da acção do vento num edifício.....   | 13 |
| <b>Figura 3.2</b> – Esquema de vento a barlavento.....  | 13 |
| <b>Figura 3.3</b> – Esquema de vento paralelo. ....   | 13 |
| <b>Figura 3.4</b> – Esquema de vento a sotavento .....  | 14 |
| <b>Figura 3.5</b> – Esquema de pressão interna do vento.....  | 14 |
| <b>Figura 3.6</b> – Esquema da sucção interna do vento.....   | 14 |
| <b>Figura 4.1</b> – Correlação da velocidade do Túnel de vento. ....  | 17 |
| <b>Figura 4.2</b> – Maqueta utilizada como modelo experimental. ....  | 18 |
| <b>Figura 4.3</b> – Vista de topo da maqueta com a designação das torres e respectivas faces. ....  | 19 |
| <b>Figura 4.4</b> – Exemplo de legenda da dimensão das torres. ....   | 20 |
| <b>Figura 4.5</b> - Perfuração de uma torre, e <b>Figura 4.6</b> – Torres e respectivas tomadas de pressão. ....  | 21 |
| <b>Figura 4.7</b> -Tomadas ligadas ao anel e <b>Figura 4.8</b> –Scanivalve e numeração das tomadas de pressão. ....   | 21 |
| <b>Figura 4.9</b> – Área representativa de cada tomada de pressão. ....   | 22 |
| <b>Figura 4.10</b> – Visualização dos diferentes rumos estudados .....  | 23 |
| <b>Figura 4.11</b> – Maqueta no túnel de vento durante os ensaios (vista a sotavento).....  | 24 |
| <b>Figura 5.1</b> – Aspecto da interface do <i>Tecplot</i> na interpolação dos ficheiros.....   | 25 |
| <b>Figura 5.2</b> - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R1. ....   | 26 |
| <b>Figura 5.3</b> – Geometria da maqueta e malha usada na torre A.....  | 27 |
| <b>Figura 5.4</b> – Interface do tratamento da representação 3D no <i>Tecplot</i> . ....  | 28 |
| <b>Figura 5.5</b> - Isolinhas do coeficiente de pressão para rumo R7. ....  | 29 |
| <b>Figura 5.6</b> – Sistemas de eixos de referência. ....   | 30 |

## Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> – Distribuição das tomadas de pressão pelas torres. ....            | 22 |
| <b>Tabela 2</b> – Forças e momentos resultantes para os rumos R1, R2, R5 e R6 ..... | 32 |

## Lista de abreviaturas

**C<sub>p</sub>** – Coeficiente de pressão.

**P** – Pressão. [Pa]

**CLA** – Camada limite atmosférica.

**AL** – Atmosfera livre. [Pa]

**P<sub>0</sub>** - Pressão de referência. [Pa]

**ρ** – Massa específica ou densidade. [Kg/m<sup>3</sup>]

**V** – Velocidade. [m/s]

**F** – Força. [N]

**F<sub>x</sub>** – Força na direcção segundo o eixo do X. [N]

**F<sub>y</sub>** - Força na direcção segundo o eixo do Y. [N]

**F<sub>z</sub>** - Força na direcção segundo o eixo do Z. [N]

**F<sub>N</sub>** – Força normal a superfície. [N]

**M** – Momento. [N.m]

**M<sub>x</sub>** – Momento em torno do eixo do X. [N.m]

**M<sub>y</sub>** – Momento em torno do eixo do Y. [N.m]

**M<sub>z</sub>** – Momento em torno do eixo do Z. [N.m]

**A** – Área [m<sup>2</sup>]

**B** – Braço, isto é, distância entre a aplicação da força e o eixo de referência [m]

**B<sub>x</sub>** - Braço na direcção X. [m]

**B<sub>y</sub>** – Braço na direcção Y. [m]

**B<sub>z</sub>** – Braço na direcção Z. [m]

**W** – Pressão dinâmica do vento. [KN/m<sup>2</sup>]

**H<sub>max.</sub>** – Altura máxima da torre. [mm]

**H<sub>min.</sub>** – Altura mínima da torre. [mm]

**L** – Largura da torre. [mm]

**C<sub>ext.</sub>** – Comprimento exterior da torre. [mm]

**C<sub>int.</sub>** – Comprimento interior da torre. [mm]

# 1 Introdução

A crescente necessidade de projectos cada vez mais económicos, bem como a valorização dos terrenos nos grandes centros urbanos exigem se potencie o seu aproveitamento, objectivo alcançável por meio do desenvolvimento de técnicas construtivas e de processos de análise estrutural que vão tornar as construções mais altas, leves e flexíveis mas, conseqüentemente, mais susceptíveis a problemas de vibrações, nomeadamente as induzidas pela acção do vento.

Ao longo dos tempos foram desenvolvidas técnicas para vencer os desafios com que a engenharia do vento se depara no sentido de melhorar a resposta dos edifícios altos à acção do vento. O túnel de vento é a principal ferramenta utilizada para vencer esses desafios, pois vários estudos comparativos têm mostrado confiança nos resultados obtidos. Contudo, quando se trata de tempestades tropicais e furacões, são necessárias informações mais precisas do meio e da turbulência de forma a garantir precisão dos resultados. Os estudos em causa complementam os regulamentos e normas, sendo estes os mais utilizados por projectistas para estruturas expostas ao vento.

O efeito do vento não é um problema em construções baixas e pesadas, com paredes grossas, porém em estruturas esbeltas passa a ser um dos factores mais importantes a ter em conta no projecto de estruturas, uma vez que a distribuição de pressões num edifício depende essencialmente de aspectos geométricos, de localização, orientação e obstáculos na sua proximidade.

A maioria dos acidentes ocorre em construções leves, principalmente com grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de feiras e exposições, pavilhões industriais, coberturas de estádios, torres, etc. Com esta realidade é importante que se desenvolvam técnicas de forma a minimizar esses problemas.

O trabalho desenvolvido na presente tese consistiu no estudo do efeito do vento num edifício, por meio de uma maqueta inserida num túnel de vento, de forma a obter a carga aerodinâmica no mesmo.

## 1.1 Breve pesquisa bibliográfica

A acção do vento em edifícios tem vindo a constituir uma preocupação acima de tudo para projectistas. Vários estudos têm sido desenvolvidos por investigadores com a finalidade de melhor perceber o comportamento do vento, sobretudo nos centros urbanos, de forma a prevenir os seus efeitos nas construções.

Bortoli (2005) estudou o efeito do meio urbano na acção do vento sobre edifícios e analisou a influência da velocidade e respectivas pressões nas referidas construções em função da sua localização, através de ensaios em túnel de vento.

Jorge (2001) estudou a acção do vento no edifício da nova sede da Telecel, para obter a resposta dinâmica dos elementos sombreadores das salas tendo desde logo em consideração a envolvente, e avaliar as condições de conforto térmico e mecânico na área pedonal exterior.

Sousa *et al.* (2002), realizou um estudo em túnel de vento da cobertura do Aeroporto Internacional dos Guarapares, Recife, visando obter os coeficientes de pressão.

A investigação de Mendis *et al.* (2007), consistiu na análise do carregamento do vento em edifícios altos, sobretudo no que diz respeito às vibrações induzidas.

Grosso *et al.* obteve a distribuição de pressão do vento em modelos expostos ao escoamento de ar, tendo concluído que é possível calcular os efeitos combinados de condições ambientais e geométricas na distribuição de pressão do vento em torno dos edifícios com suficiente precisão. O grau de exactidão é proporcional à disponibilidade dos dados experimentais a serem usados como a referência para o modelo do cálculo.

Sousa *et al.* (2008), realizou um estudo em túnel de vento da cobertura do Estádio da Gama em Brasília.

O estudo de Fontes (2003) incidiu sobre a importância dos efeitos da vizinhança na resposta dinâmica de um edifício à acção do vento, concluindo que o efeito da vizinhança sobre os edifícios é surpreendente e pouco previsível.

## 1.2 Aplicações

Os ensaios em túnel de vento têm constituído uma solução viável quando se estudam estruturas para as quais os regulamentos são limitados no para estimar a acção do vento nas mesmas.

A distribuição de pressões num edifício depende essencialmente de aspectos geométricos, de localização, orientação e obstáculos na sua proximidade. A sua geometria é um factor importante, designadamente em edifícios com formas complexas, onde pode ocorrer uma distribuição de pressões imprevisível pelos regulamentos. O local de implantação é crucial para determinar as solicitações externas no edifício, bem como a sua vizinhança, já que esta vai afectar, e muitas vezes de forma determinante, a acção do vento.

Alterações na arquitectura são, por vezes, a solução viável para evitar pressões desfavoráveis. Os valores de  $C_p$  obtidos nos ensaios podem ser aplicados no projecto de estruturas do edifício, de forma a evitar danos prejudiciais e garantir a segurança do edifício e a dos que o rodeiam.

## 1.3 Objectivo

A finalidade do presente trabalho foi determinar a carga aerodinâmica a que um edifício, composto por quatro torres, está sujeito por acção do vento.

Para atingir o objectivo foram realizados ensaios em túnel de vento com auxílio de uma maquete de um edifício, à escala de 1:100, e, numa fase posterior, efectuar o respectivo tratamento dos dados para obter as isolinhas de pressão e determinar forças e momentos resultantes nas faces das torres.

No que diz respeito às isolinhas de pressão, pretendeu-se traçar linhas de igual valor de  $C_p$  (coeficiente de pressão), de forma a analisar a pressão a que está sujeita qualquer zona do edifício (sobrepessão,  $P > 0$ ; sucção,  $P < 0$ ). Tornar os resultados mais perceptíveis exigiu tratar os dados obtidos experimentalmente com auxílio de um programa adequado.

A determinação da carga aerodinâmica a que o edifício está sujeito, impôs que se determinassem as forças e momentos resultantes nas faces das torres através do recurso aos valores experimentais.



## 2 Conceitos

É importante definir alguns conceitos para que o estudo seja mais explícito, frequentemente usados em estudos desta natureza.

### 2.1 Vento

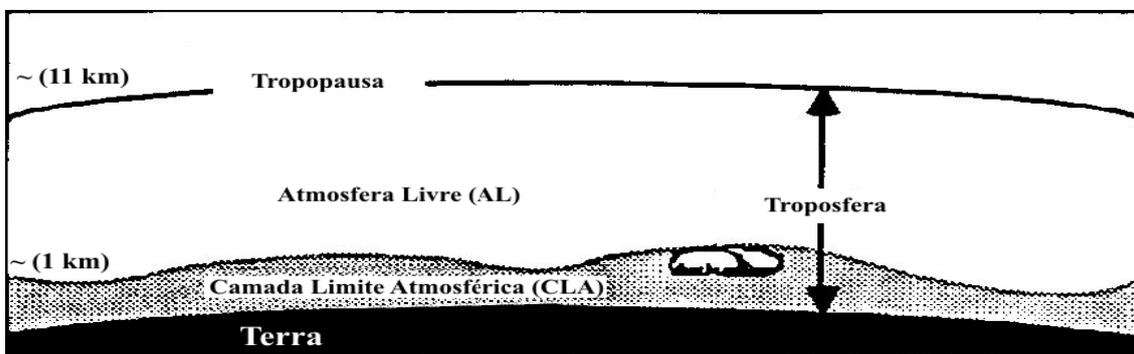
A existência de gradientes de pressão atmosférica gera o deslocamento do ar, ou seja, origina os ventos. Partindo de zonas de maior para menor pressão, os ventos sofrem também influência do movimento de rotação da Terra, bem como da topografia e consequente atrito com a superfície terrestre (Tubelis&Nascimento, 1984 – citado por Munhoz e Garcia, 2006)

As desigualdades de pressão têm uma origem térmica que está directamente relacionada com a radiação solar e com os processos de aquecimento das massas de ar. Define-se barlavento como sendo a região de onde sopra o vento (em relação à edificação) e sotavento a região oposta.

Quando o vento embate sobre uma superfície provoca uma sobrepressão (sinal positivo), porém em algumas situações pode acontecer o contrário, ou seja, existir sucção (sinal negativo) sobre a superfície. A acção do vento, em cada ponto, é sempre perpendicular à superfície, dada a definição de pressão.

### 2.2 Camada limite atmosférica (CLA)

A superfície da terra está no limite inferior do domínio atmosférico. Processos de transporte que ocorrem entre 100 a 3000m de altitude da atmosfera modificam esta zona, criando a camada limite atmosférica (CLA). O restante da troposfera é chamado de atmosfera livre (AL). A Figura 2.1 mostra esquematicamente a estrutura da troposfera, onde no limite inferior (parte cinzenta) encontra-se a CLA e a restante AL.



**Figura 2.1.** - Troposfera dividida em duas partes: camada limite (parte cinza, acima da superfície terrestre) e atmosfera livre (acima da camada limite). **Fonte:** Stull (1998).

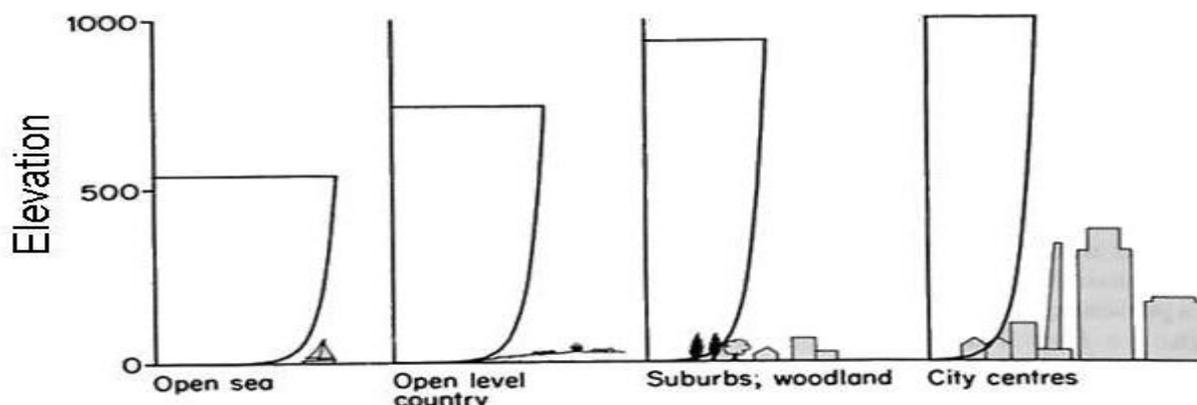
O estudo do escoamento sobre uma topologia real dentro da CLA sempre interessou a meteorologistas, engenheiros, ambientalistas, militares, desportistas, entre outros, por diversos motivos e aplicações como, por exemplo, dispersão de poluentes, posicionamento de turbinas eólicas e efeitos destrutivos em estruturas devido à acção do vento.

O vento em regiões afastadas do solo é controlado pelo equilíbrio entre a força centrífuga, de pressão e de Coriolis. Ao nível de baixa altitude, a resposta é, porém, completamente diferente. Nesta região (CLA), as características do vento são sobretudo dependentes da orografia do terreno, bem como da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos sobre ele existentes e da variação da temperatura segundo a vertical. De acordo com Moreira (2007), a camada limite atmosférica é directamente influenciada pela força de atrito, evaporação e conservação, movimentos verticais e emissão de poluentes.

A CLA pode ser definida como uma fina camada adjacente à superfície da terra onde o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera.

As alterações na superfície do terreno, tais como rugosidade e temperatura, afectam directamente o comportamento da CLA, gerando fluxos de calor que interagem com a parte baixa da troposfera, originando assim processos turbulentos que exercem diversas alterações sobre a dinâmica da CLA.

Segundo Borges (1974), devido a forças de atracção intermoleculares, cuja intensidade decresce com o afastamento das mesmas, as partículas de qualquer fluido aderem às superfícies sólidas com que contactam. Desta forma a velocidade do vento deve considerar-se nula junto ao solo (ver Figura 2.2), sendo que o seu valor vai crescendo rapidamente a medida que nos afastamos da superfície. Por consequência, a altas altitudes, as massas de ar movem-se segundo a camada limite terrestre e não sofrem influência directa do solo.



**Figura 2.2** – Perfis médios de vento para diferentes terrenos. **Fonte:** Mendis (2007).

## 2.3 Escoamento

Escoamento é entendido como o movimento de partículas, sendo que neste caso entende-se como movimento de fluido (ar). Quando o escoamento é exterior ao corpo, como no caso do presente estudo, designa-se por escoamento externo, quando o movimento se dá no interior de um espaço confinado designa-se por escoamento interno.

O escoamento pode ocorrer em dois regimes – laminar e turbulento. Segundo Oliveira e Lopes (2006), um escoamento tem lugar em regime laminar quando camadas de fluido adjacentes se deslocam com a mesma velocidade, ou deslizam entre si de forma relativamente ordenada, se a sua velocidade for ligeiramente diferente e as trajetórias de elementos de fluido não se cruzam nem intersectam. Por outro lado, um escoamento ocorre em regime turbulento quando camadas contíguas de fluido se movem com velocidades claramente distintas e trajetórias individuais de elementos de fluido se cruzam ou intersectam de forma aparentemente aleatória. Normalmente, a turbulência ocorre para valores elevados do número de Reynolds, que é a materialização da relação entre as forças de inércia e as de viscosidade.

## 2.4 Pressão (P)

A pressão ou tensão mecânica (símbolo: P) é a força normal (perpendicular à superfície) exercida por unidade de área. Neste caso, a pressão a que o edifício está sujeito resulta da incidência do vento sobre a superfície. A unidade internacional da pressão é o Pascal (Pa).

A distribuição de pressões sobre uma superfície pode ser expressa através de um parâmetro adimensional, identificado como *Coefficiente de pressão* (Cp). Este coeficiente é utilizado na aerodinâmica e na hidrodinâmica e o seu valor é independente do tamanho da superfície, quando respeitadas condições de semelhança geométrica. Neste sentido, em engenharia, o Cp é usado para testes em túnel de vento, como no presente trabalho, ou em túneis de água para a determinação do valor da pressão em todos os locais, até nos mais críticos. O seu valor é dado pela seguinte expressão:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2} \quad (1)$$

- ❖ **P** - pressão em cada ponto da superfície;
- ❖ **P<sub>0</sub>** - pressão de referência (em geral adoptada como a pressão estática no escoamento ao longe)
- ❖ **ρ** - massa específica do ar (ao nível do mar, a 15 ° C, é de 1,225 kg/m<sup>3</sup>)
- ❖ **V** - velocidade do fluido ou do corpo através do fluido.

## 2.5 Forças (F) e momentos (M)

Neste caso a força entende-se como sendo a resultante da pressão que o vento exerce na superfície das torres que, por sua vez vai culminar num momento torçor ou flector que depende da distância entre o referencial considerado e ponto de aplicação da força. A unidade internacional de força é o Newton (N) e do momento é Newton vezes metro (N.m). A força pode ser determinada através da pressão da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \quad (2)$$

**F** - força normal a superfície, em N

**P** - pressão efectiva, em Pa

**A** - área correspondente, em m<sup>2</sup>

Por sua vez, o momento é determinado através da força calculada pela equação (2), e do seu respectivo braço.

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{B} \quad (3)$$

**M** - momento provocado pela força em relação ao eixo de referência

**F** - força normal ao eixo

**B** - braço, isto é, distância entre a linha de acção da força e o eixo ou ponto de referência

## 2.6 Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP)

O RSAEEP (2007) tem como objectivo preservar a segurança de edifícios e pontes no que diz respeito a acções nos mesmos, sendo uma ferramenta normalmente utilizada em Portugal para esse fim, quando não são realizados estudos como o que se apresenta.

A acção do vento encontra-se no capítulo V desse regulamento, sendo influenciada por seis critérios:

➤ *Zonamento do território* - O critério em que se baseou o parcelamento do território em dois tipos de zonas fundamenta-se na análise dos registos meteorológicos existentes, que permitiu atribuir as zonas, para a mesma probabilidade de ocorrência,

intensidades de vento suficientemente diferenciadas. Para efeitos de quantificação da acção do vento, considera-se o país dividido em duas zonas:

- Zona A - generalidade do território, excepto as regiões pertencentes a zona B
- Zona B – os arquipélagos dos Açores e Madeira, e as regiões do Continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600m

➤ *Rugosidade aerodinâmica do solo* - A variação da velocidade do vento com a altura depende fortemente da rugosidade aerodinâmica do solo, relacionada com as dimensões e a distribuição dos obstáculos nela existentes e que afectam o escoamento do ar na sua vizinhança.

A consideração de apenas dois tipos de rugosidade do solo é um pouco esquemática, mas resulta da dificuldade de caracterizar objectivamente a multiplicidade das situações que podem ocorrer. A rugosidade aerodinâmica do solo varia consoante as dimensões e distribuição dos obstáculos nele existentes. Note-se que a atribuição de um tipo de rugosidade ao solo em que se localiza uma construção poderá depender da direcção do vento. Para ter em conta a variação do vento com a distância ao solo consideram-se dois tipos de rugosidade aerodinâmica do solo:

- Rugosidade do tipo I – rugosidade a atribuir aos locais situados no interior das zonas urbanas em que predominem edifícios de médio e grande porte;
- Rugosidade de tipo II – rugosidade a atribuir aos restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.

De salientar que nas zonas de transição entre um ambiente urbano e o rural – *zonas de periferia* – e dependendo do lado em que o vento actua, o mesmo local poderá ser considerado como tendo uma Rugosidade do Tipo I ou uma Rugosidade do Tipo II. Assim, se o vento actua do lado da zona urbana, o local é considerado como tendo uma Rugosidade do Tipo I. Se, pelo contrário, o vento actua do lado da zona rural, o local é considerado como tendo Rugosidade do Tipo II.

➤ *Quantificação da acção do vento* – a acção do vento resulta da interacção entre o ar em movimento e as construções, exercendo-se sob a forma de pressões aplicadas nas suas superfícies. A acção que o vento exerce sobre as estruturas depende da grandeza e distribuição da velocidade do vento e das características das estruturas. Desta forma, é necessário definir os valores característicos da velocidade do vento em função da altura ao solo. O vento é,

geralmente, considerado como actuando na horizontal, devendo admitir-se que pode ter qualquer rumo.

➤ *Determinação dos efeitos da acção do vento* - Conhecidas as características da acção do vento, a determinação do seu efeito sobre uma dada estrutura pode ser efectuada por métodos analíticos ou experimentais. No entanto, para os casos correntes, pode ser usado um método simplificado que consiste em considerar uma pressão estática constante (ou uniforme), em toda a superfície da estrutura.

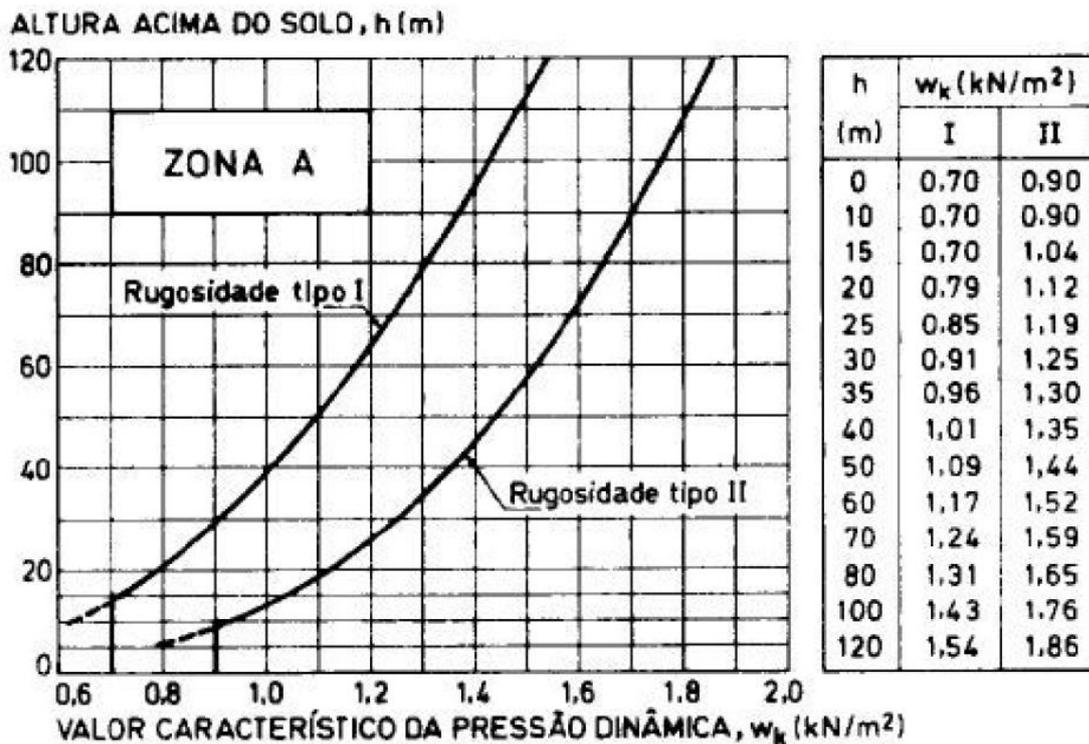
A pressão estática é obtida multiplicando a pressão dinâmica do vento (que depende da velocidade do vento) por adequados coeficientes – os coeficientes de forma - que caracterizam as formas aerodinâmicas da estrutura. Este processo simplificado não conduz a resultados satisfatórios para estruturas com frequências próprias de vibração muito baixas (inferiores a cerca de 0,5 Hz) ou que sejam susceptíveis de instabilidade aerodinâmica ou de vibrações significativas na direcção transversal à da actuação do vento.

➤ *Pressão dinâmica do vento* - A pressão dinâmica do vento ( $w$ ) varia com a altura do edifício e está relacionada com a velocidade do vento ( $V$ ) da seguinte forma:

$$w = 0,613 V^2 \quad (4)$$

A velocidade do vento é expressa em m/s e a pressão é expressa em  $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ .

A Figura 2.3 explicita a lei da variação da pressão dinâmica do vento em função da altura acima do solo e do tipo de rugosidade do local para a zona A do território nacional.



**Figura 2.3** - Valor característico da pressão dinâmica,  $w_k$  (KN/m<sup>2</sup>) **Fonte:** RSAEEP (2007)

Para os locais situados na zona B, os valores característicos da pressão dinâmica do vento são obtidos multiplicando por 1,2 os valores indicados para a zona A.

De realçar que para alturas inferiores a 15 metros, no caso de terrenos com rugosidade do tipo I, e para alturas inferiores a 10 metros, no caso de terrenos de rugosidade do tipo II, os valores da pressão dinâmica do vento são constantes, quer o edifício em estudo se situe na zona A ou zona B do território nacional.

A referida situação deve-se à extrema dificuldade em quantificar a velocidade do vento na vizinhança imediata do solo, ou seja, para alturas da ordem de grandeza dos obstáculos que caracterizam a macro-rugosidade do terreno.

➤ *Coefficientes de pressão* - os coeficientes de pressão a utilizar para a determinação da acção do vento são apresentados no Anexo II para os casos mais correntes na prática. Todavia, o mesmo regulamento recomenda que quando se trata de construções muito importantes e de forma não usual, deve-se utilizar resultados obtidos directamente por ensaios em túnel aerodinâmico.



### 3 Efeito do vento em edifícios

O vento exerce pressões e sucções (pressões negativas) nas edificações, causando efeitos indesejáveis.

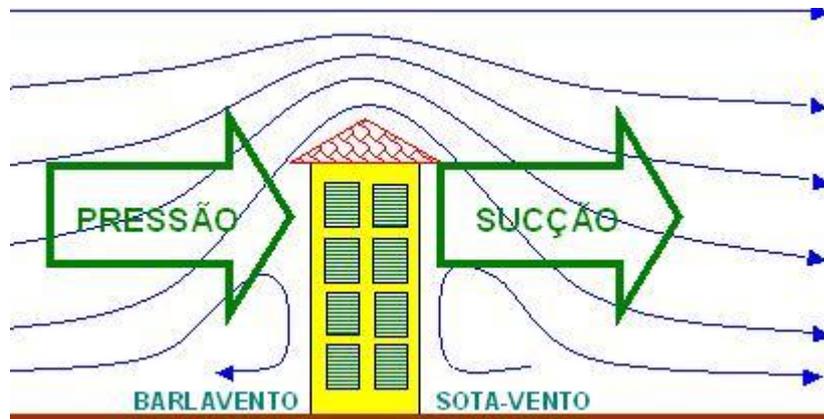


Figura 3.1 – Esquema da acção do vento num edifício.

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

- ✚ **Fachada orientada a barlavento** – O vento produz um esforço de pressão, sinal positivo, sobre a superfície, empurrando-a na direcção perpendicular a fachada e no sentido do vento.

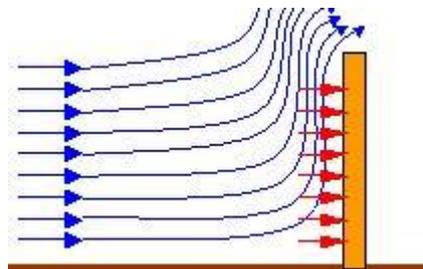


Figura 3.2 – Esquema de vento a barlavento

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

- ✚ **Fachada paralela** – O vento origina um esforço de sucção vertical sobre o componente, puxando-o na direcção perpendicular à do vento

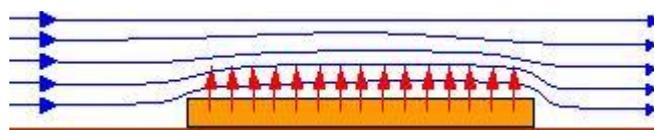
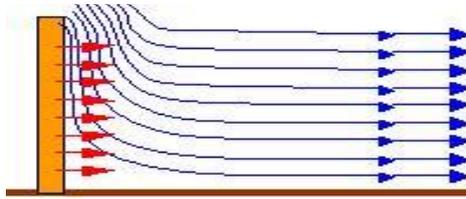


Figura 3.3 – Esquema de vento paralelo.

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

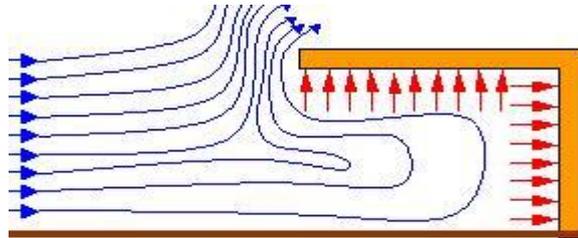
- ✚ **Fachada orientada a sotavento** – Produz um esforço de sucção sobre o componente, puxando-o na direcção perpendicular a da fachada e no sentido do vento.



**Figura 3.4** – Esquema de vento a sotavento

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

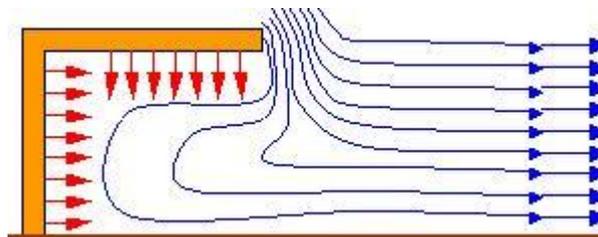
- ✚ **Vento com pressão interna** - Produz um esforço de pressão sobre as fachadas, empurrando-as na direcção perpendicular às superfícies envolvidas.



**Figura 3.5** – Esquema de pressão interna do vento.

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

- ✚ **Vento com sucção interna** Produz um esforço de sucção sobre as fachadas, puxando-as na direcção perpendicular às superfícies envolventes.



**Figura 3.6** – Esquema da sucção interna do vento.

Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/>

Os esforços devidos à acção do vento na direcção do escoamento apresentam, segundo a maioria dos códigos, uma parcela estática (média) e uma outra dinâmica (flutuante). Fundamentalmente a resposta à acção do vento no sentido do escoamento é a resposta a uma força aplicada nessa direcção. Esta consideração, sendo estática, apenas terá como factores determinantes deste carregamento as características climatológicas, a velocidade do vento, as características topográficas da região, a altura e as características geométricas do edifício. A acção dinâmica, além dos factores já citados, varia também com o amortecimento, frequência natural e distribuições das massas. Além disso, há também a característica flutuante da acção do vento que interage com as características estruturais citadas.

Em primeira análise, a interacção do vento com uma estrutura traduz-se em forte perturbação dos campos de velocidade e de pressão do escoamento na sua vizinhança, cujas consequências podem ser múltiplas.

O desprendimento de vórtices é uma consequência da incidência do vento em edifícios e é o responsável pelas vibrações, prejudiciais às estruturas, e pelo aumento dos coeficientes de arrastamento. Portanto, o correcto entendimento e controle do desprendimento de vórtices são relevantes para a diminuição dos custos de manutenção de estruturas estáticas.

Em edifícios esbeltos, a principal resposta dinâmica deve-se em geral a esforços laterais consequentes do desprendimento de vórtices. Segundo Fontes (2003), em edifícios de base quadrada, esses esforços são máximos quando o vento actua perpendicularmente a uma das faces do edifício, podendo ser este o principal problema de projecto, pois esta resposta pode levar a movimentos laterais consideráveis.

As cargas resultantes do vento raramente são uniformes, mesmo quando o edifício tem uma geometria simétrica; isto dá-se pela não uniformidade do escoamento causada pela presença de outros edifícios (no presente caso também pelo facto das quatro torres estarem próximas) ou pelo mesmo não actuar ao longo do eixo de simetria, que juntamente com as assimetrias da geometria e da rigidez estrutural contribuem com as maiores parcelas da componente estática do momento torçor.

A componente dinâmica do momento torçor deve-se à modificação da distribuição instantânea de pressões. Isyumov e Poole (1983, citados por Fontes 2003) concluíram que o desprendimento de vórtices é o principal responsável pela componente dinâmica da torção.

A resposta da estrutura à acção dinâmica do vento pode originar algum desconforto aos utentes do edifício. Em edifícios altos, com a ocorrência de ventos fortes é normal algumas pessoas enjoarem, dependendo sempre da sensibilidade de cada um, da amplitude do movimento e da frequência de oscilação. Segundo Fontes (2003) o enrijar do sistema

estrutural nem sempre resolve o problema de conforto, pois, apesar de reduzir a amplitude, este provoca um aumento da frequência, podendo perdurar a sensação desagradável.

A pressão sobre as fachadas é um aspecto importante a ter em conta quando se trata da acção do vento em edifícios. A força do vento pode originar inclinação na direcção predominante do vento na fase inicial de vida de um edifício flexível (pequenas inclinações). Outra consideração importante é o efeito estático do vento nos painéis, numa altura em que cada vez mais são adoptados painéis de vidro e outras matérias com diferentes resistências, de forma a garantir mais luminosidade e múltiplas estéticas.

O efeito venturi é uma consequência muito provável neste tipo de edifícios, não só devido à geometria e proximidade das torres, mas também por causa da proximidade de edifícios vizinhos, podendo daí resultar pressões negativas bastante intensas em algumas zonas das torres.

Nas zonas de estagnação e de recirculação há tendência para acumulação de detritos, o acréscimo de turbulência e a existência de movimentos periódicos em que este último pode originar ruído. Por outro lado, a existência de altas velocidades em redor do edifício a nível do solo pode causar desconforto e afectar a segurança dos pedestres. Este efeito deve-se ao facto de a face de barlavento do edifício estar directamente exposta ao vento na. Segundo Blessmann (1989 – citado por Fontes 2003) o problema merece atenção sempre que o edifício tiver no mínimo o dobro da altura dos edifícios vizinhos situados a barlavento. Segundo Fontes (2003), uma forma de evitar o problema em questão é não utilizar fachadas planas expostas perpendicularmente ao vento quando não houver protecção de outros edifícios. Quando não for possível alterar a orientação do edifício, pode-se fazer uso de quebra – ventos vegetais ou de outras soluções arquitectónicas como alargar os pavimentos inferiores, construção de marquises ou cobertura dos espaços vazios entre as edificações, etc.

O aumento da velocidade do vento em zonas próximas do solo, para além de causar desconforto aos pedestres, pode também resultar no aumento, ou até mesmo na inversão da acção do vento sobre os edifícios mais baixos a barlavento, principalmente nas coberturas.

Edifícios situados a jusante são significativamente afectados pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, causando importantes efeitos dinâmicos e alterações significativas nas pressões.

Os efeitos mais perceptíveis do senso comum são o ruído, vibração em varandas e coberturas, e até mesmo ventilação natural proveniente da abertura de janelas.

## 4 Túnel de vento e modelo experimental

A modelação em túnel aerodinâmico requer, em rigor, condições de *semelhança completa*, ou seja, reprodução do protótipo por um modelo construído a uma dada escala, bem como a igualdade, entre as condições do protótipo e do modelo, de diversos parâmetros adimensionais, os quais variam de acordo com o caso em estudo [e.g. Meroney (1990), citado por Ferreira (1999)]. Não só a semelhança do modelo experimental deve ser respeitada, como também a sua envolvente, a qual não vai se considerada neste trabalho.

### 4.1 Túnel de vento

Segundo Silva (1993), os túneis de vento aerodinâmicos utilizados em ensaios normalmente são agrupados em duas categorias: os do tipo Eiffel, a funcionar em circuito aberto, e os do tipo Gottingen, em circuito fechado. Em ambos os casos, o escoamento é estabilizado antes da zona de ensaios por uma zona de laminarização. O túnel de vento onde foram realizados os ensaios é do tipo Gottingen, com câmara aberta, com a desvantagem do escoamento nessa zona depender das condições ambientais. O túnel encontra-se instalado no *LAI (Laboratório de Aerodinâmica Industrial)*, pertencente a *ADAI (Associação de Desenvolvimento de Aerodinâmica Industrial)*, da Universidade de Coimbra, e é designado por Túnel Aerodinâmico de Veículos (TAV).

O túnel mencionado dispõe de uma câmara de ensaios com 5m de comprimento e 2m de largura, sendo a forma da secção de saída da zona de contracção um quadrado, com dimensões  $2 \times 2\text{m}^2$ . O ventilador acoplado é accionado por um motor eléctrico com uma potência de 230 KVA, sendo possível atingir uma velocidade máxima, na câmara de ensaios, de aproximadamente 18m/s. Na Figura 4.1 é possível observar a curva de correlação do túnel.

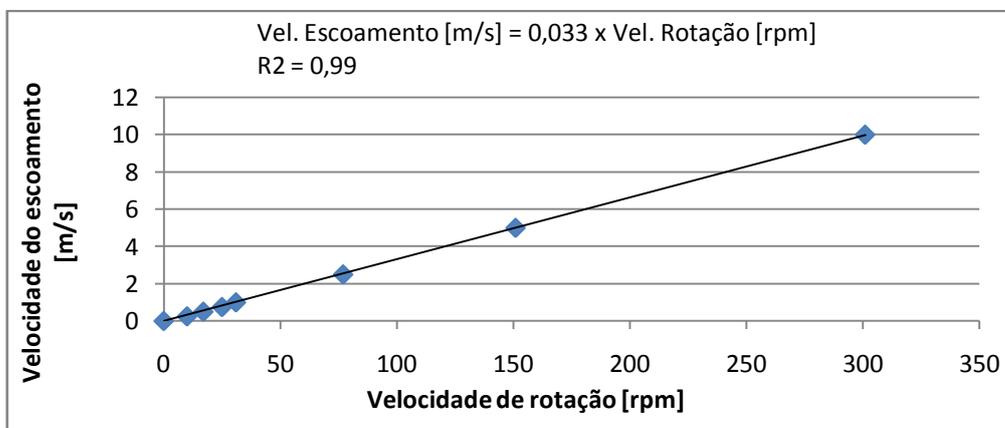
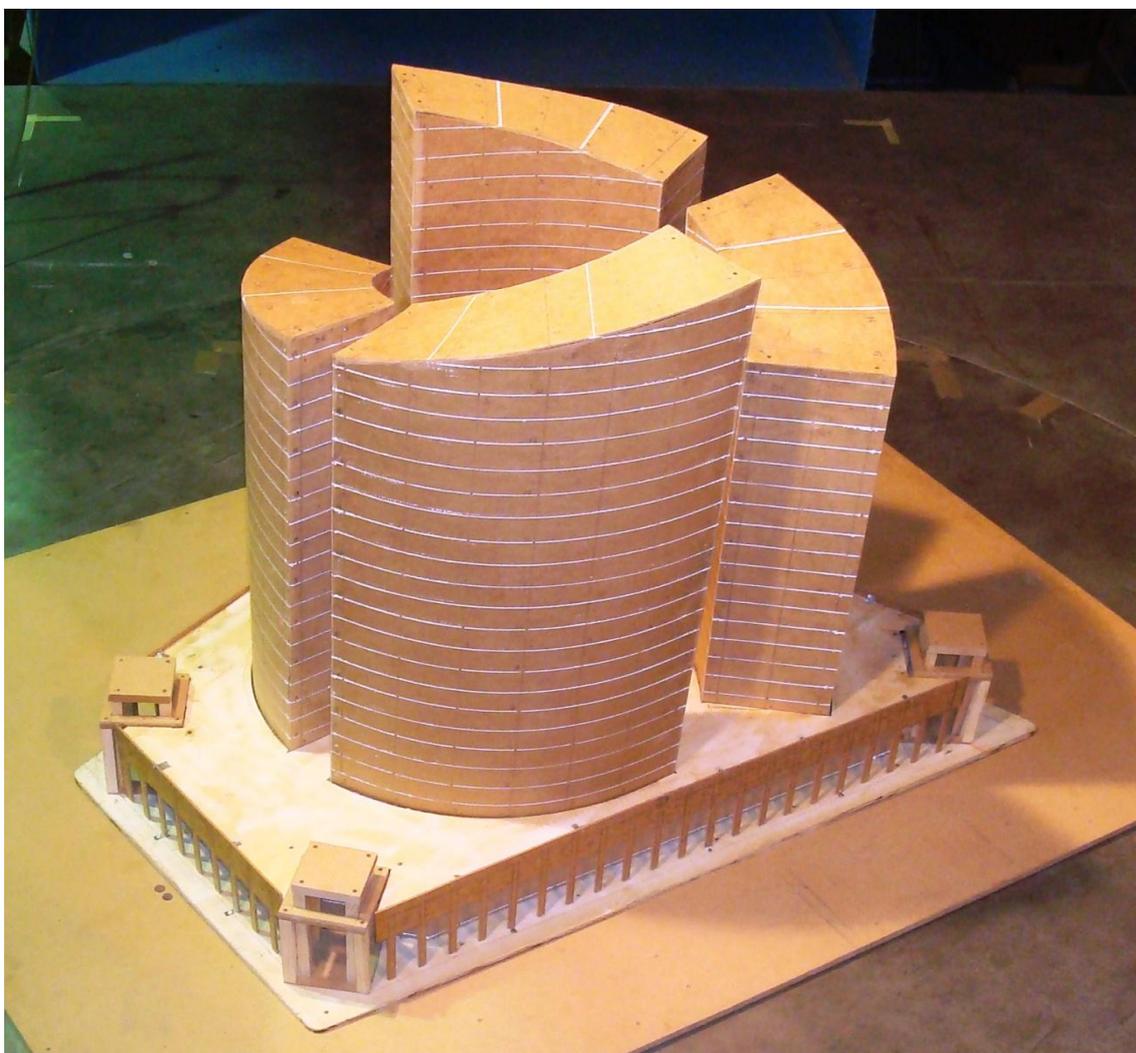


Figura 4.1 – Correlação da velocidade do Túnel de vento.

## 4.2 Modelo experimental

Na construção de um modelo experimental para este tipo de estudos, quanto mais reduzida for a escala mais difícil se torna reproduzir os detalhes do modelo, principalmente a forma da estrutura e rugosidade, bem como garantir precisão na colocação das sondas originando uma possível interferência entre elas. Neste sentido, é importante utilizar modelos com a maior escala possível, mas que tenham em consideração as limitações do túnel.

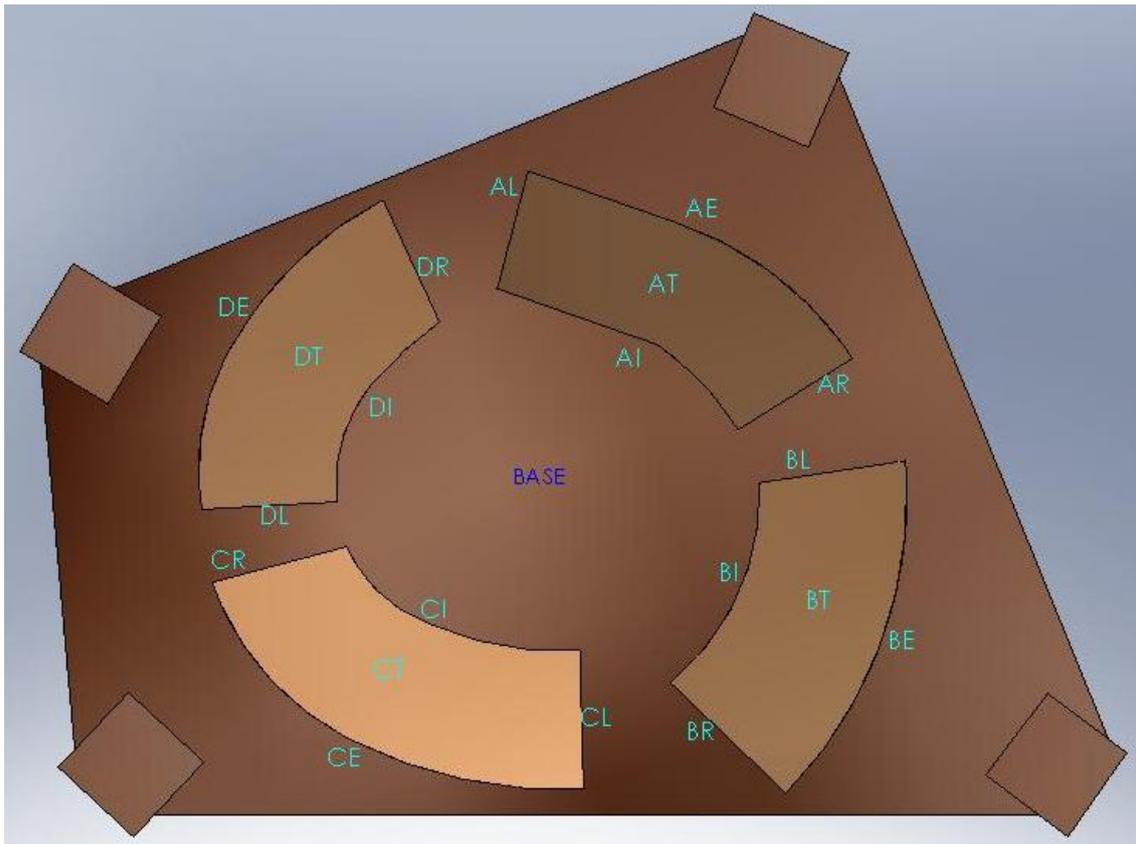
A maquete que serve de modelo experimental é constituída por uma base e quatro torres. A maquete foi construída à escala de 1:100 com uma geometria similar à do edifício que se pretende construir, sem se considerar pormenores de varandas e outros (Figura 4.2). O modelo experimental é o adequado para a realização dos ensaios, não só por ser muito idêntico ao edifício que se pretende estudar, mas também porque tem uma dimensão adequada tanto para a introdução das sondas, bem como para testar no túnel de vento.



**Figura 4.2** – Maquete utilizada como modelo experimental.

De forma a distinguir as diferentes torres, não só para a execução da experiência mas também para a análise dos resultados, a cada torre foi-lhe atribuída uma letra (A, B, C e D), e às faces igualmente (I – interior; E – exterior; L – esquerda; R – direita; e T- topo, tendo admitindo-se sempre que o observador olha sempre para cada torre a partir do interior do “circulo” formado pelas quatro torres).

As torres têm um formato arredondado (Figura 4.2 e Figura 4.3) e pelo facto de ser compostas por uma madeira lisa apresentam uma baixa rugosidade.



**Figura 4.3** – Vista de topo da maquete com a designação das torres e respectivas faces.

As dimensões das torres são:

➤ **Torre A**

- Altura máxima (face AL) de 913mm
- Altura mínima (face AR) de 805mm
- Largura, face AR - 160mm; face AL – 145mm
- Comprimento exterior (face AE) de 455mm
- Comprimento interior (face AI) de 340mm

➤ **Torre B**

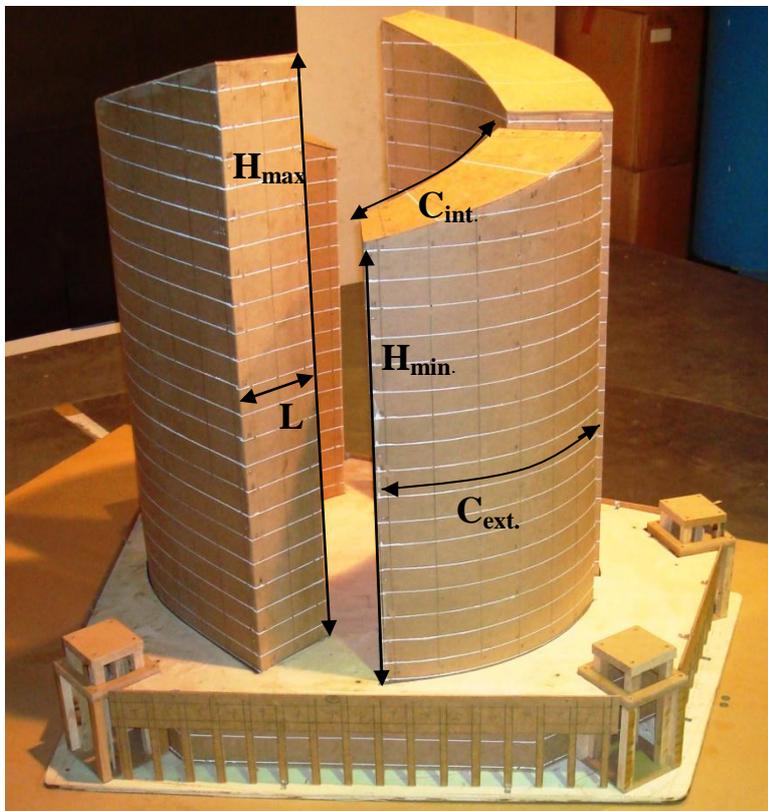
- Altura máxima (face BL) de 785mm
- Altura mínima (face BR) de 680mm
- Largura, face BR - 190mm; face BL – 175mm
- Comprimento exterior (face BE) de 435mm
- Comprimento interior (face BI) de 270mm

➤ **Torre C**

- Altura máxima (face CL) de 910mm
- Altura mínima (face CR) de 800mm
- Largura, face CR - 165mm; face CL – 165mm
- Comprimento exterior (face CE) de 540mm
- Comprimento interior (face CI) de 320mm

➤ **Torre D**

- Altura máxima (face DL) de 780mm
- Altura mínima (face DR) de 685mm
- Largura, face DR – 160mm; face DL – 160mm
- Comprimento exterior (face DE) de 455mm
- Comprimento interior (face DI) de 260mm



**Legenda:**

$H_{max.}$  – Altura máxima da torre A

$H_{min.}$  – Altura mínima da torre D

$L$  – Largura da torre A

$C_{ext.}$  – Comprimento exterior da torre D

$C_{int.}$  – Comprimento interior da torre D

**Figura 4.4** – Exemplo de legenda da dimensão das torres.

### 4.3 Instrumentação e procedimento experimental

Uma correcta leitura da distribuição de pressões na maqueta exige que a distribuição das tomadas de pressão seja a mais densa possível. Para isso, dividiu-se a área das faces para determinar a localização das tomadas de pressão. Em seguida, procedeu-se à perfuração (Figura 4.5) da maqueta para tornar possível a introdução das tomadas, aparando-as de forma a não perturbar o escoamento e sobretudo a leitura dos valores. As tomadas de pressão estão ligadas a uma scanivalve, responsável pelo envio dos valores para o computador onde são armazenados em ficheiros tipo data.



**Figura 4.5** - Perfuração de uma torre.



**Figura 4.6** – Torres e respectivas tomadas de pressão.

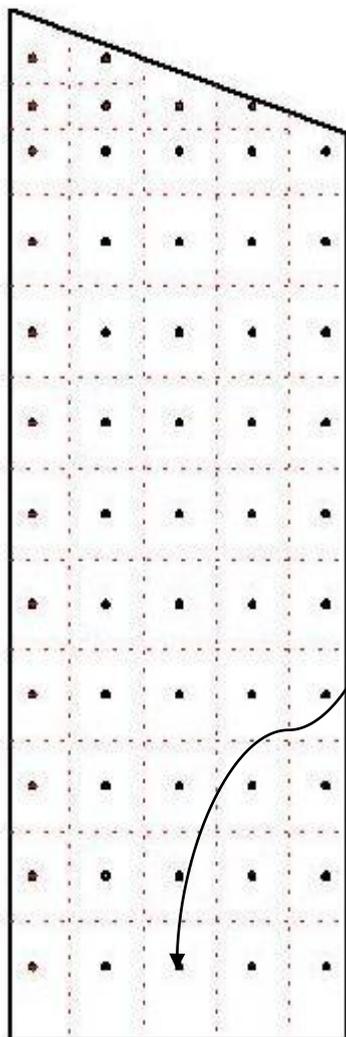


**Figura 4.7** - Tomadas ligadas ao anel.



**Figura 4.8** – Scanivalve e numeração das tomadas de pressão.

Na Figura 4.7 é possível observar a outra extremidade das tomadas de pressão, as quais vão ligar ao anel da scanivalve. Nessa extremidade é possível observar a numeração das tomadas de pressão (Figura 4.8) da seguinte forma:



Cada tomada de pressão é representativa de uma pequena área envolvente (Figura 4.9) para que não houvesse lugar a enganos na leitura e envio dos valores para a Scanivalve, as tomadas de pressão foram todas numeradas, uma a uma, com nomenclatura onde se indica a torre, face, coluna e linha correspondente, como por exemplo: **CI023**:

As torres estão subdivididas por andares, e as tomadas de pressão nas torres A e C encontram-se em pisos pares, já nas torres B e D nos pisos ímpares. Consequentemente, nas torres A e C a numeração da linha das tomadas de pressão foi par, enquanto nas torres B e D a numeração das linhas foi ímpar. Após a identificação da tomada, a outra extremidade foi ligada ao anel que é parte integrante da Scanivalve.

- C – Torre
- I - Face
- 02 – Linha
- 3 – Coluna

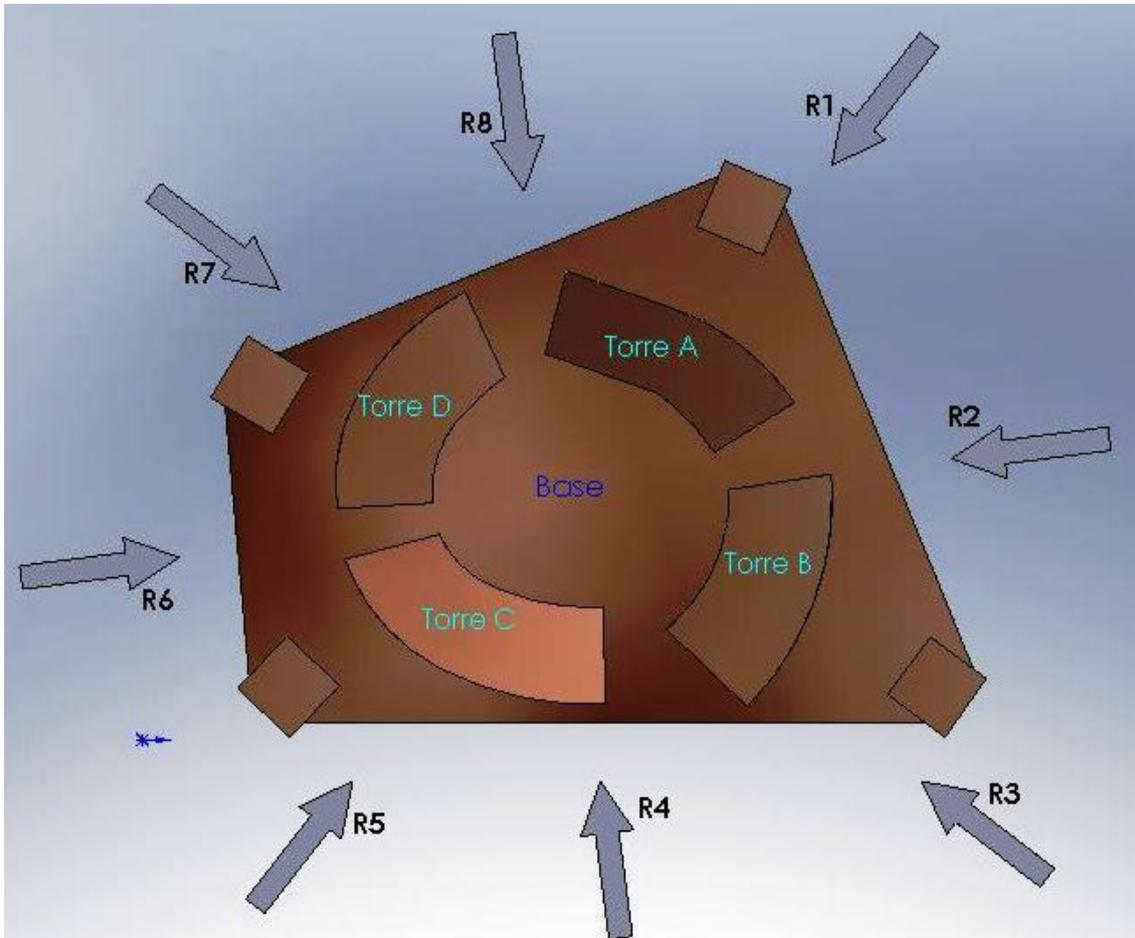
**Figura 4.9** – Área representativa de cada tomada de pressão.

No total foram aplicadas **805** tomadas de pressão, distribuídas no modelo experimental na forma expressa na tabela 1.

| Torre A      |             | Torre B      |             | Torre C      |             | Torre D      |             |
|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Face         | N.º tomadas |
| AE           | 77          | BE           | 70          | CE           | 78          | DE           | 70          |
| AI           | 55          | BI           | 49          | CI           | 56          | DI           | 50          |
| AL           | 33          | BL           | 30          | CL           | 33          | DL           | 30          |
| AR           | 30          | BR           | 27          | CR           | 30          | DR           | 27          |
| AT           | 15          | BT           | 15          | CT           | 15          | DT           | 15          |
| <b>Total</b> | <b>210</b>  | <b>Total</b> | <b>191</b>  | <b>Total</b> | <b>212</b>  | <b>Total</b> | <b>192</b>  |

**Tabela 1** – Distribuição das tomadas de pressão pelas torres.

O vento raramente tem um rumo definido, pelo que para um estudo mais completo foram realizados ensaios com oito rumos diferentes. Desta forma, o modelo experimental foi sucessivamente rodado de 45° para que fosse testado várias direcções do vento. A distribuição dos rumos encontra-se na Figura 4.10.

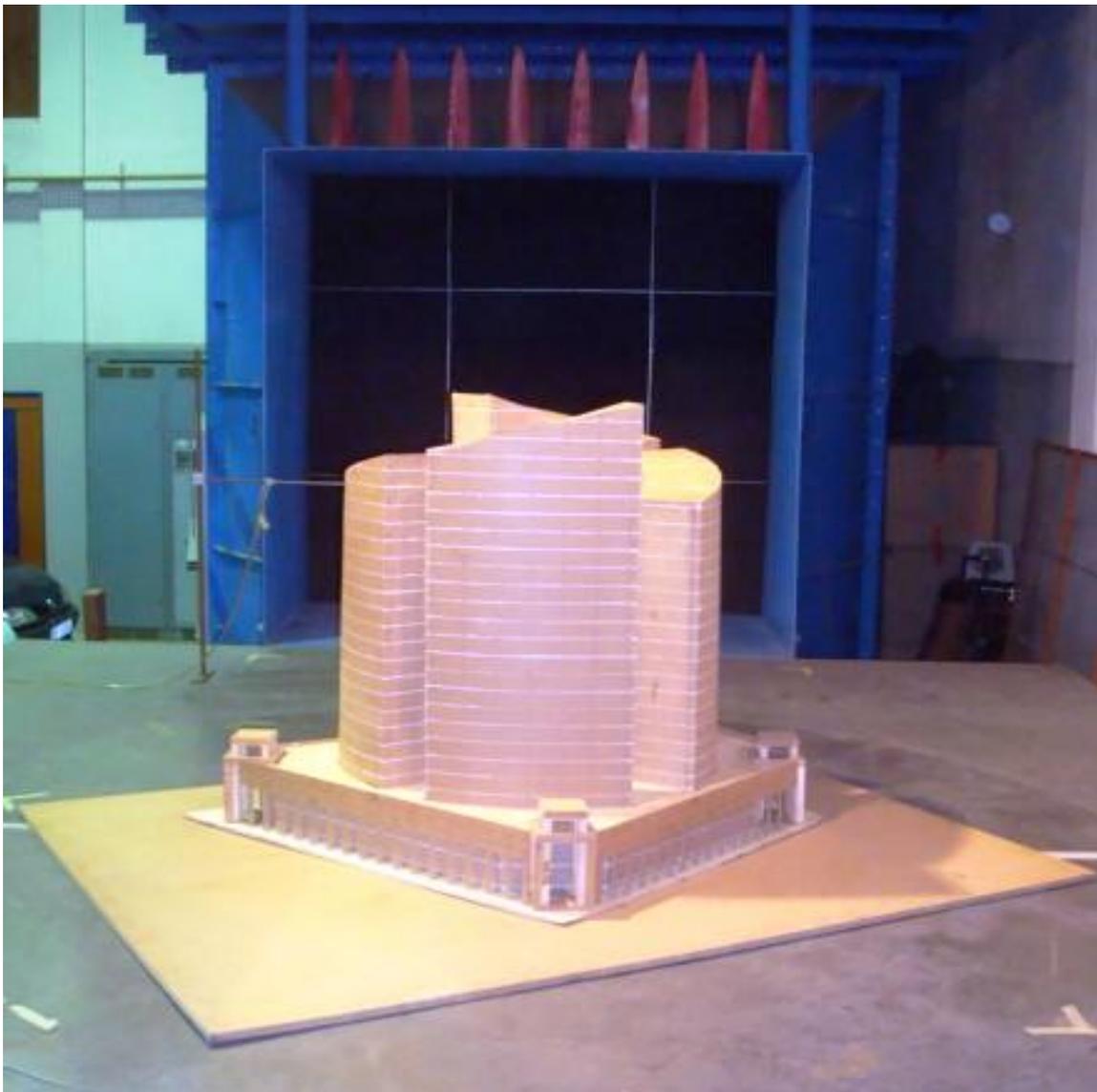


**Figura 4.10** – Visualização dos diferentes rumos estudados

#### 4.4 Verificação das condições de independência do número de Reynolds

A independência do número de Reynolds ( $Re$ ) é uma condição muito importante, e necessária, neste tipo de experiências. Dai, antes de começar a realização dos ensaios, foi necessário verificar essa condição. Para isso, foi realizado um ensaio para velocidade do ventilador a 300rpm, e depois a 400rpm tendo-se observado que o valor do coeficiente de pressão se manteve praticamente inalterável, condição que nos garante a independência desejada dos resultados a obter.

A velocidade do ventilador foi de 400rpm, que corresponde a um escoamento com velocidade de 13,2 m/s (Figura 4.1). Para o cálculo do coeficiente de pressão foi necessário medir a pressão de referência ( $P_0$ ), em geral adoptada como a pressão estática do escoamento numa zona não perturbada, com recurso ao tubo de pitot ligado a Scanivalve.



**Figura 4.11** – Maqueta no túnel de vento durante os ensaios (vista a sotavento).

## 5 Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos experimentalmente, por meio da representação das isolinhas de pressão e da carga aerodinâmica, através das forças e momentos resultantes.

### 5.1 Representação bidimensional de isolinhas de pressão

Para a apresentação das isolinhas de  $C_p$  nas diferentes faces das torres, foi usado o programa *Tecplot*, o qual exige um tratamento de dados específico para apresentação dos resultados. O programa permite traduzir os dados numéricos em gráficos de forma a melhorar a percepção dos resultados. Neste sentido, foi necessário criar ficheiros tipo “data” independentes para cada face. Um dos ficheiros, considerado principal, contém a localização das tomadas de pressão e respectivo valor de  $C_p$ . Um segundo ficheiro, de zoneamento, que se pode considerar como malha, deve conter o tamanho da malha que deve abranger de forma rigorosa toda a área envolvente da face em questão. Após a elaboração dos ficheiros e respectiva importação para o programa, procede-se à interpolação entre ambos (Figura 5.1), de forma a obter a pressão em toda a face numa malha estruturada. De notar que é um processo bastante trabalhoso, já que é necessário criar esses ficheiros para todas as faces e para os diferentes rumos, uma vez que são eles que vão moldar e representar as torres. Na Figura 5.2 é possível observar as isolinhas de pressão para a torre A e para o rumo 1. As Figuras representativas das outras torres e outros rumos encontram-se no Anexo III.

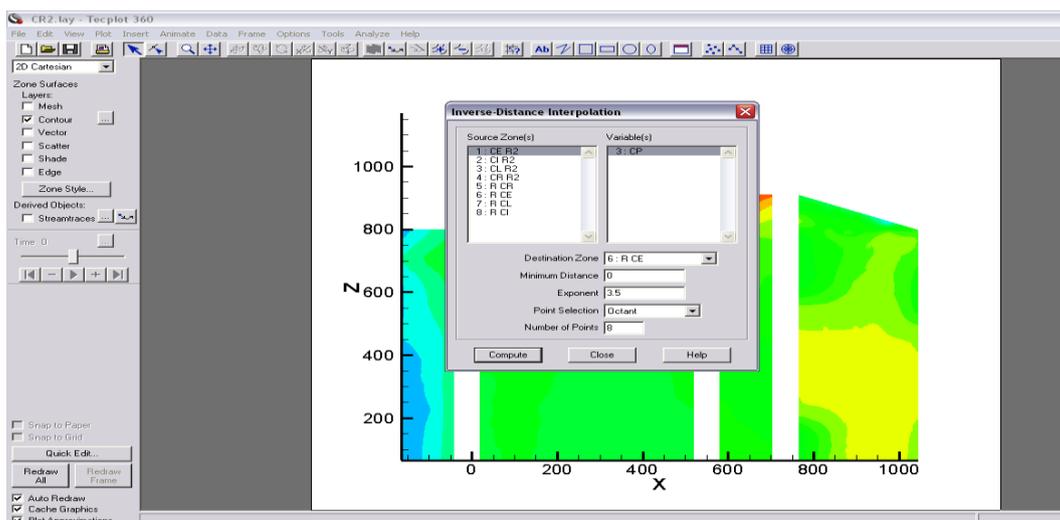
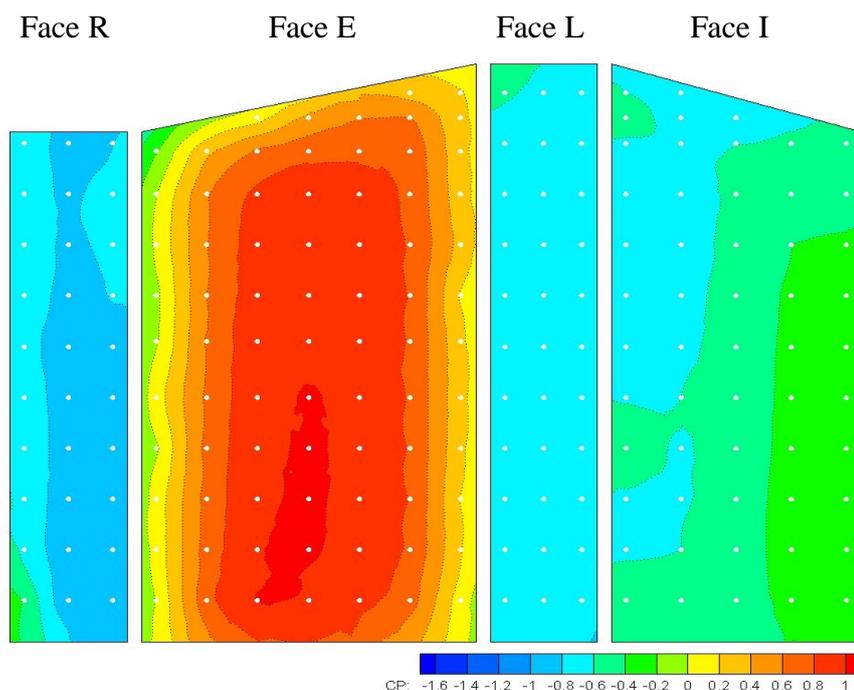


Figura 5.1 – Aspecto da interface do *Tecplot* na interpolação dos ficheiros.



**Figura 5.2** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R1.

Após a análise dos gráficos das isolinhas de pressão para as diferentes torres e rumos na forma bidimensional, é possível observar que as torres que se encontram mais a barlavento do escoamento são as que sofrem maiores pressões. Desta forma, as faces que se encontram mais a barlavento e perpendiculares do escoamento sofrem enormes cargas de vento resultado das fortes pressões positivas.

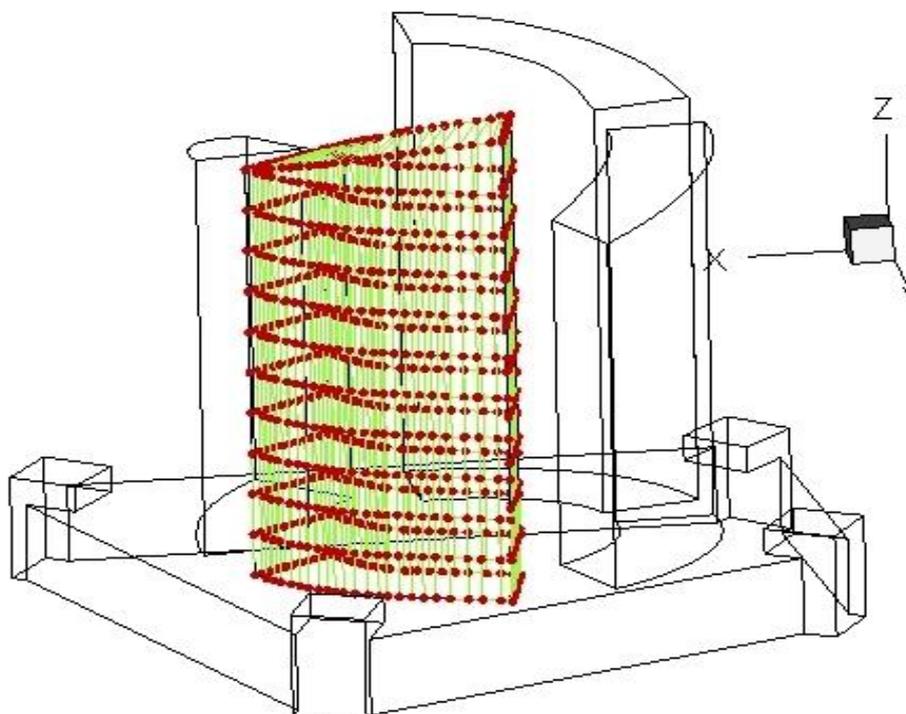
Nas torres A e C (Figura 5.2 e Figura 21 do Anexo III, respectivamente) nota-se, de forma clara que, no centro das faces exteriores, ocorrem os maiores valores de pressão, pelo facto de o escoamento embater quase perpendicularmente nesses locais. Essa pressão vai diminuindo horizontalmente ao longo da face em ambos os sentidos devido ao desvio do escoamento segundo o seu contorno.

Por limitação de espaço, as isolinhas para as diversas torres e rumos, são apresentadas na secção de Anexos. Assim, por exemplo, na Figura 12 do Anexo III podemos observar que na face interior da torre B existe uma concentração de pressões bastante positivas junto à base. Tal situação deve-se à formação de turbilhões no espaço interior entre as torres, que originam pressões de difícil caracterização em algumas dessas faces, já que o escoamento nesse local é fortemente influenciado pelas torres e pela orientação do vento (ver Figuras 3, 4, 14,19, 24 do Anexo III por exemplo). Nas torres que se encontram a sotavento do escoamento, a pressão é muito próxima de zero, pelo facto de se situarem numa zona de recirculação do escoamento (exemplo torre A, Figura 5 do Anexo III).

## 5.2 Representação tridimensional (3D) de isolinhas de pressão

A representação tridimensional das isolinhas de pressão é mais completa, uma vez que é possível ter uma maior percepção da influência da orientação do escoamento, mas sobretudo da influência das torres na pressão resultante. Todavia, não é possível observar todas as zonas das torres em simultâneo, pelo que se adoptou a representação bidimensional para uma melhor análise individual.

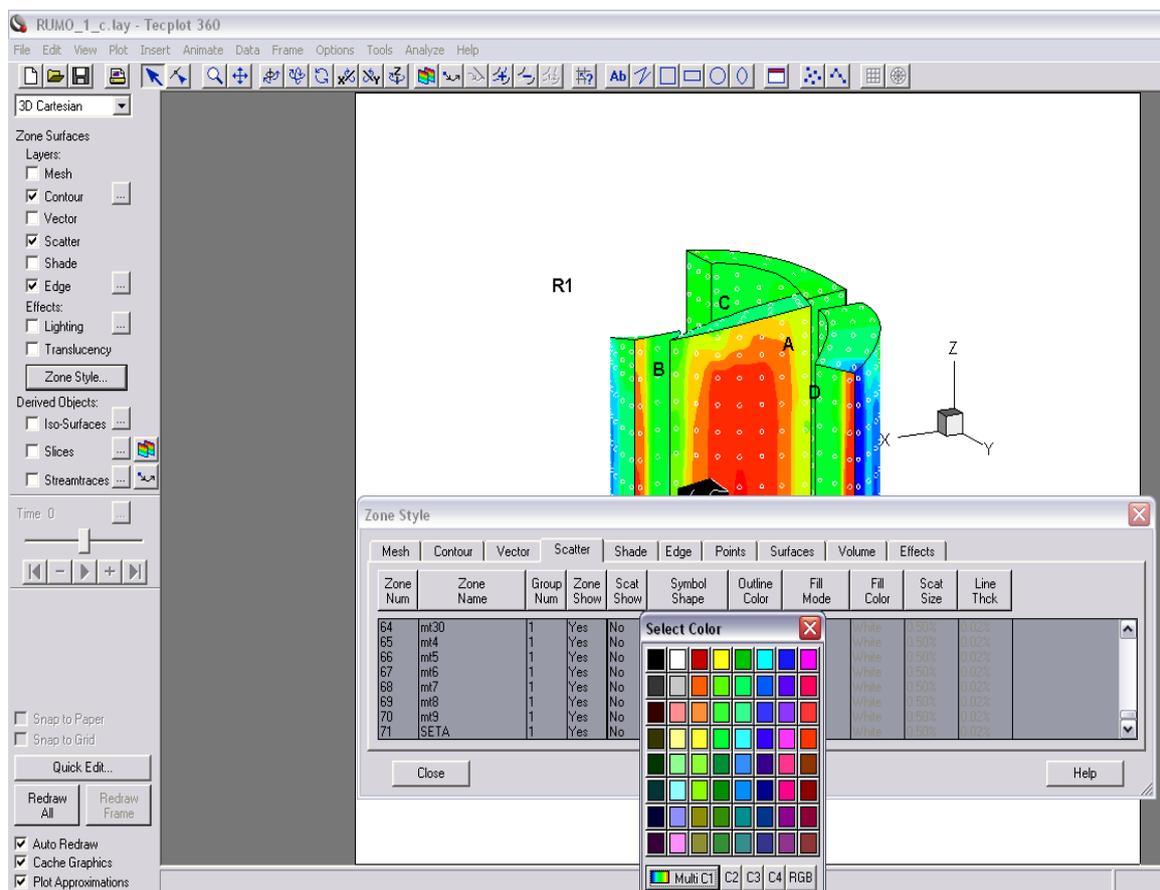
A representação tridimensional é igualmente obtida através do programa Tecplot, sendo ainda mais trabalhoso o processo, sendo também obtida através de ficheiros específicos. Tal como na representação bidimensional, é necessário criar um ficheiro principal com a localização e valores de  $C_p$ , e outro de zoneamento, funcionando como malha (ficheiros tipo na tabela 1 e 2 do Anexo II, respectivamente), de forma a realizar a interpolação entre eles e obter a distribuição dos valores de  $C_p$  nas torres. Na Figura 5.3 é possível observar a malha usada na torre A, a título de exemplo, bem como a geometria da maqueta, sendo esta igualmente obtida através de ficheiros próprios (ficheiro tipo, na tabela 3 do Anexo II). No Anexo II explicita-se o formato destes ficheiros.



**Figura 5.3** – Geometria da maqueta e malha usada na torre A

Nas Figuras de ambas as visualizações (2D e 3D), os pontos a branco correspondem à localização das tomadas de pressão. O tratamento da representação, a forma como se apresentam as tomadas, a malha, os contornos, cores, espessuras e outros parâmetros, para as

diferentes zonas, processa-se na secção de *zone style* do programa. A secção mencionada também permite activar ou desactivar zonas consoante o desejado. Na Figura 5.4 temos o tratamento das zonas, em que neste caso se define a cor da representação das tomadas de pressão, possibilitando ainda a escolha do símbolo (ponto, quadrado, circulo, etc.) bem como a sua dimensão.



**Figura 5.4** – Interface do tratamento da representação 3D no Tecplot.

A representação tridimensional encontra-se na Figura 5.5e no Anexo IV.

Como foi referido anteriormente, a representação tridimensional permite-nos uma maior percepção dos resultados em função do sentido do escoamento, e no que diz respeito à influência das torres nos resultados obtidos.

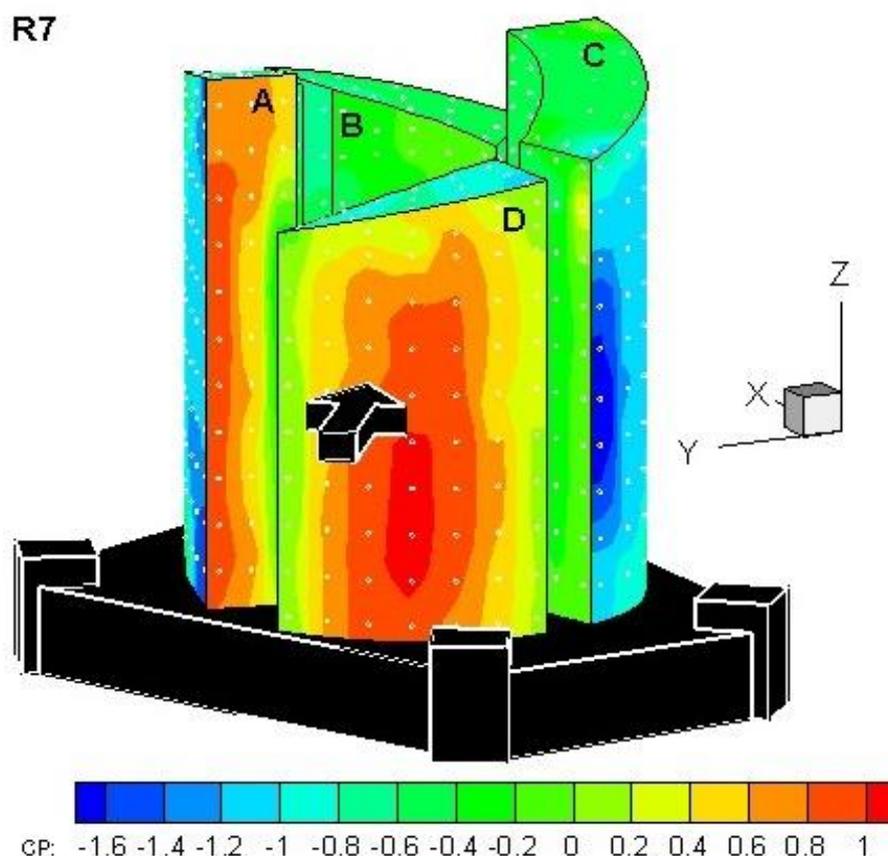
O coeficiente de pressão na zona interior da face direita da torre D para o rumo 1 é próxima de zero, em contrapartida na zona exterior da mesma face aproxima-se de um, uma situação recorrente noutras faces e que se explica pelo facto das zonas interiores não serem afectadas directamente pelo escoamento desviado pela torre a barlavento. Tal situação também se verifica nas torres que se encontram mais a sotavento do escoamento, pois estão protegidas pelas que se encontram a barlavento.

Como foi mencionado na análise bidimensional, observando a Figura 5 do Anexo IV, na face exterior da torre C e na face direita da torre B, para o rumo R5, o valor da pressão é maior no centro, diminuindo a medida que nos afastamos dele, pelo motivo já mencionado.

Outra observação importante após a análise dos resultados, mais concretamente a Figura 5.5 e as Figuras 1 e 3 do Anexo IV, é o facto de nas faces que se encontram mais paralelas à direcção do escoamento se verificar zonas de sucção acentuadas, facto que se deve não só ao paralelismo do escoamento e das faces, mas sobretudo por ser desviado quando intercepta a torre a barlavento, o que causa o seu aceleração (uma vez que a área de passagem diminui, aumentando a velocidade) e resultando zonas de grande depressão.

Na Figura 2 do Anexo IV, no topo da torre A, junto à esquina a barlavento, verifica-se uma concentração de pressões negativas originadas pela esteira provocada pela separação do escoamento nessa zona, podendo ser bastante prejudicial para a estrutura.

No CD anexado, na pasta Vídeos, encontram-se vídeos da representação tridimensional para os diferentes rumos.



**Figura 5.5** - Isolinhas do coeficiente de pressão para rumo R7.

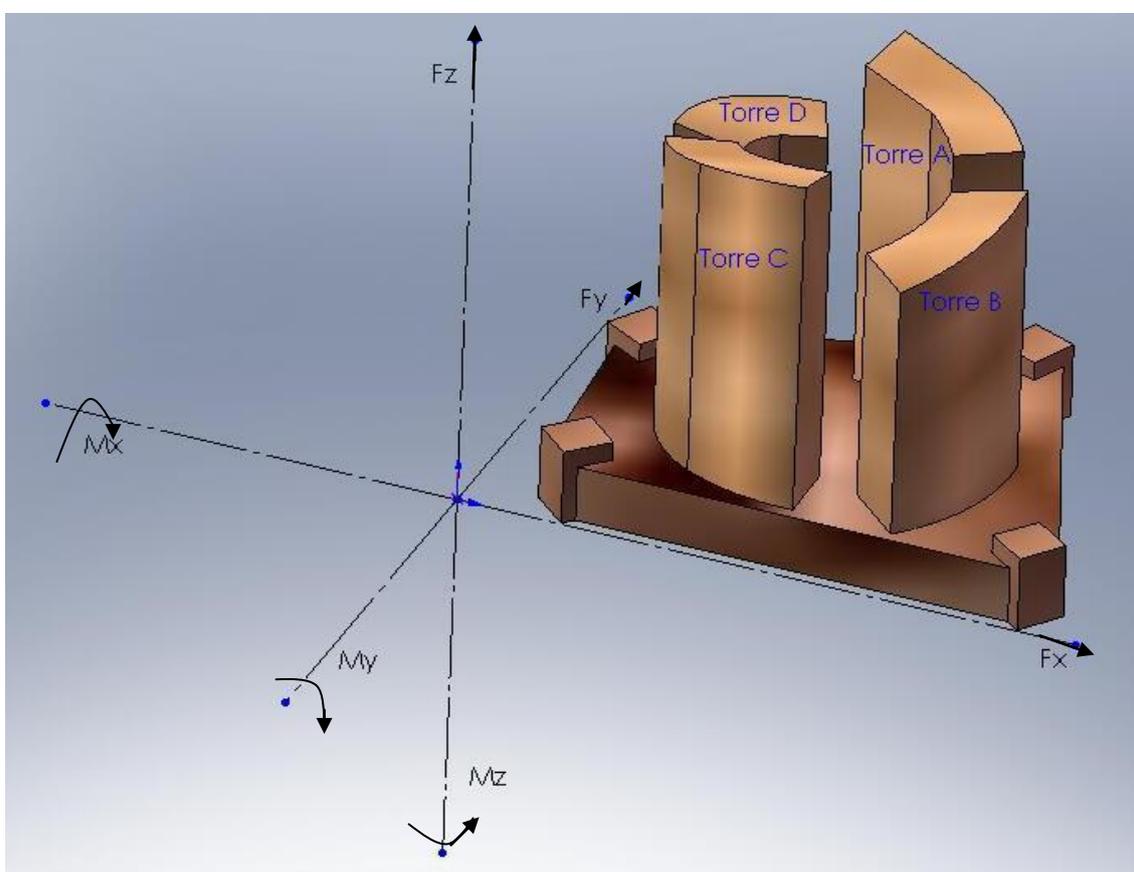
### 5.3 Forças e Momentos

Na Figura 5.6 representa-se o sistema de eixos de referência associado ao edifício e sentidos positivos para as diferentes forças e momentos.

Os valores das forças e momentos resultantes traduzem o impacto do vento nas torres, o que permite o cálculo da carga aerodinâmica a que as torres estão sujeitas.

Através de uma folha de cálculo, feita em Microsoft Excel, uma ferramenta essencial para a realização dos cálculos e sua apresentação, foi possível obter as referidas forças e momentos.

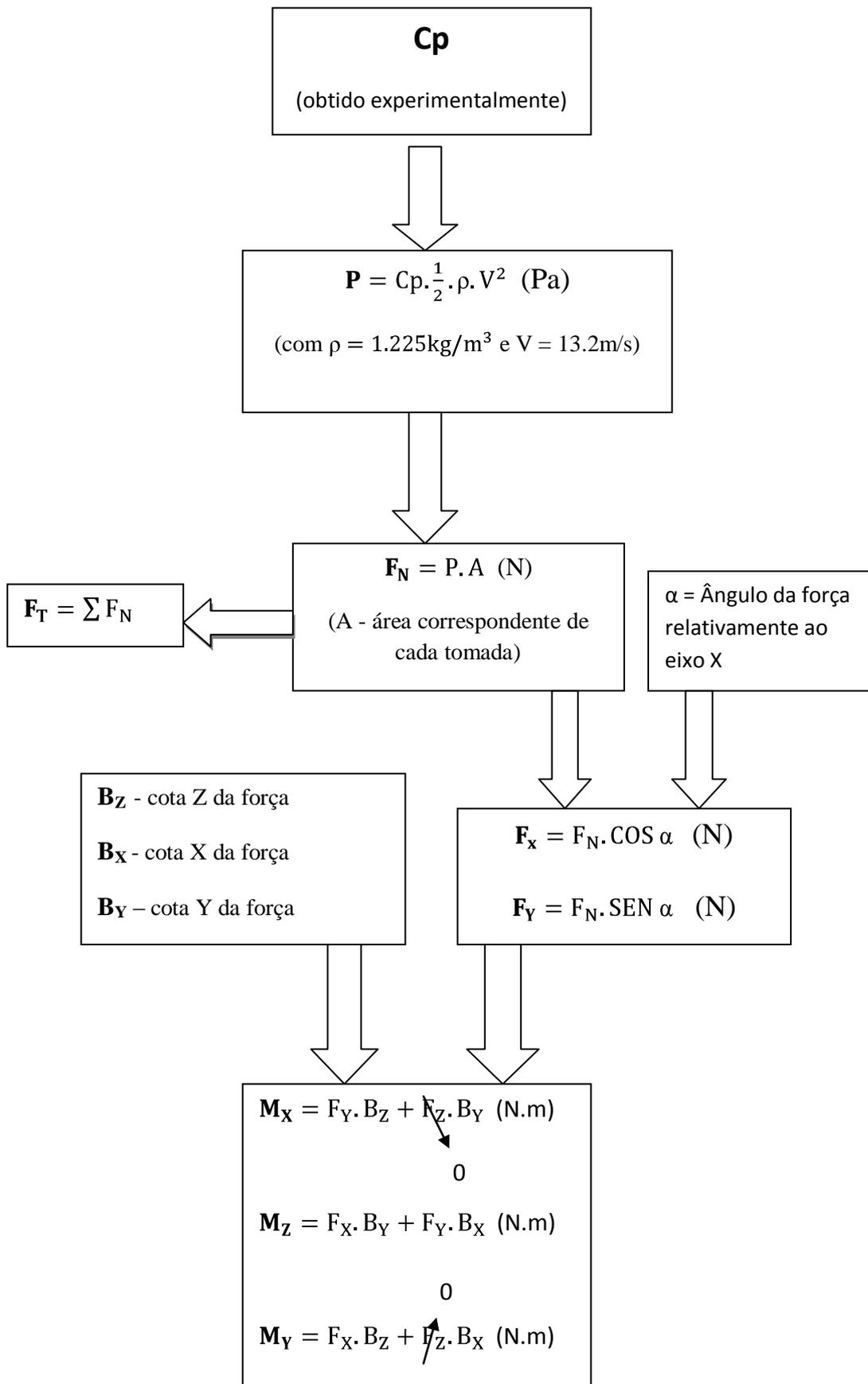
Recorda-se que as forças actuam sempre perpendicularmente as superfícies das torres. No presente trabalho, considera-se que a área circundante a cada tomada de pressão é plana.



**Figura 5.6** – Sistemas de eixos de referência.

As forças, e posteriormente os momentos, são calculadas com o recurso aos valores do coeficiente de pressão obtidos experimentalmente. No fluxograma seguinte, apresenta-se o processo de cálculo partindo do coeficiente de pressão, até aos momentos resultantes em função do sistema de eixos apresentado anteriormente.

*Fluxograma de cálculo para a obtenção das forças e momentos resultantes.*



Na tabela 2 apresentam-se as forças e momentos resultantes na maquete para os rumos R1, R2, R5 e R6, para as diferentes torres e faces, considerando a densidade do ar de 1.225 kg/m<sup>3</sup> e velocidade de escoamento de 13.2 m/s.

|   |    | R1     |       |       |        | R2     |       |       |       |
|---|----|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|   |    | FN     | Mx    | My    | Mz     | FN     | Mx    | My    | Mz    |
| A | AE | 27,06  | -9,85 | -4,91 | -13,04 | 5,62   | -1,44 | -2,16 | -0,83 |
|   | AI | -15,90 | -7,11 | -3,62 | -7,01  | -13,34 | -6,09 | -3,07 | -6,02 |
|   | AL | -9,81  | 1,04  | -4,25 | 8,56   | -6,81  | 0,75  | -3,07 | 5,94  |
|   | AR | -11,03 | -3,76 | 2,36  | 8,56   | 5,23   | 1,38  | -0,86 | 6,19  |
| B | BE | -28,30 | -3,28 | 9,54  | -16,66 | 10,39  | -0,11 | -3,90 | 4,17  |
|   | BI | -13,09 | 1,60  | -3,91 | 8,26   | -9,93  | 1,40  | -3,33 | 6,31  |
|   | BL | -2,34  | 1,02  | -0,16 | 2,20   | 4,01   | -1,13 | 0,17  | -4,55 |
|   | BR | -5,88  | -1,50 | -1,44 | -3,54  | -6,30  | -1,56 | -1,50 | -3,80 |
| C | CE | -20,03 | -6,13 | -2,95 | -6,33  | -23,33 | -6,88 | -3,21 | -7,62 |
|   | CI | -9,91  | 3,84  | 1,74  | 4,12   | -5,36  | 2,47  | 0,91  | 2,66  |
|   | CL | -6,51  | 0,07  | 2,89  | -0,78  | -5,07  | 0,05  | 1,86  | -0,62 |
|   | CR | -13,65 | 2,72  | -0,73 | 3,42   | -10,20 | 3,83  | -1,02 | 5,11  |
| D | DE | -35,05 | 6,96  | -8,98 | 25,51  | -17,18 | 2,70  | -4,90 | 11,49 |
|   | DI | -9,50  | -1,53 | 3,01  | -6,31  | -7,79  | -1,63 | 2,29  | -5,77 |
|   | DL | -5,70  | -2,25 | 0,13  | -2,45  | -7,68  | -2,96 | 0,17  | -3,31 |
|   | DR | -0,45  | 0,07  | 0,16  | 0,15   | -6,06  | 0,88  | 1,92  | -2,34 |
|   |    | R5     |       |       |        | R6     |       |       |       |
|   |    | FN     | Mx    | My    | Mz     | FN     | Mx    | My    | Mz    |
| A | AE | -19,59 | 7,22  | 4,11  | 8,47   | -20,19 | 7,82  | 4,21  | 8,81  |
|   | AI | -12,26 | -5,34 | -3,49 | -4,40  | -7,76  | -2,87 | -1,45 | -3,49 |
|   | AL | -7,33  | 0,79  | -3,21 | 6,41   | -4,39  | 0,34  | -1,38 | 3,84  |
|   | AR | -7,28  | -2,47 | 1,55  | -8,45  | -7,47  | -2,52 | 1,58  | -8,63 |
| B | BE | -18,01 | -1,92 | 5,88  | -8,78  | -13,23 | -1,41 | 4,30  | -7,75 |
|   | BI | -12,14 | 1,55  | -3,90 | 0,92   | -21,58 | 0,98  | -2,19 | 3,60  |
|   | BL | -7,48  | 2,89  | -0,44 | 8,46   | -6,94  | 2,46  | -0,37 | 7,86  |
|   | BR | 9,99   | 2,33  | 2,23  | 6,08   | 1,78   | 0,43  | 0,41  | 1,34  |
| C | CE | 27,24  | 9,55  | 4,27  | 11,79  | 0,94   | -1,58 | 3,74  | -5,88 |
|   | CI | -11,37 | 4,93  | 1,94  | 5,24   | -14,14 | 5,28  | 2,04  | 6,63  |
|   | CL | -9,38  | 0,10  | 4,00  | -1,17  | -2,54  | 0,04  | 1,42  | -0,33 |
|   | CR | -7,30  | 2,86  | -0,76 | 3,61   | -0,18  | 0,56  | -0,15 | 0,07  |
| D | DE | -22,63 | 3,05  | -7,02 | 14,31  | -2,06  | 2,39  | 0,60  | 4,27  |
|   | DI | -7,11  | -0,75 | 2,33  | -4,28  | -9,37  | -1,76 | 3,22  | -6,39 |
|   | DL | -7,19  | -2,82 | 0,16  | -3,13  | 1,09   | -0,05 | 0,00  | 0,40  |
|   | DR | -5,07  | 0,79  | 1,72  | -1,98  | -4,46  | 0,73  | 1,58  | -1,72 |

**Tabela 2** – Forças e momentos resultantes para os rumos R1, R2, R5 e R6

Os resultados para os restantes rumos estão apresentados no Anexo V

Tal como era de esperar após a análise das isolinhas de pressão, e na transição dos valores de  $C_p$  em forças, as faces com pressões mais positivas têm como consequência forças resultantes de sinal positivo, como por exemplo as faces AE no rumo 1 e CE no rumo 5, que estão orientadas a barlavento do escoamento e quase perpendicularmente ao mesmo, sofrendo um impacto directo da acção do vento já que obstrui a sua passagem. Já as faces DE e BE para o rumo 1, a força resultante é bastante negativa pelo facto dessas faces estarem quase paralelas ao escoamento, fazendo com que este actue tangencialmente e a velocidades superiores nessas zonas, originando pressões bastante negativas e, conseqüentemente, forças também negativas (de sucção).

Em todas as faces que não sofrem o impacto directo e perpendicular do escoamento, a resultante das forças é negativa, uma vez que a acção da torre mais a barlavento altera o sentido do escoamento. Outro factor que contribui para esta situação é o facto do escoamento ser tangente à maioria das faces. Quanto as faces perpendiculares ao escoamento orientadas a sotavento, a resultante das forças é negativa devido à recirculação existente nessa zona.

A força normal máxima positiva (de pressão) ocorre na face CE para o rumo 5, com o valor de 27,24 N. Já a força normal máxima negativa (de sucção) ocorre também na face CE mas para o rumo 3, e é de 41,42 N. No que diz respeito aos momentos, o máximo, em módulo, é o momento  $M_z$  de 25,51 N.m e ocorre na face DE para o rumo 1.

No CD em Anexo, encontram-se duas folhas de cálculo onde são apresentados os cálculos das forças e momentos resultantes na maqueta e no edifício real. Os documentos mostram o cálculo das forças segundo X e Y para todas as tomadas e para todos os rumos, bem como os momentos resultantes dessas forças tendo como referência os eixos anteriormente indicados. Nas folhas “Totais” e ” Memória” encontram-se respectivamente, as forças e momentos resultantes e o ponto de aplicação (ou linha de acção) da força em cada face, sendo que este último se encontra, por vezes, fora na zona da face, devido à assimetria da distribuição do valor do coeficiente de pressão. As folhas de cálculo, permite-nos também estudar o mesmo edifício nas mesmas condições mas para velocidades diferentes, alterando o seu valor na folha” Totais”. Essa alteração actualiza automaticamente as forças e momentos totais resultantes em função da velocidade pretendida.

Neste cálculo, não foi tida em conta a análise para os topos das torres pelo facto das forças na generalidade serem muito próximas de zero, o que não altera significativamente os resultados. Contudo, apresenta-se o valor do coeficiente de pressão nessas faces.

Na transição dos resultados obtidos na maqueta para o projecto de estruturas do edifício real, o valor das forças tem uma ordem de grandeza de 10000 vezes superior, visto que a maqueta está à escala de 1:100. Neste sentido, a área real é 100x100 vezes maior, originando forças,  $100^2$  vezes superiores às obtidas na maqueta.

## 6 Conclusão

Apresentou-se um estudo em que se mediu experimentalmente o coeficiente de pressão no modelo de um edifício.

Os valores do coeficiente de pressão, obtidos experimentalmente no túnel de vento, para o edifício em estudo são coerentes a nível aerodinâmico.

O edifício em causa, quando sujeito a ventos que embatam perpendicularmente a uma face (rumo R1, R3, R5 e R7 nas faces AE, BE, CE e DE respectivamente), pode ser susceptível a problemas a nível da resistência estática das fachadas, pois estão expostas a forças de valor elevado decorrentes de ventos fortes. Para além do problema nas fachadas, também os utentes podem sentir desconforto no interior do edifício aquando da abertura das janelas devido á forte ventilação gerada pelo embater do vento perpendicularmente a essas fachadas. Ventos com esses rumos podem causar problemas nas faces das torres quase paralelas ao sentido do vento (faces BE e DE para R1, AE e CE para R3, BE e DE para R5 e AE e CE para R7), uma vez que para além das elevadas forças de sucção, resultantes do facto dessa parte do edifício ficar sujeito a elevadas velocidades que se fazem sentir nessas zonas.

O desprendimento de vórtices é um problema que merece especial atenção neste edifício devido à geometria das torres. Quando o vento embate perpendicularmente a uma das faces, tanto nas exteriores como nas laterais, além de poder causar vibrações desfavoráveis à estrutura do edifício pode também causar desconforto e sensação de insegurança aos utentes.

O rumo 4 promove a formação de zonas de estagnação e de recirculação no interior do espaço formado pelas 4 torres. Esta conclusão tem por base o resultados obtidos na face interior da torre B para o referido rumo, uma vez que nessa face resultam pressões fortemente positivas não sendo ela uma face sujeita à acção perpendicular e directa do escoamento. Por consequência, nas zonas de estagnação e recirculação, poderá ocorrer uma acumulação de detritos, acréscimo de turbulência e possivelmente a existência de movimentos periódicos que podem levar a origem de ruído.

Uma análise importante, que também deveria ser feita, seria a interacção edifícios na acção do vento nomeadamente edifícios situados a sotavento, bem como o efeito provocado por outros a barlavento, já que a turbulência de esteira de edifícios a barlavento pode causar alterações significativas nas pressões do vento. Essa é uma limitação deste trabalho, já que a vizinhança do edifício pode ter um papel importante na acção do vento sobre a referida construção e não foi tida em consideração.

As faces que se situam mais a barlavento e as que são mais paralelas ao escoamento são as que sofrem maior influência do impacto do vento, sendo aí que ocorrem as forças, em

módulo, superiores. As restantes faces, na generalidade, estão sujeitas a forças de sucção, de valor baixo, já que o seu coeficiente de pressão é próximo de zero.

Com a realização deste trabalho, conclui-se que os ensaios em túnel de vento são uma ferramenta poderosa e útil quando se estudam estruturas complexas e de elevada importância, sendo este um tema bastante vasto.

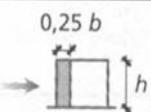
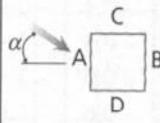
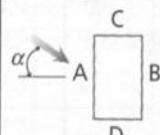
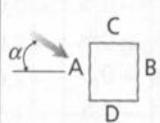
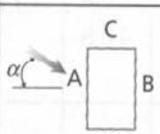
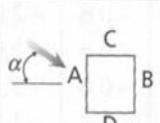
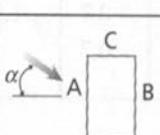
## 7 Bibliografia

- Blessmann, J. (1989) *Ação do Vento em Edifícios*, 2ª.ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Borges, A.R.J. (1974), “Aerodinâmica de estruturas verticais esbeltas”, Aspectos da constituição da camada limite Atmosférica e comportamento dinâmico das estruturas, dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Coimbra.
- Bortoli, M.E. (2005), “Efeito do entorno urbano sobre as acções do vento em edifícios”, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Ferreira, A.D. (1999), “Simulação numérica e experimental de escoamentos turbulentos em torno de obstáculos”, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Fontes, A.C.D., (2003), “Importância dos Efeitos de Vizinhança na Resposta Dinâmica de um Edifício à Ação do Vento”, Tese de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Grosso, M., Marino, D., Parisi, E., “A wind pressure distribution Calculation for multizone airflow models”, Polytecnic University of Turin.
- Isyumov, N.; Poole, M. (1983) “Wind Induced Torque on Square and Rectangular Building Shapes”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.13, 1983.
- Jorge, N.F.M.F.G. (2001), “Acção do Vento no Edifício da Nova Sede da Telecel (relatório de progresso)”, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.
- RSAEEP - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Publisher Team, Dec. - Lei nº e53/83. Imprensa Nacional. Lisboa 2007.
- Mendis, P., Ngo, T., Haritos, N., Hira, A., Samali, B., Cheung, J. (2007), “Wind Loading on Tall Buildings”, *EJSE Special Issue: Loading on Structures*.
- Meroney, R.N. (1990), “Fluid Dynamics of flow over hills/mountains – Insights obtained through physical modeling”, William Blumen (Ed.), *Meteorological Monographs*, 23, nº 45, *Atmospheric Processes Over Complex Terrain, Massachusetts*.

- Moreira, G.A.A. (2007), “Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica com Validação Experimental”, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Munhoz, F.C., Garcia,A. (2006), “Caracterização da velocidade e direção predominante de ventos para a localidade de Ituverava - SP”, Revista Brasileira de Meteorologia, 2008.
- Oliveira, L.A., Lopes, A.G. (2006), *Mecânica dos Fluidos*, ETEP- *Edições Técnicas e Profissionais*.
- Silva, M.C. G. (1993), “Aerodinâmica de Veículos – Optimização da Forma Exterior e Estudo do Escoamento no Interior do Habitáculo de um Modelo de Autocarro”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sousa, A.M.L., Oliveira, M.G.K., Núñez, G.J.Z., Machado, D.S., G.J.Z., Carpeggiani, Siqueira, G.M. (2008), Estudo em túnel de vento da cobertura do Estádio da Gama – Brasília, Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Sousa, A.M.L., Núñez, G.J.Z., Carpeggiani, E.A., Paluch, M.J. (2002), “Estudo em túnel de vento da cobertura do aeroporto Internacional dos Guararapes, Recife”, Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Stull, R. B. (1988), "An Introduction to Boundary Layer Meteorology". Atmospheric Sciences Library, D. Reidel Pub Co.
- Tubelis, A., Nascimento, F. C. (1984), “Meteorologia descritiva. Fundamentos e aplicações brasileiras”, São Paulo.

## Anexo I

Coeficientes de pressão adoptados pelo Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP)

| Coeficientes de pressão $\delta_{pe}$ para paredes |                                    |   |                                    |                                     |       |      |       |   |
|--|------------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|-------|------|-------|---|
| Relações geométricas do edifício (*)               |                                    | Planta  | Direcção do vento $\alpha$ (graus) | Acções globais sobre as superfícies |       |      |       | Acções locais na faixa referenciada na figura                                       |
| $\frac{h}{b}$                                      | $\frac{a}{b}$                      |   |                                    | A                                   | B     | C    | D     |  |
| $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$                     | $1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ |    | 0                                  | +0,7                                | -0,2  | -0,5 | -0,5  | -0,8  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,5                                | -0,5  | +0,7 | -0,2  |   |
|  | $\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$ |   | 0                                  | +0,7                                | -0,25 | -0,6 | -0,6  | -1,0  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,5                                | -0,5  | +0,7 | -0,1  |   |
| $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$       | $1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ |  | 0                                  | +0,7                                | -0,25 | -0,6 | -0,6  | -1,1  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,6                                | -0,6  | +0,7 | -0,25 |   |
|  | $\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$ |  | 0                                  | +0,7                                | -0,3  | -0,7 | -0,7  | -1,1  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,5                                | -0,5  | +0,7 | -0,1  |   |
| $\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$                 | $1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ |  | 0                                  | +0,8                                | -0,25 | -0,8 | -0,8  | -1,2  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,8                                | -0,8  | +0,8 | -0,25 |   |
|  | $\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$ |  | 0                                  | +0,7                                | -0,4  | -0,7 | -0,7  | -1,2  |
|  |                                    |   | 90                                 | -0,5                                | -0,5  | +0,8 | -0,1  |   |

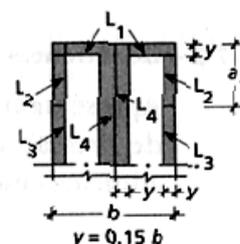
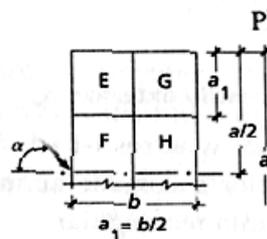
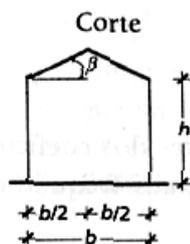
(\*)  $h$  representa a altura do edifício;  $a$  e  $b$  representam, respectivamente, a maior e a menor dimensão em planta.

**Quadro I** - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) em fachadas de edifícios

Fonte: RSAEEP

Coeficientes de pressão  $\delta_{pe}$  para coberturas de duas vertentes

$a > b$



| Relações geométricas do edifício<br>$\frac{h}{b}$ | Inclinação da vertente<br>$\beta$ (graus) | Acções globais     |      |                     |      | Acções locais |       |       |       |
|---|---|--------------------|------|---------------------|------|---------------|-------|-------|-------|
|   |   | Direcção do vento  |      |                     |      |               |       |       |       |
|   |   | $\alpha = 0^\circ$ |      | $\alpha = 90^\circ$ |      | $L_1$         | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ |
|   |   | E, F               | G, H | E, G                | F, H |               |       |       |       |
| $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$                    | 0   | -0,8               | -0,4 | -0,8                | -0,4 | -2,0          | -2,0  | -2,0  |       |
|   | 5   | -0,9               | -0,4 | -0,8                | -0,4 | -1,4          | -1,2  | -1,2  | -1,0  |
|   | 10  | -1,2               | -0,4 | -0,8                | -0,6 | -1,4          | -1,4  |       | -1,2  |
|   | 20  | -0,4               | -0,4 | -0,7                | -0,6 | -1,0          |       |       | -1,2  |
|   | 30  | 0                  | -0,4 | -0,7                | -0,6 | -0,8          |       |       | -1,1  |
|   | 45  | -0,3               | -0,5 | -0,7                | -0,6 |               |       |       | -1,1  |
| $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$      | 0   | -0,8               | -0,6 | -1,0                | -0,6 | -2,0          | -2,0  | -2,0  |       |
|   | 5   | -0,9               | -0,6 | -0,9                | -0,6 | -2,0          | -2,0  | -1,5  | -1,0  |
|   | 10  | -1,1               | -0,6 | -0,8                | -0,6 | -2,0          | -2,0  | -1,5  | -1,2  |
|   | 20  | -0,7               | -0,5 | -0,8                | -0,6 | -1,5          | -1,5  | -1,5  | -1,0  |
|   | 30  | -0,2               | -0,5 | -0,8                | -0,8 | -1,0          |       |       | -1,0  |
|   | 45  | -0,2               | -0,5 | -0,8                | -0,8 |               |       |       |       |
| $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$                | 0   | -0,7               | -0,6 | -0,9                | -0,7 | -2,0          | -2,0  | -2,0  |       |
|   | 5   | -0,7               | -0,6 | -0,8                | -0,8 | -2,0          | -2,0  | -1,5  | -1,0  |
|   | 10  | -0,7               | -0,6 | -0,8                | -0,8 | -2,0          | -2,0  | -1,5  | -1,2  |
|   | 20  | -0,8               | -0,6 | -0,8                | -0,8 | -1,5          | -1,5  | -1,5  | -1,2  |
|   | 30  | -1,0               | -0,5 | -0,8                | -0,7 | -1,5          |       |       |       |
|   | 40  | -0,2               | -0,5 | -0,8                | -0,7 | -1,0          |       |       |       |
|   | 50  | +0,2               | -0,5 | -0,8                | -0,7 |               |       |       |       |

NOTA:

- Não há que considerar valores particulares para as acções locais nos casos em que no quadro não são indicados os respectivos coeficientes.

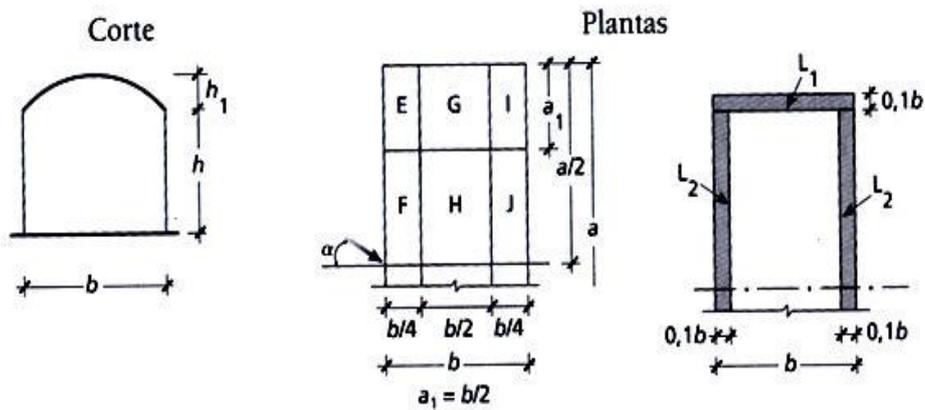
Quadro II - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) em coberturas de duas vertentes

Fonte: RSAEEP

Coeficientes de pressão  $\delta_{pe}$  para coberturas cilíndricas  
com directriz circular, elíptica ou parabólica

$$a > b; h/b \geq 0,5$$

$$0,1 \leq h_1/b \leq 0,5$$

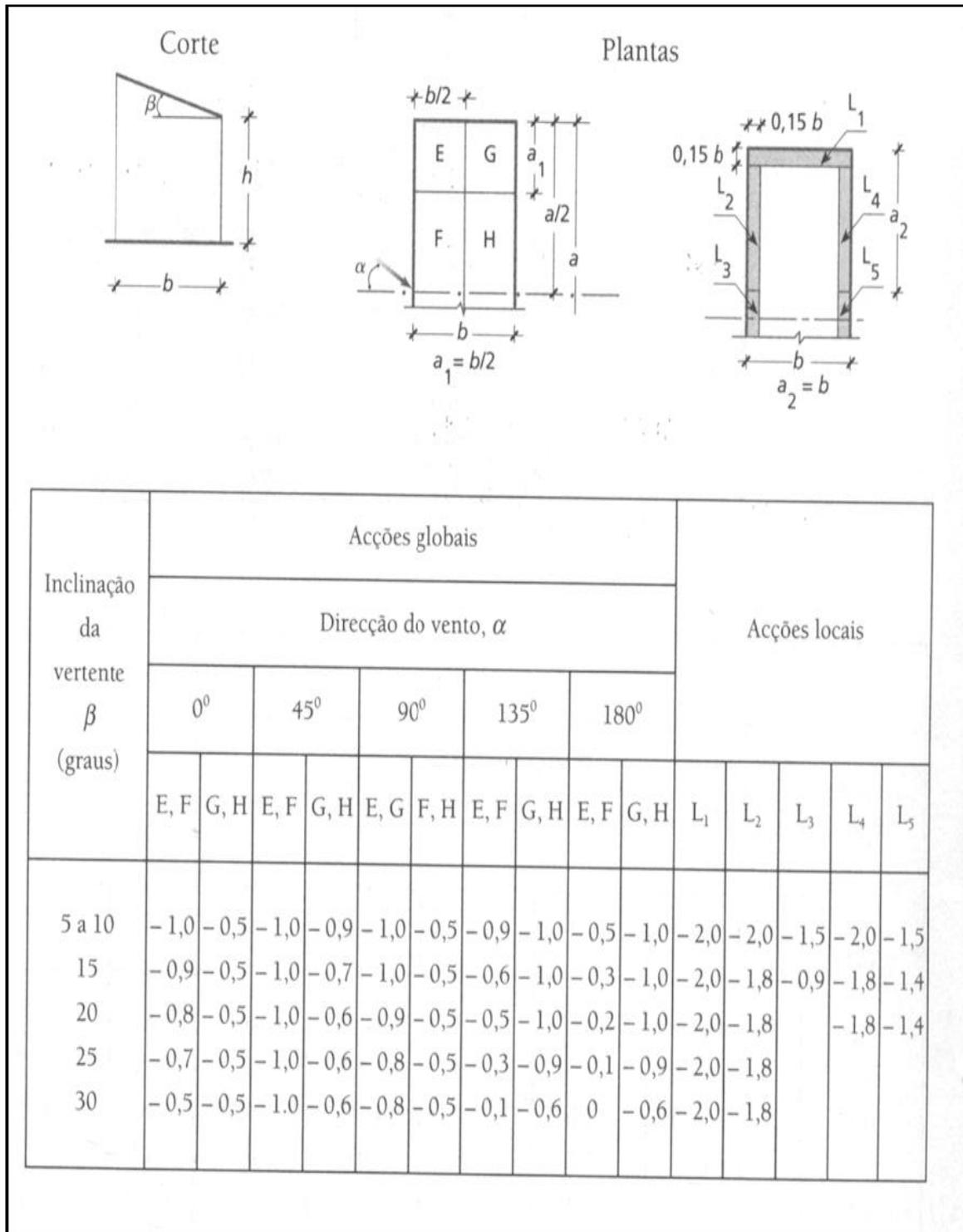


| Abatimento<br>$h_1/b$ | Acções globais              |      |      |            |         | Acções locais |      |
|-----------------------|-----------------------------|------|------|------------|---------|---------------|------|
|                       | Direcção do vento, $\alpha$ |      |      |            |         |               |      |
|                       | $0^\circ$                   |      |      | $90^\circ$ |         |               |      |
|                       | E, F                        | G, H | I, J | E, G, I    | F, H, J |               |      |
| 0,1                   | -0,9                        | -0,8 | -0,5 | -0,8       | -0,6    | -1,6          | -1,8 |
| 0,2                   | -0,9 ou 0(*)                | -0,9 | -0,5 | -0,8       | -0,6    | -1,6          | -1,8 |
| 0,3                   | -0,3 ou +0,2(*)             | -1,0 | -0,5 | -0,8       | -0,6    | -1,6          | -0,6 |
| 0,4                   | +0,4                        | -1,1 | -0,5 | -0,8       | -0,6    | -1,6          |      |
| 0,5                   | +0,7                        | -1,2 | -0,5 | -0,8       | -0,6    | -1,6          |      |

(\*) Deve considerar-se o valor mais desfavorável

**Quadro III** - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) em coberturas cilíndrica

Fonte: RSAEEP

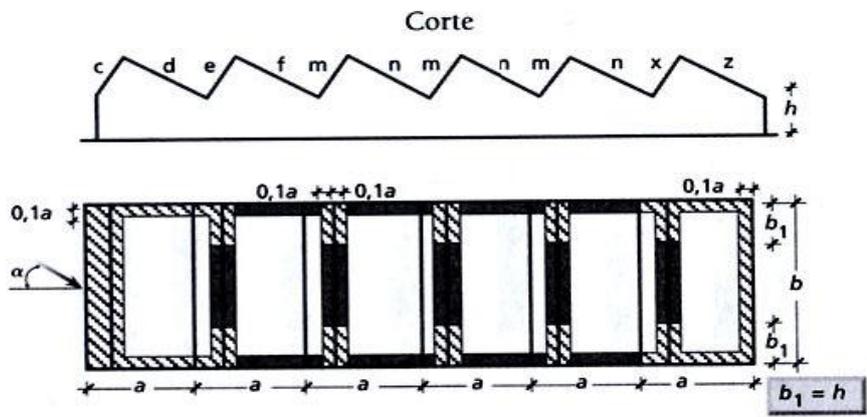


**Quadro IV** - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) em coberturas de uma vertente

Fonte: RSAEEP

Coeficientes de pressão  $\delta_{pe}$  para coberturas múltiplas em dente de serra

$h < a$



1 – Acções globais

| Coeficiente $\delta_{pe}$ nas vertentes |      |      |      |      |      |      |      | Direcção do vento $\alpha = 90^\circ$ |       |       |
|---|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------------|-------|-------|
| c                                       | d    | e    | f    | m    | n    | x    | z    | Coeficientes $\delta_{pe}$ nas bandas |       |       |
| Direcção do vento $\alpha = 0^\circ$    |      |      |      |      |      |      |      | $b_1$                                 | $b_2$ | $b_3$ |
| +0,6                                    | -0,7 | -0,7 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,1 | -0,3 | -0,8                                  | -0,6  | -0,2  |
| Direcção do vento $\alpha = 180^\circ$  |      |      |      |      |      |      |      |                                       |       |       |
| -0,5                                    | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,6 | -0,6 | -0,1 |                                       |       |       |

2 – Acções locais

Os coeficientes  $\delta_{pe}$  que definem as acções locais a ter em conta nas faixas assinaladas na figura são os seguintes:

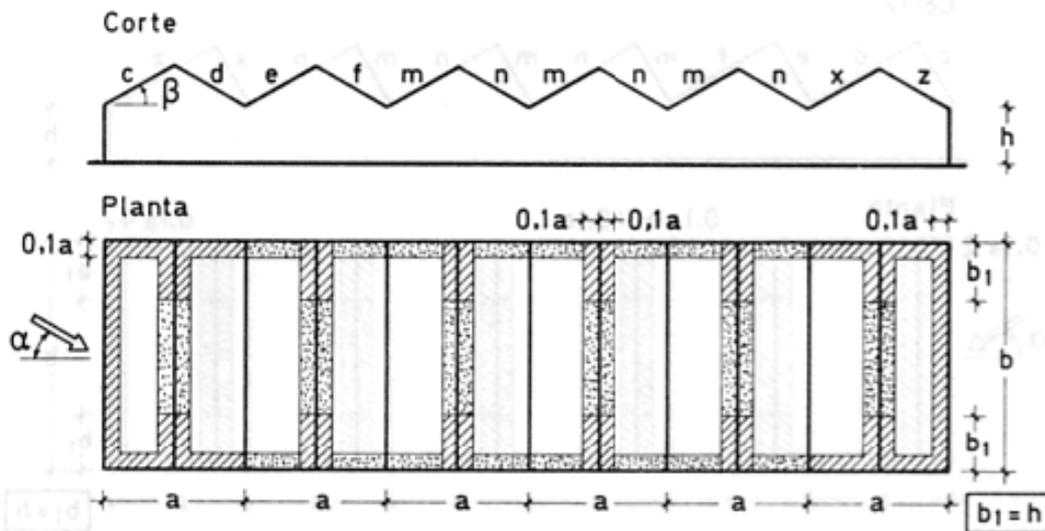
- Faixas tracejadas ..... -2,0
- Faixas sombreadas ..... -1,5

Quadro V - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) para coberturas múltiplas em dente de serra

Fonte: RSAEEP

Coeficientes de pressão  $\delta_{pe}$  para coberturas múltiplas de duas vertentes

$h < a$



1 - Acções globais

| Inclinação das vertentes $\beta$ (graus) | Direcção do vento $\alpha = 0^\circ$     |      |      |      |      |      |      |      | Direcção do vento $\alpha = 90^\circ$ |       |       |
|--|--|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------------|-------|-------|
|  | Coeficientes $\delta_{pe}$ nas vertentes |      |      |      |      |      |      |      | Coeficientes $\delta_{pe}$ nas bandas |       |       |
|  | c  | d    | e    | f    | m    | n    | x    | z    | $b_1$                                 | $b_2$ | $b_3$ |
| 5 a 10                                   | -1,1                                     | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,8                                  | -0,6  | -0,2  |
| 20                                       | -0,7                                     | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,5 |                                       |       |       |
| 30                                       | -0,2                                     | -0,6 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,2 | -0,5 |                                       |       |       |
| 45                                       | +0,3                                     | -0,6 | -0,6 | -0,4 | -0,2 | -0,4 | -0,2 | -0,5 |                                       |       |       |

2 - Acções locais

Os coeficientes  $\delta_{pe}$  que definem as acções locais a ter em conta nas faixas assinaladas na figura são os seguintes:

- Faixas tracejadas ..... - 2,0
- Faixas sombreadas ..... - 1,5

Quadro VI - Coeficientes de pressão exterior ( $\delta_{pe}$ ) para coberturas múltiplas de duas vertentes

Fonte: RSAEEP

## Anexo II

VARIABLES= "X" "Y" "Z" "CP"  
 ZONE I=77 F=POINT T="AE R1"

|         |        |      |       |
|---------|--------|------|-------|
| 109.163 | 59.178 | 6.5  | 0.01  |
| 104.635 | 64.384 | 6.5  | 0.75  |
| 99.295  | 68.753 | 6.5  | 1.01  |
| 93.248  | 72.180 | 6.5  | 0.98  |
| 86.643  | 74.643 | 6.5  | 0.86  |
| 80.749  | 76.922 | 6.5  | 0.69  |
| 73.724  | 79.202 | 6.5  | 0.09  |
| 109.163 | 59.178 | 14.5 | 0.08  |
| 104.635 | 64.384 | 14.5 | 0.69  |
| 99.295  | 68.753 | 14.5 | 0.99  |
| 93.248  | 72.180 | 14.5 | 1.02  |
| 86.643  | 74.643 | 14.5 | 0.93  |
| 80.749  | 76.922 | 14.5 | 0.77  |
| 73.724  | 79.202 | 14.5 | 0.21  |
| 109.163 | 59.178 | 22.5 | 0.09  |
| 104.635 | 64.384 | 22.5 | 0.67  |
| 99.295  | 68.753 | 22.5 | 0.96  |
| 93.248  | 72.180 | 22.5 | 1.02  |
| 86.643  | 74.643 | 22.5 | 0.95  |
| 80.749  | 76.922 | 22.5 | 0.79  |
| 73.724  | 79.202 | 22.5 | 0.18  |
| 109.163 | 59.178 | 30.5 | -0.03 |
| 104.635 | 64.384 | 30.5 | 0.67  |
| 99.295  | 68.753 | 30.5 | 0.94  |
| 93.248  | 72.180 | 30.5 | 1.02  |
| 86.643  | 74.643 | 30.5 | 0.95  |
| 80.749  | 76.922 | 30.5 | 0.78  |
| .       | .      | .    | .     |
| .       | .      | .    | .     |
| .       | .      | .    | .     |

**Tabela 1** – ficheiro tipo para o TecPlot, com os valores de Cp e respectiva localização (3D)

### Legenda:

- ✓ VARIABLES – indica as variáveis respectivamente, em que X, Y e Z são as coordenadas e Cp p valores correspondente do coeficiente de pressão.
- ✓ ZONE I – indica o número de variáveis.
- ✓ F – indica o tipo de função (neste caso tipo ponto).
- ✓ T – título.

```

TITLE = "AL"
VARIABLES = "X"
"Y"
"Z"
"CP"
ZONE T="AL"
STRANDID=0, SOLUTIONTIME=0
I=11, J=11, K=1, ZONETYPE=Ordered
DATAPACKING=POINT
DT=(SINGLE SINGLE SINGLE )
71.84          79.86          0          0.00
71.490        78.450          0          0.00
71.150        77.050          0          0.00
70.800        75.640          0          0.00
70.460        74.230          0          0.00
70.110        72.820          0          0.00
69.77         71.41          0          0.00
69.42         70          0          0.00
69.080        68.600          0          0.00
68.730        67.190          0          0.00
68.390        65.780          0          0.00
71.84          79.86          9.13         0.00
71.490        78.450          9.13         0.00
71.150        77.050          9.13         0.00
70.800        75.640          9.13         0.00
70.460        74.230          9.13         0.00
70.110        72.820          9.13         0.00
69.77         71.41          9.13         0.00
69.42         70          9.13         0.00
69.080        68.600          9.13         0.00
68.730        67.190          9.13         0.00
68.390        65.780          9.13         0.00
71.84          79.86          18.26        0.00
71.490        78.450          18.26        0.00
.              .              .              .
.              .              .              .

```

**Tabela 2** – ficheiro tipo para o TecPlot, indicando a zona (malha) (3D)

Este ficheiro define a zona, isto é, a malha da face, que é 11x11x1, onde se especifica novamente as variáveis, o título da zona, o formato da zona (bloco ou ponto)

De notar que o valor de Cp é 0, pois este ficheiro vai interpolar com o anterior de forma a obter a distribuição de Cp definida por este ficheiro. A localização dos valores de Cp do ficheiro anterior tem que estar dentro da zona definida por este.

GEOMETRY X=0.Y=0.Z=0. T=line3D  
C=BLACK

4

5

|       |      |    |
|-------|------|----|
| 49.15 | 40.4 | 0  |
| 33.18 | 39.5 | 0  |
| 33.18 | 39.5 | 78 |
| 49.15 | 40.4 | 78 |
| 49.15 | 40.4 | 0  |

5

|       |       |      |
|-------|-------|------|
| 54.66 | 76.43 | 0    |
| 61.35 | 61.86 | 0    |
| 61.35 | 61.86 | 68.5 |
| 54.66 | 76.43 | 68.5 |
| 54.66 | 76.43 | 0    |

41

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 33.18 | 39.5  | 0     |
| 33.18 | 39.5  | 78    |
| 32.85 | 42.36 | 77.74 |
| 32.79 | 44.72 | 77.49 |
| 32.95 | 47.38 | 77.15 |
| 33.34 | 50.01 | 76.76 |
| 33.91 | 52.41 | 76.35 |
| 34.67 | 54.73 | 75.91 |
| .     | .     | .     |
| .     | .     | .     |

**Tabela 3** – ficheiro tipo para o TecPlot, para a geometria.

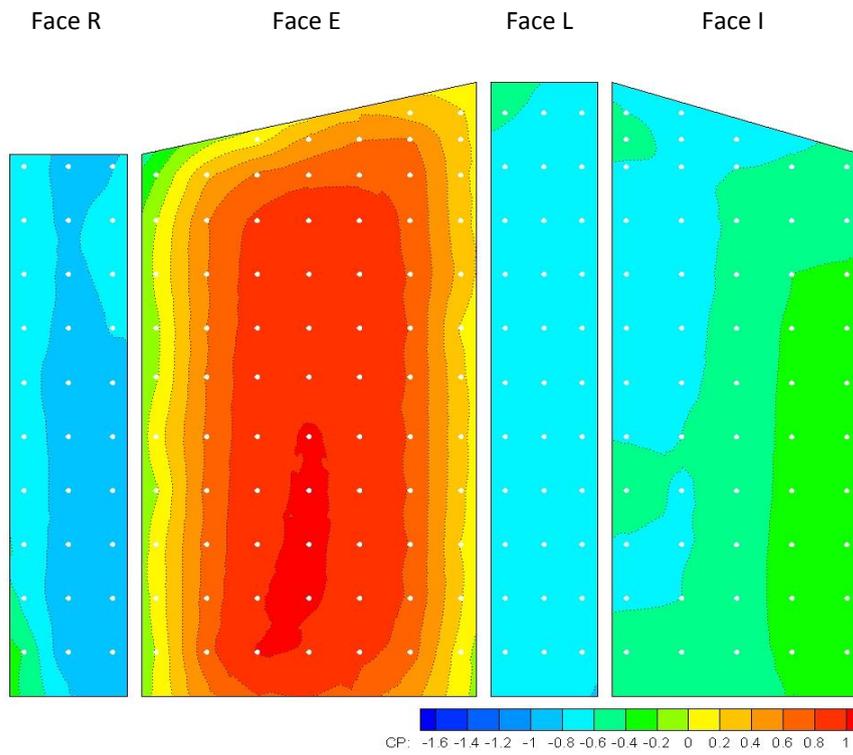
Este ficheiro define qualquer geometria, sendo utilizado para definir a geometria das torres (este exemplo), da base e da seta.

Nele, indica-se a origem (0 0 0) tipo de geometria (Linha 3D) e a cor da linha.

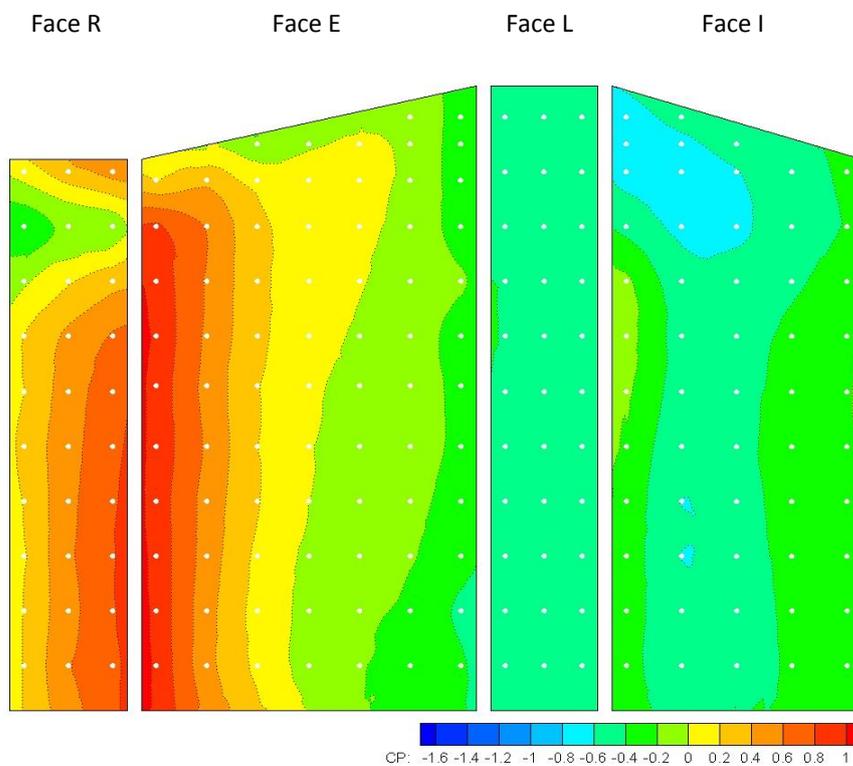
O primeiro valor (4) indica o número de geometrias (4 faces), e o segundo, os pontos consecutivos para formar segmentos entre si. De notar que em cada geometria, o primeiro valor é igual ao ultimo para que o segmento termine onde começa e forme uma zona fechada.

### Anexo III

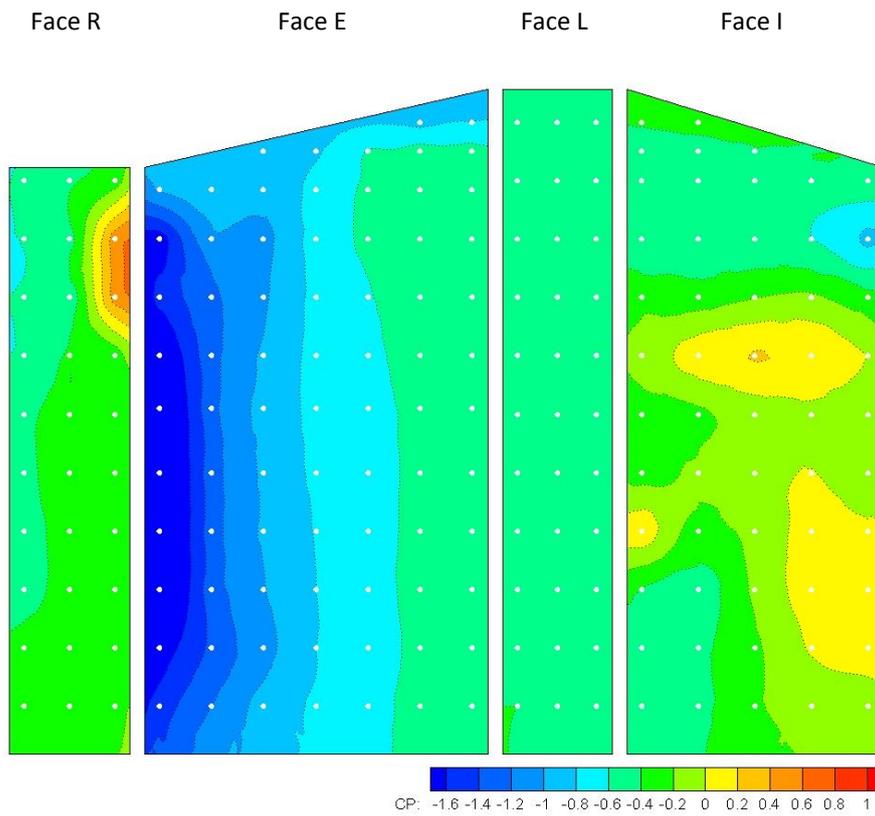
#### Representação bidimensional das isolinhas de pressão



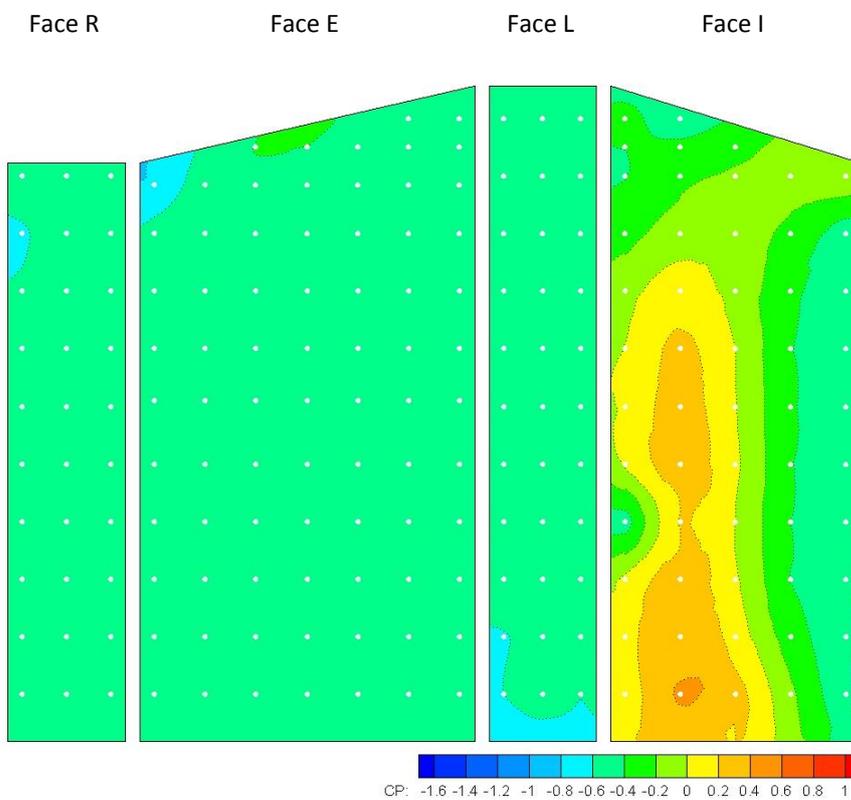
**Figura 1** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R1



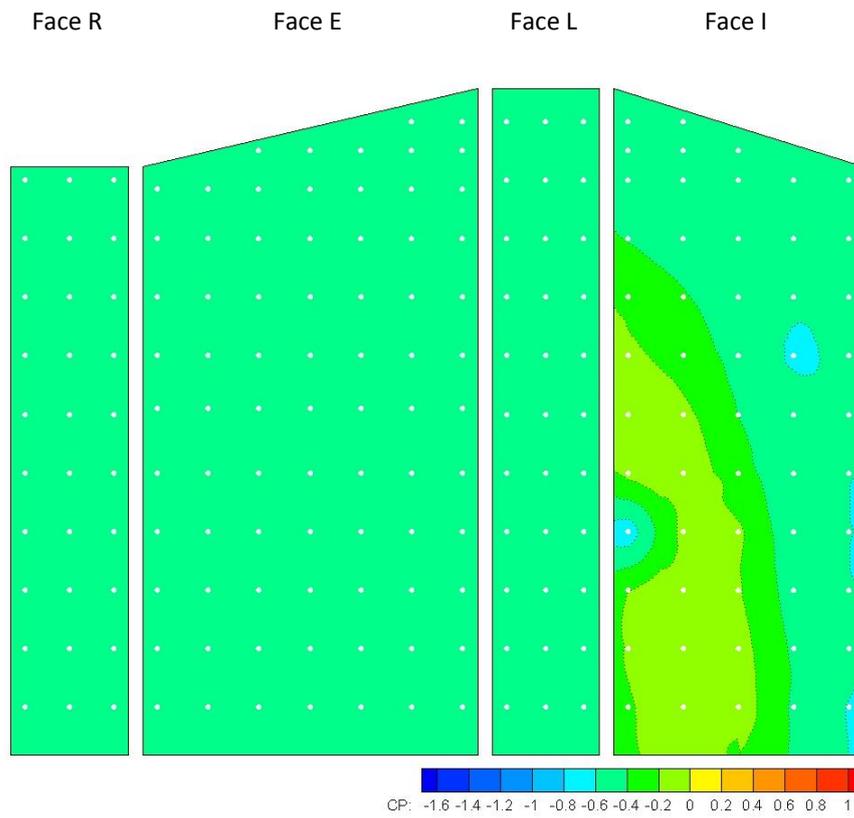
**Figura 2** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R2



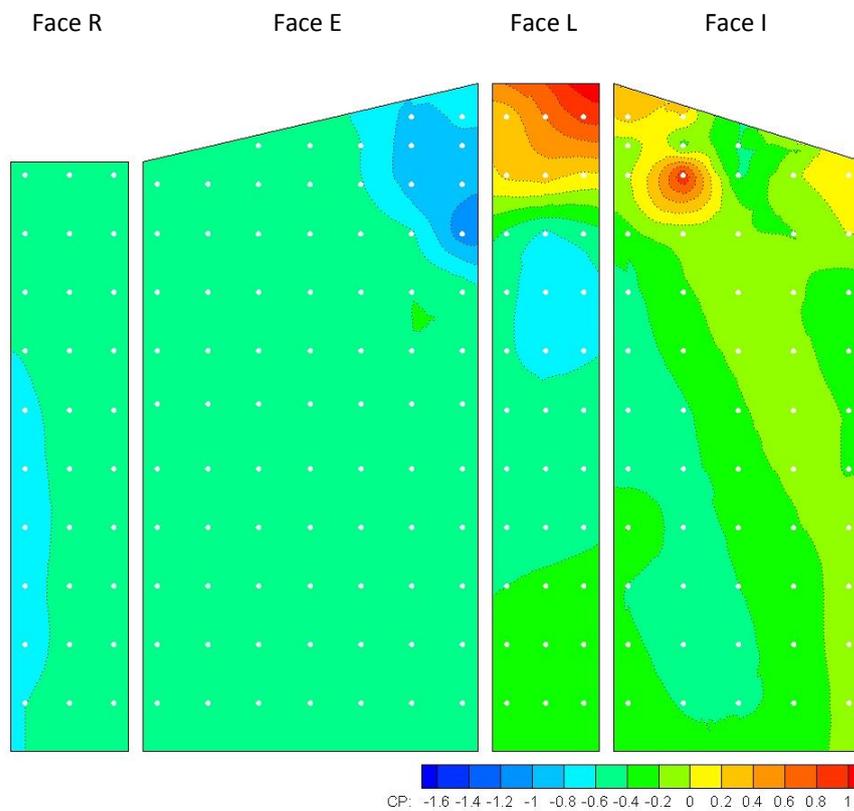
**Figura 3** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R3



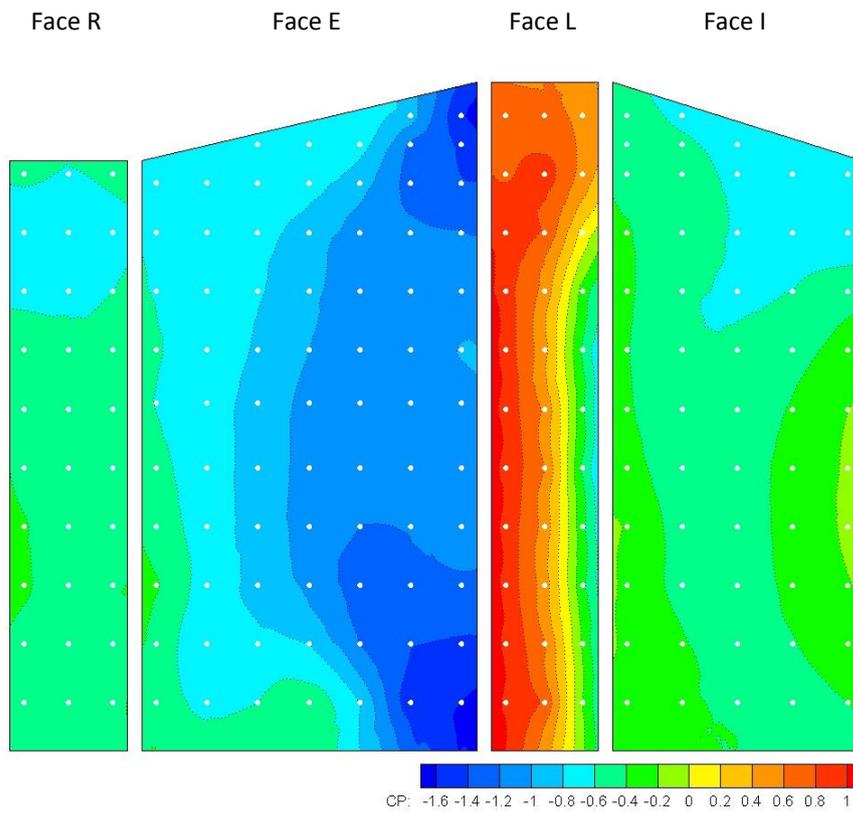
**Figura 4** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R4



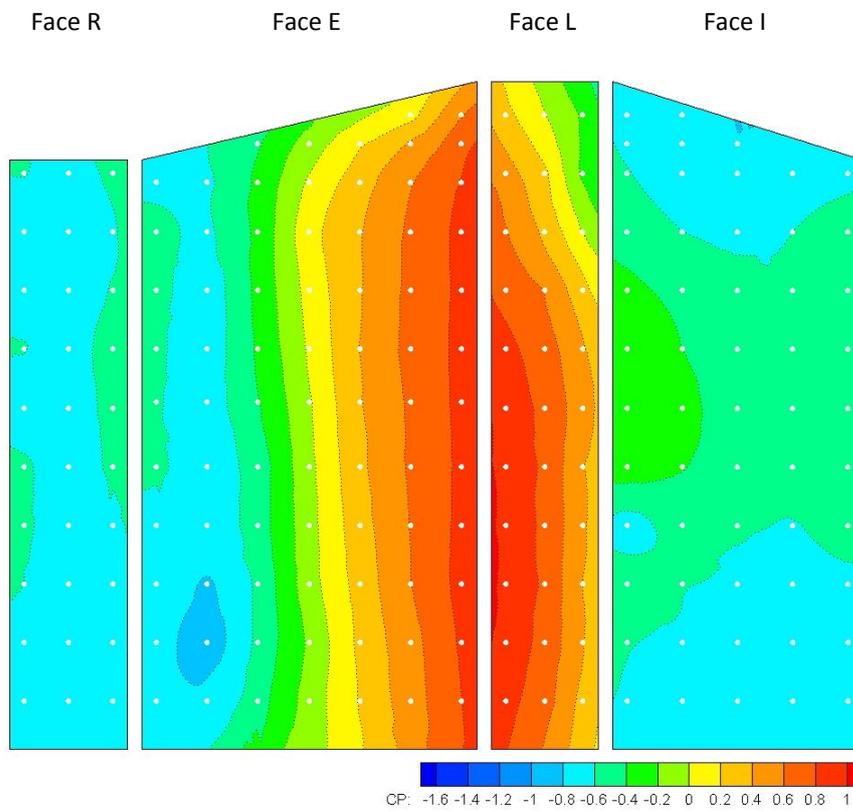
**Figura 5-** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R5



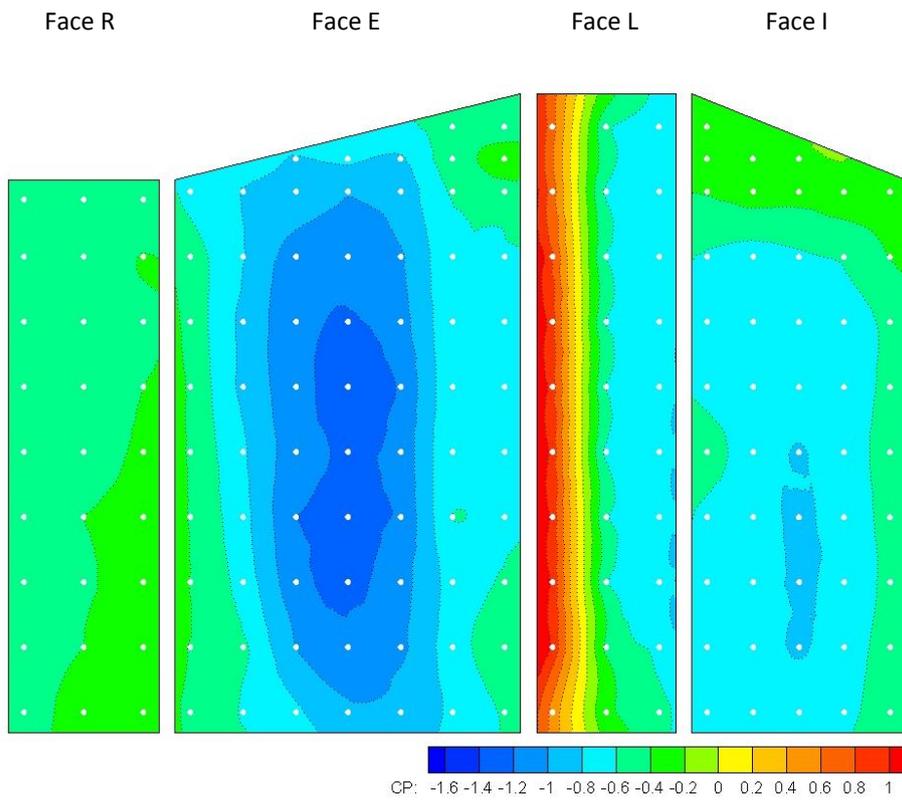
**Figura 6 -** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R6



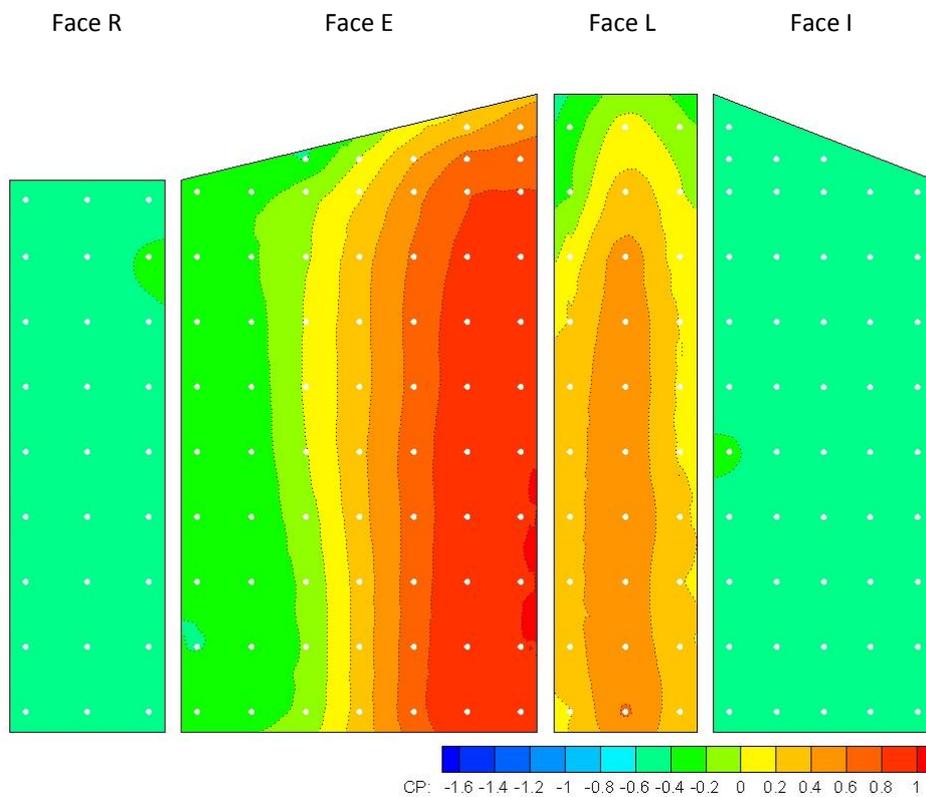
**Figura 7** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R7



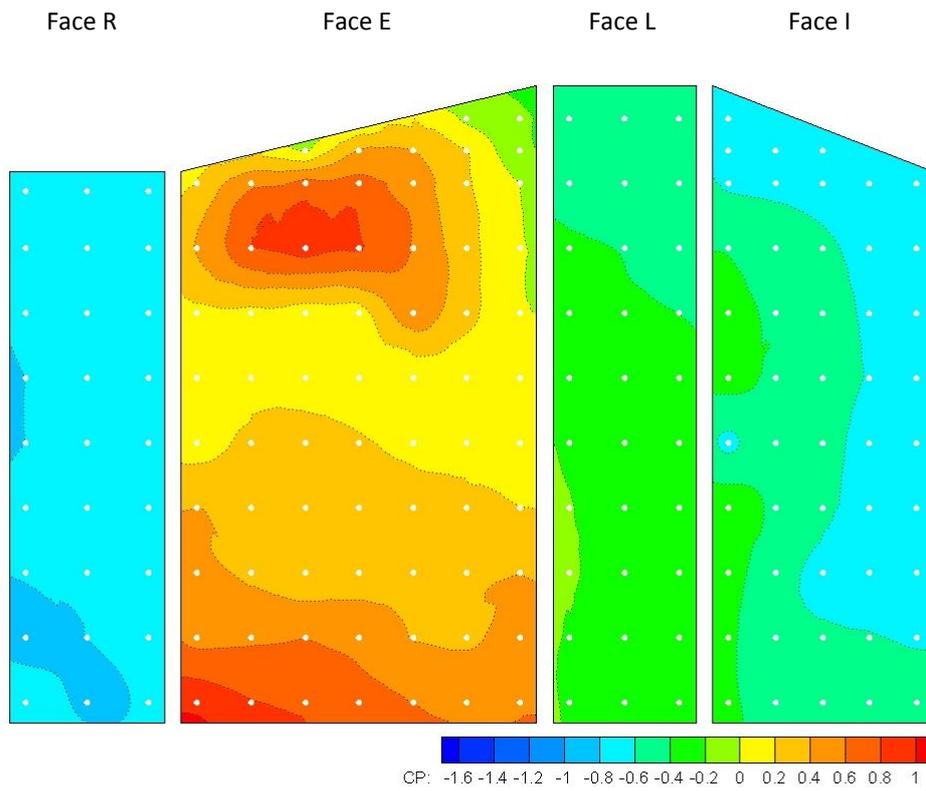
**Figura 8** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre A, para rumo R8



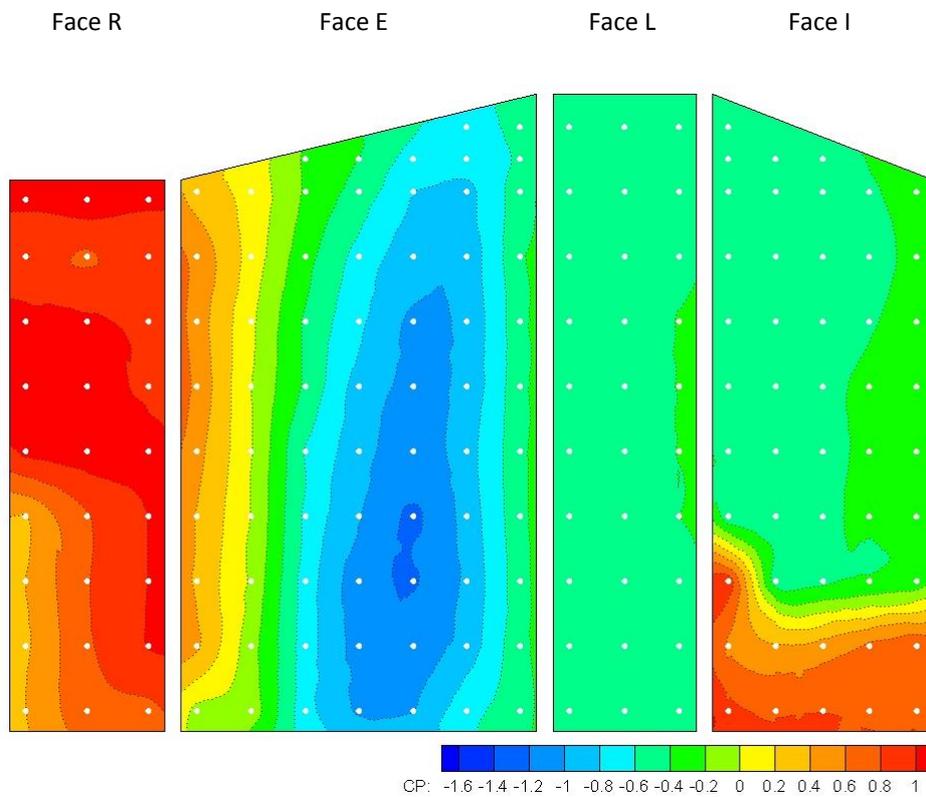
**Figura 9** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R1



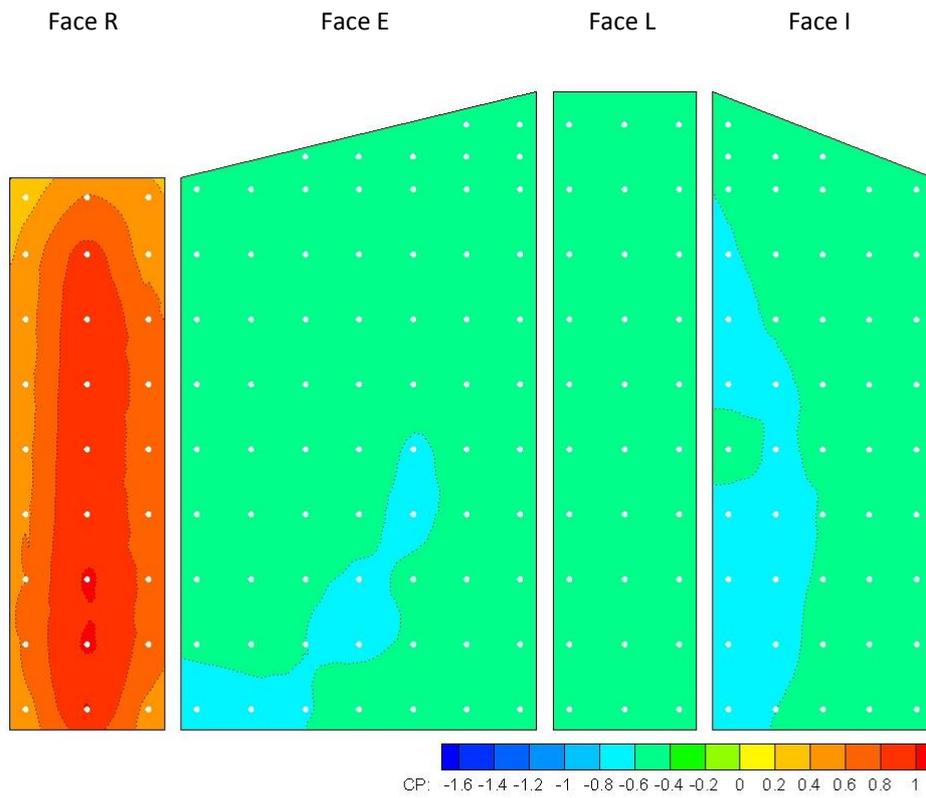
**Figura 10** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R2



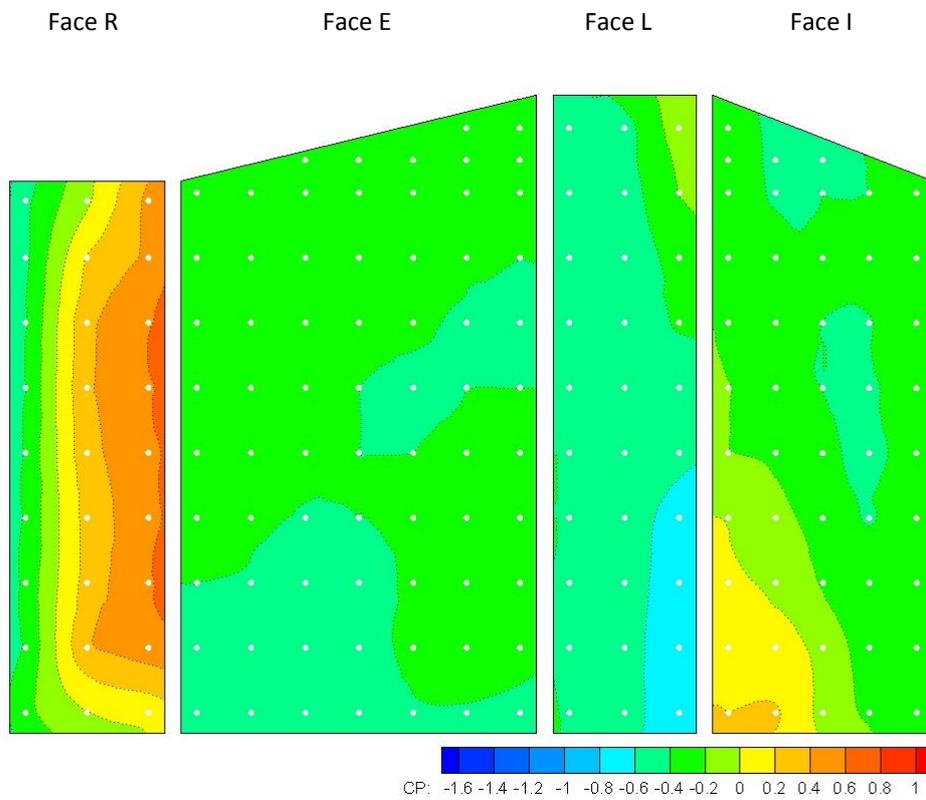
**Figura 11** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R3



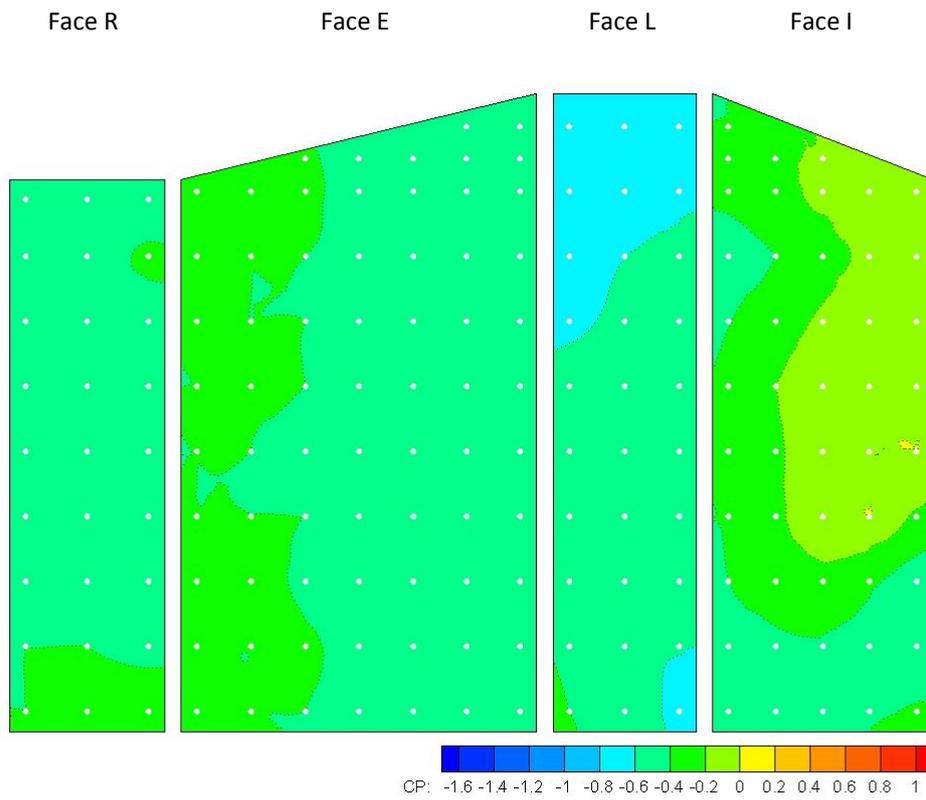
**Figura 12** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R4



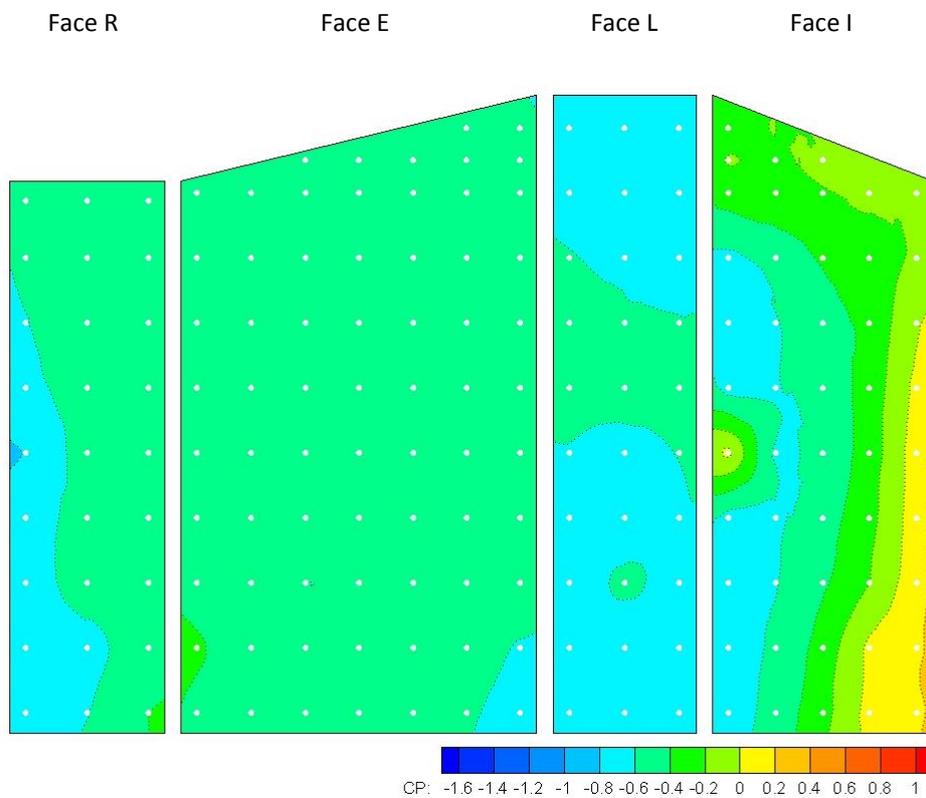
**Figura 13-** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R5



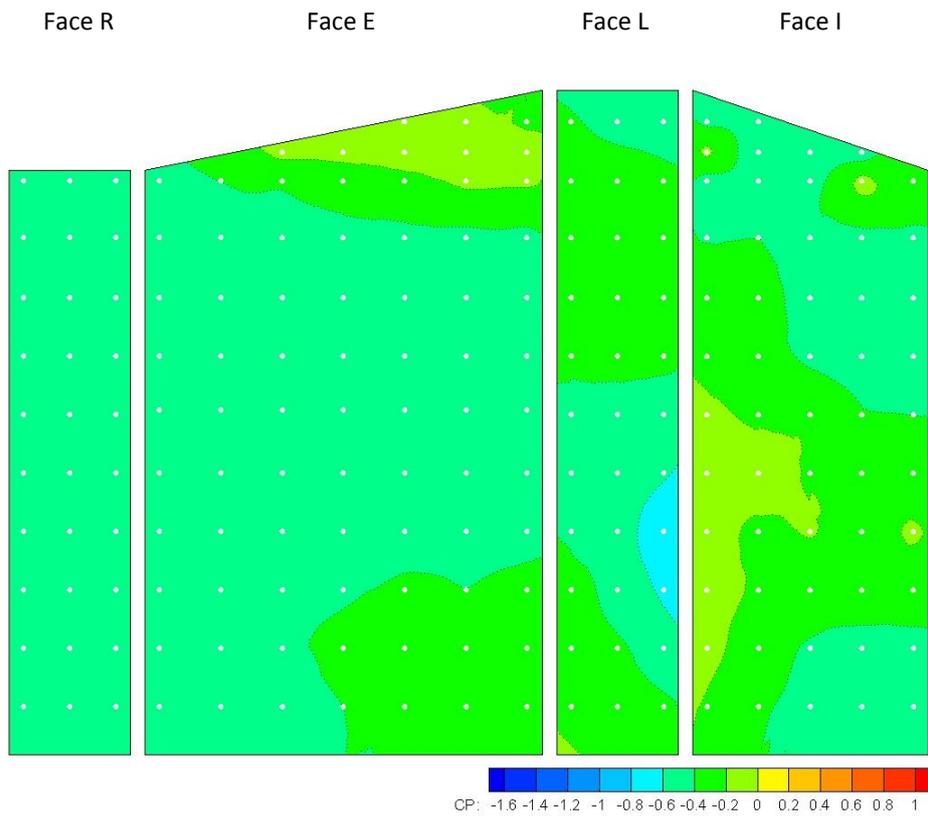
**Figura 14 -** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R6



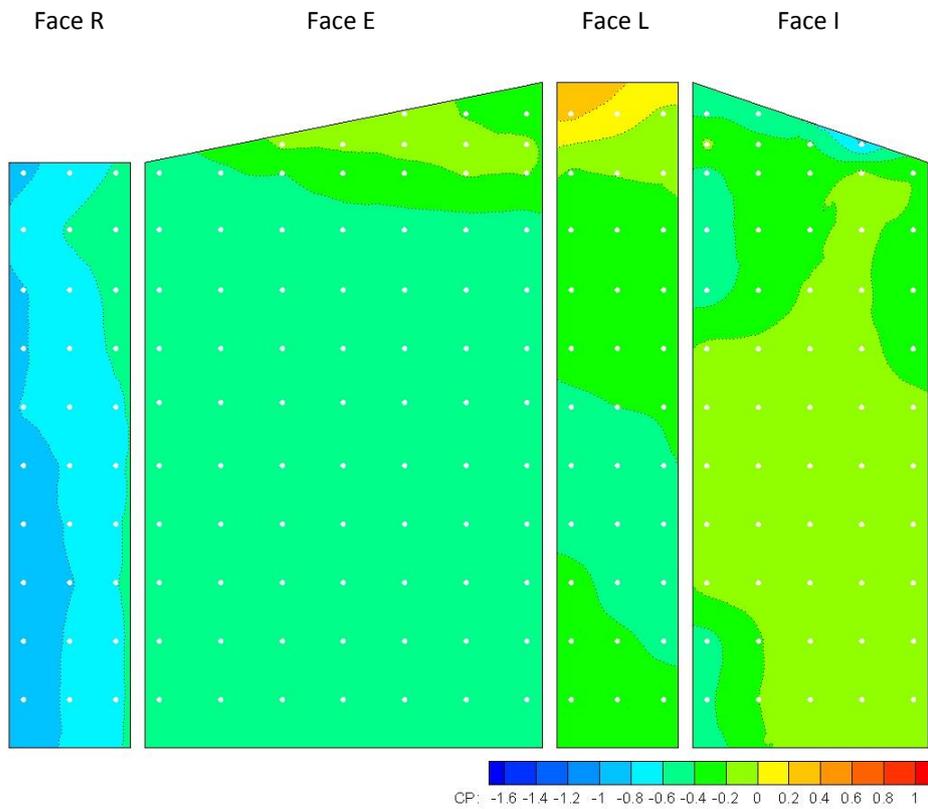
**Figura 15** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R7



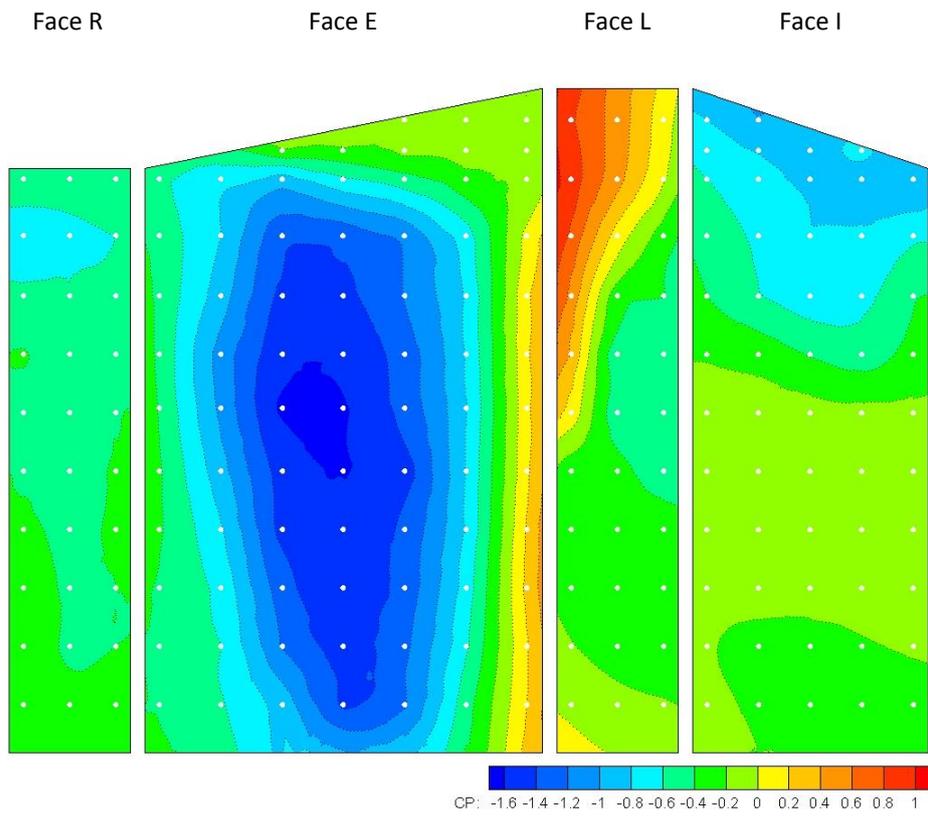
**Figura 16** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre B, para rumo R8



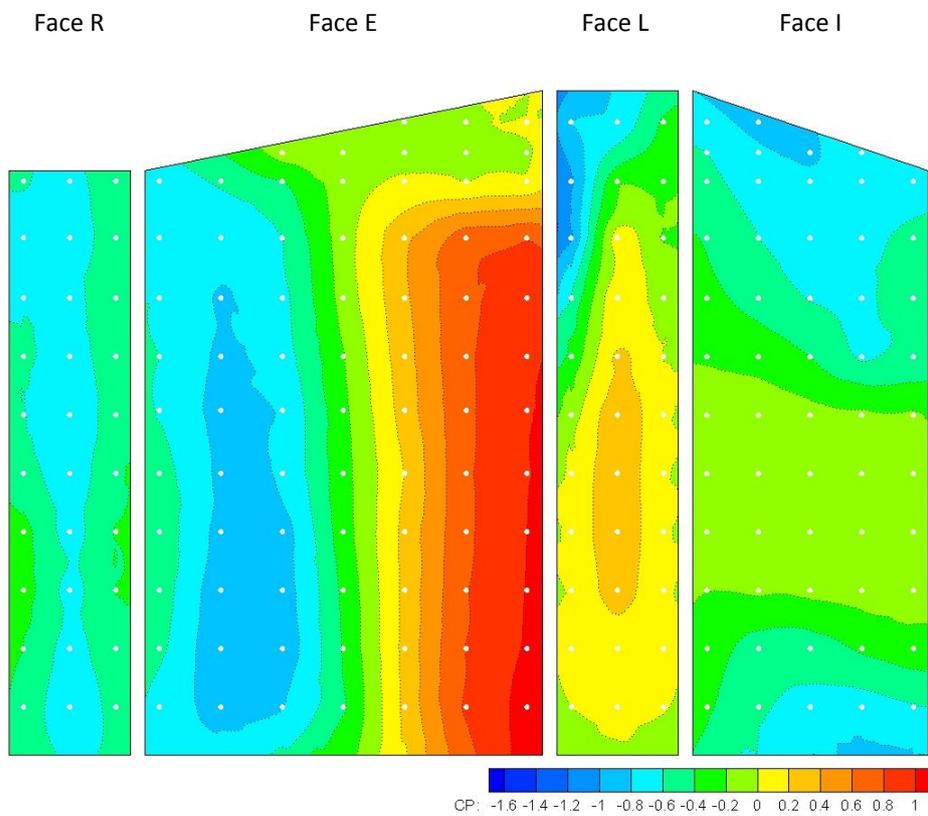
**Figura 17** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R1



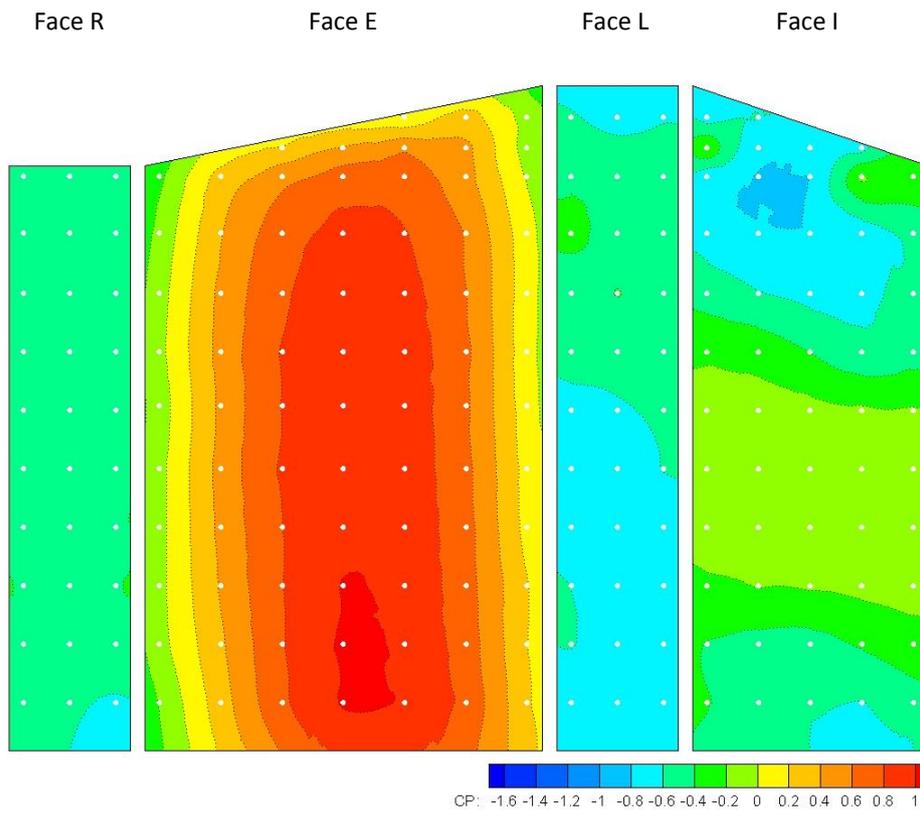
**Figura 18** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R2



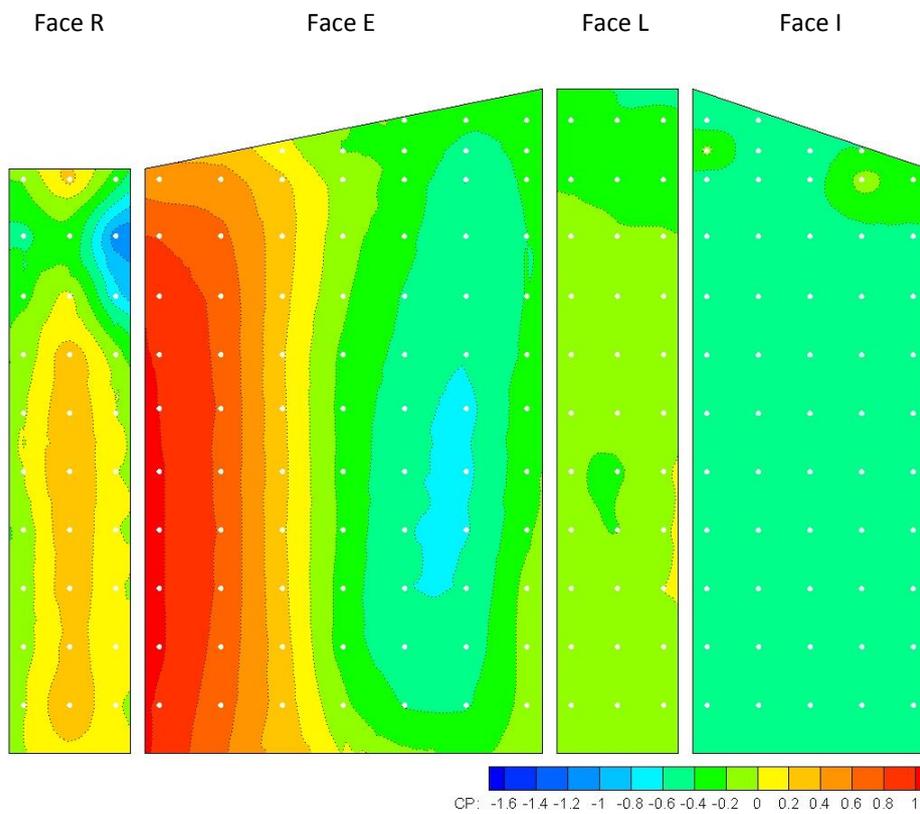
**Figura 19** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R3



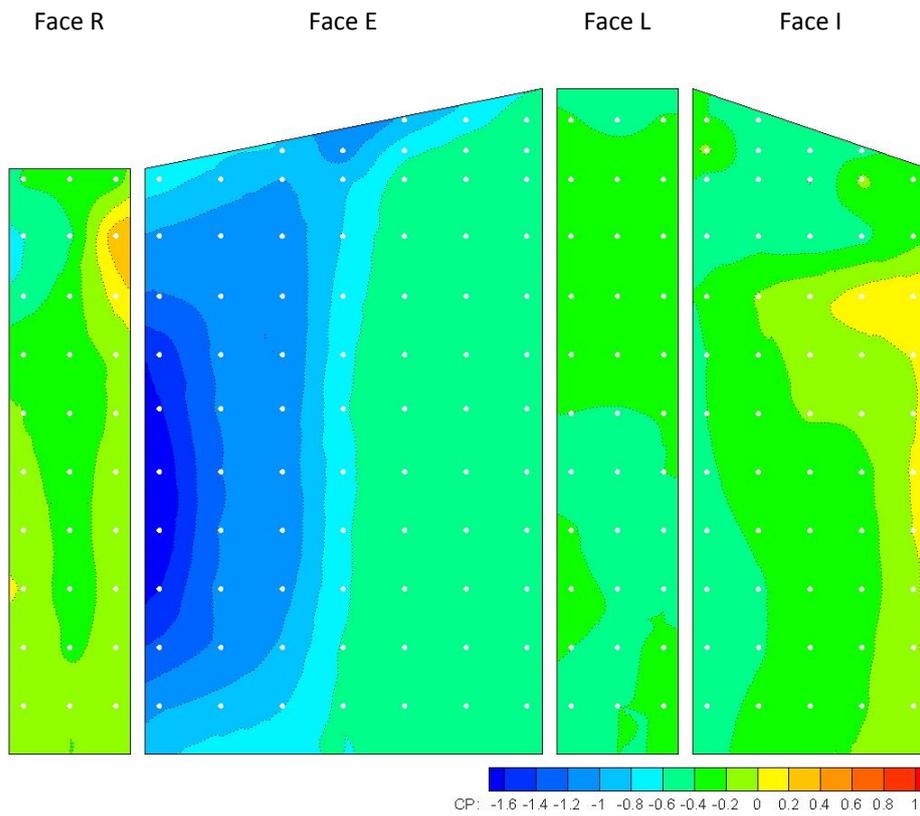
**Figura 20** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R4



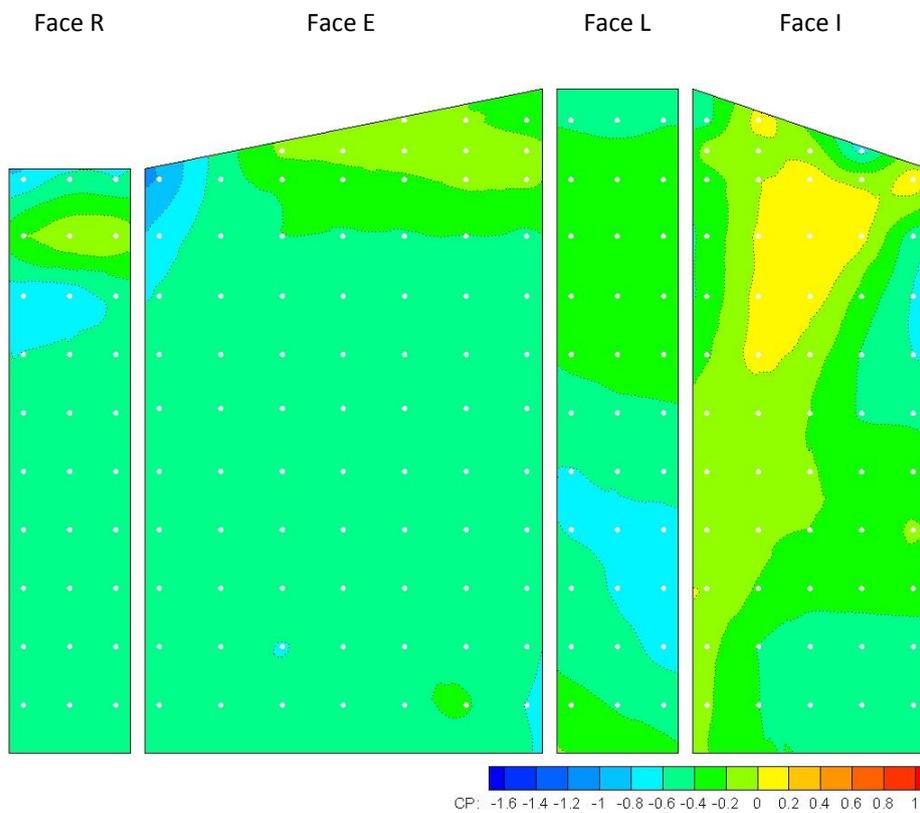
**Figura 21-** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R5



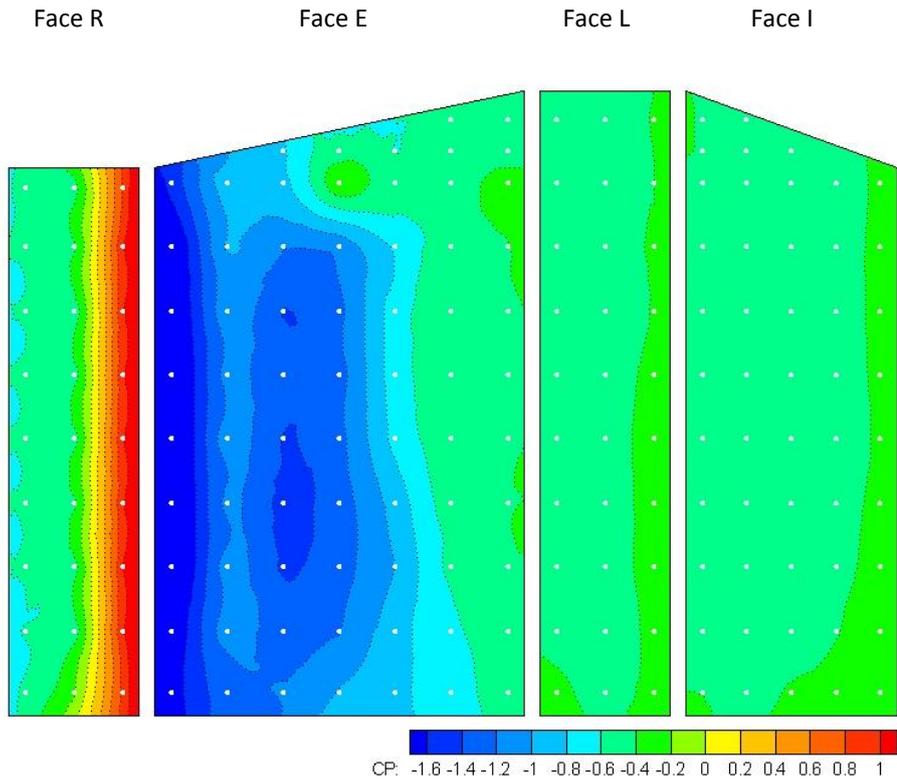
**Figura 22 -** Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R6



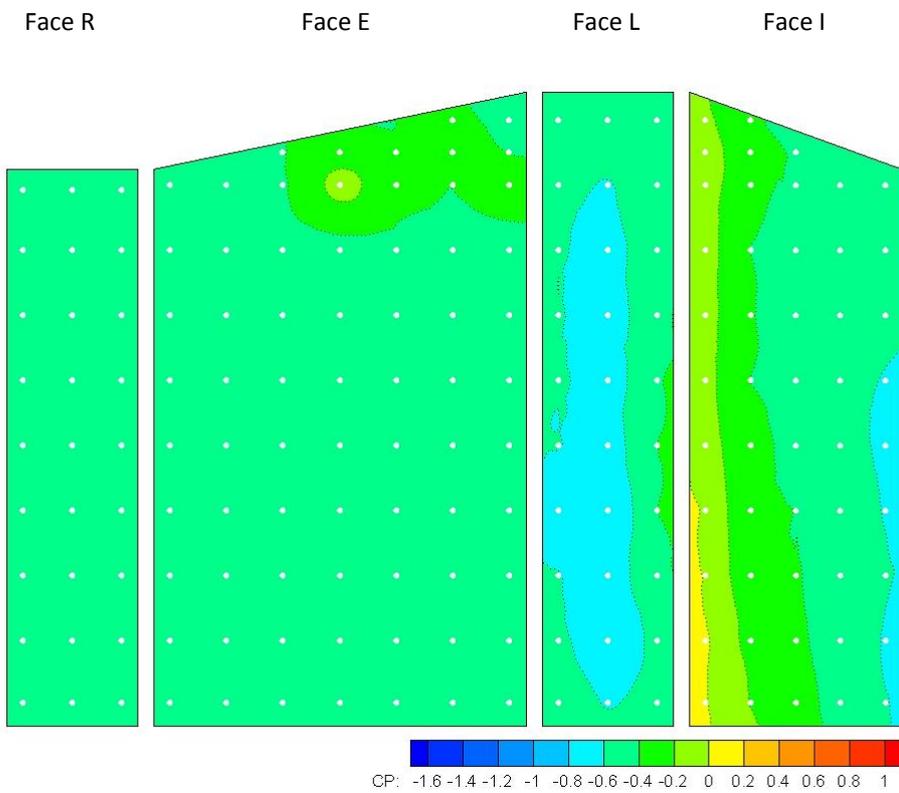
**Figura 23** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R7



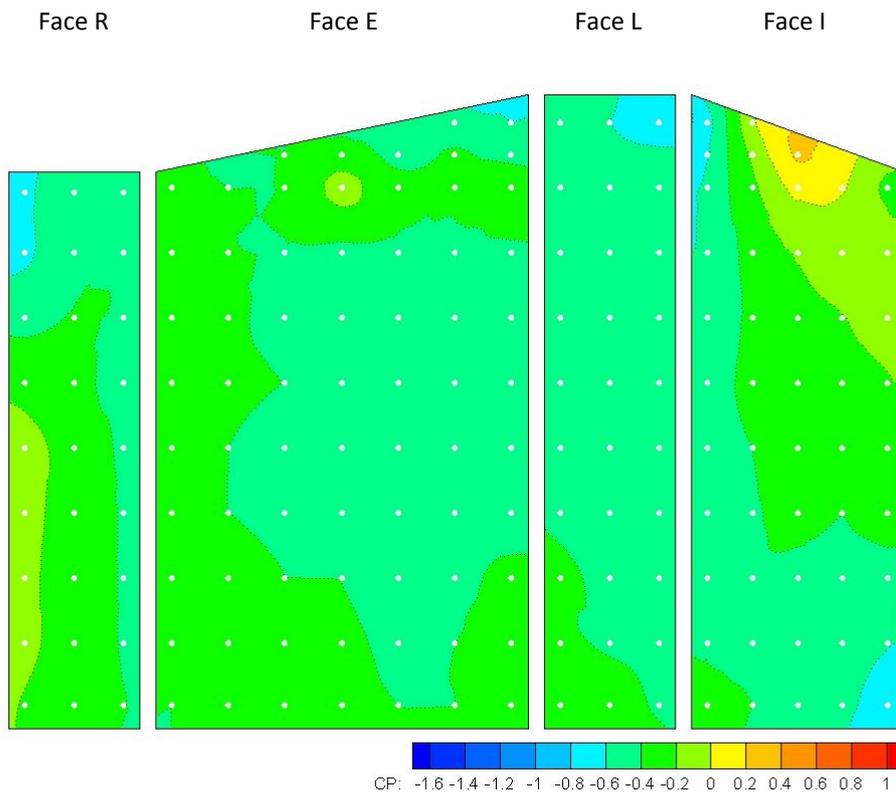
**Figura 24** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre C, para rumo R8



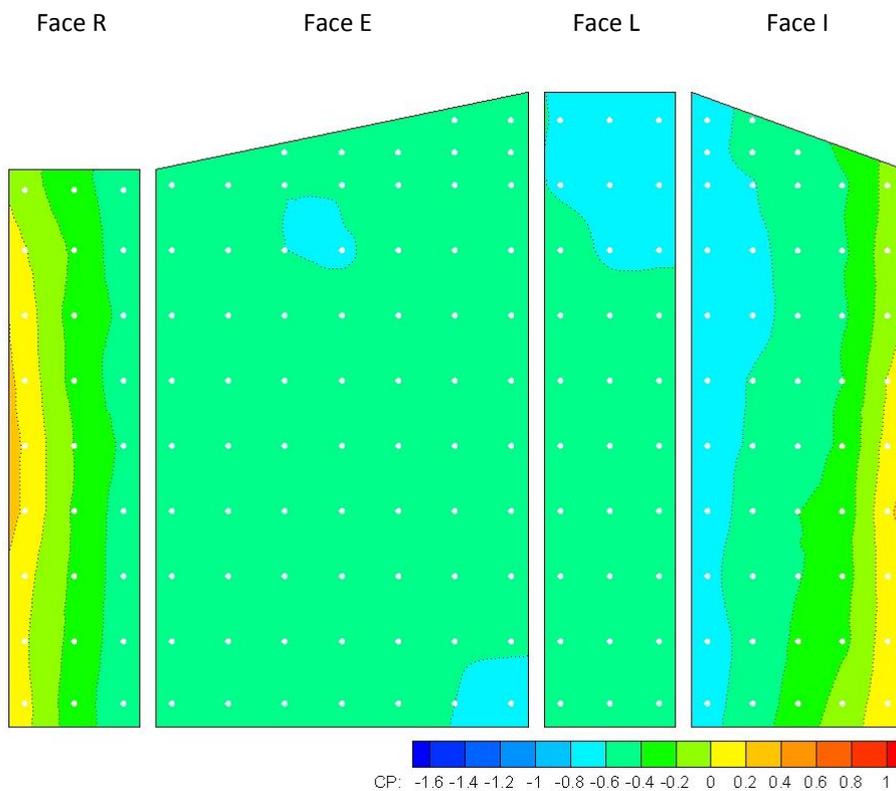
**Figura 25** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R1



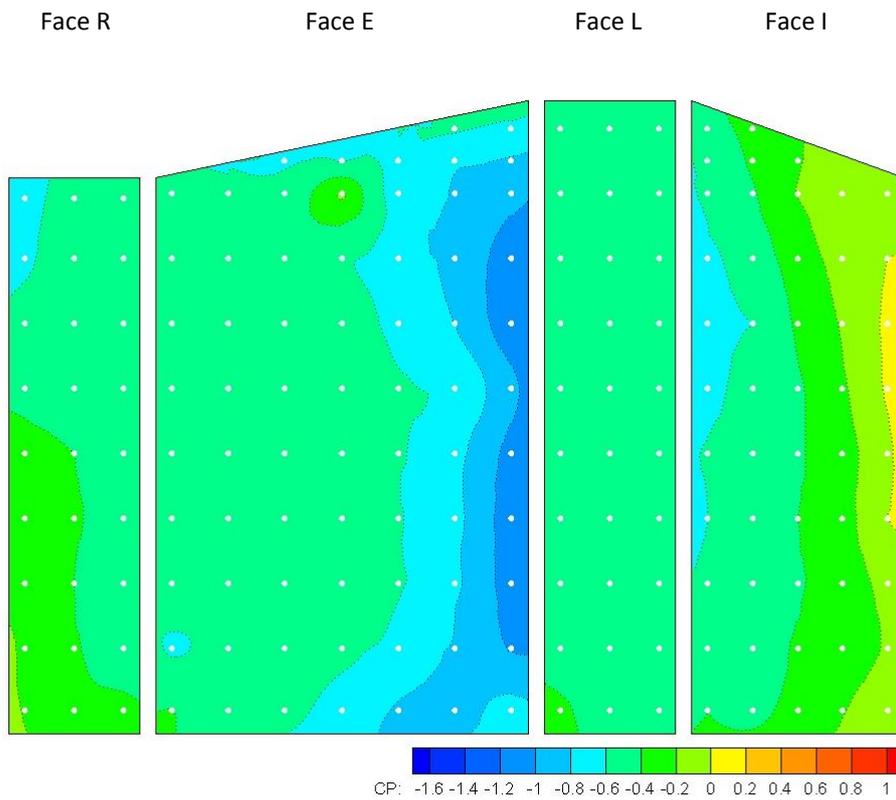
**Figura 26** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R2



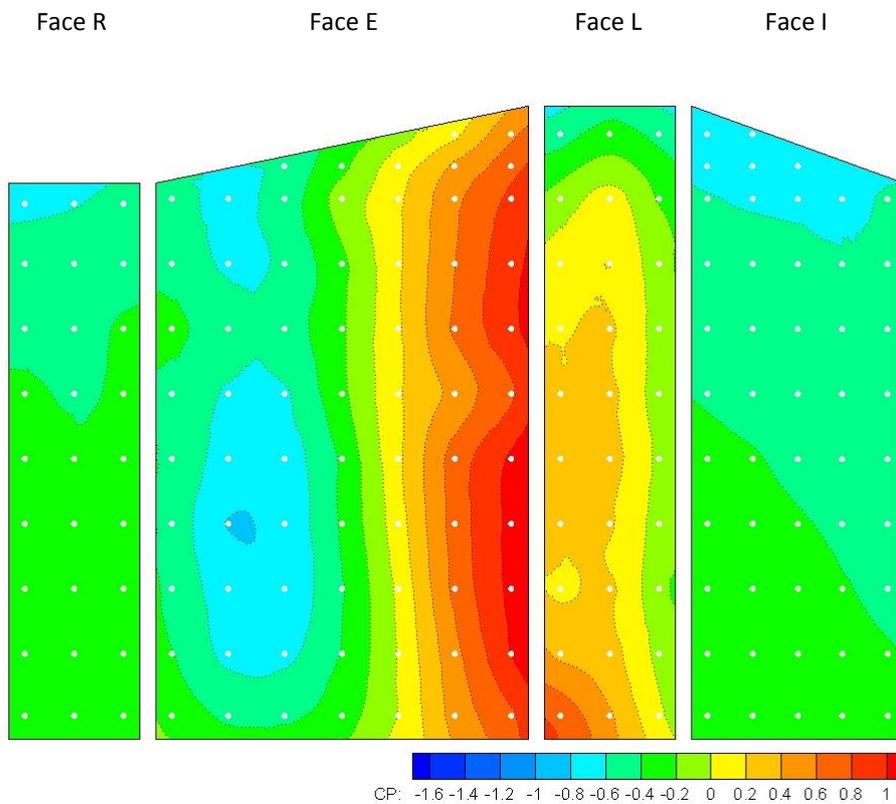
**Figura 27** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R3



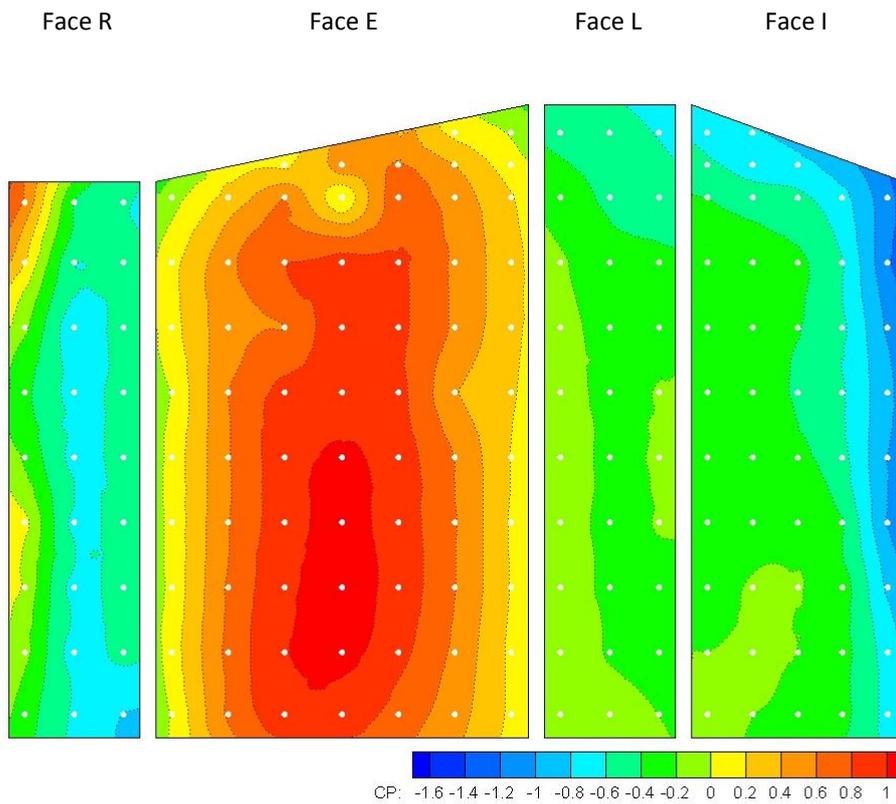
**Figura 28** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R4



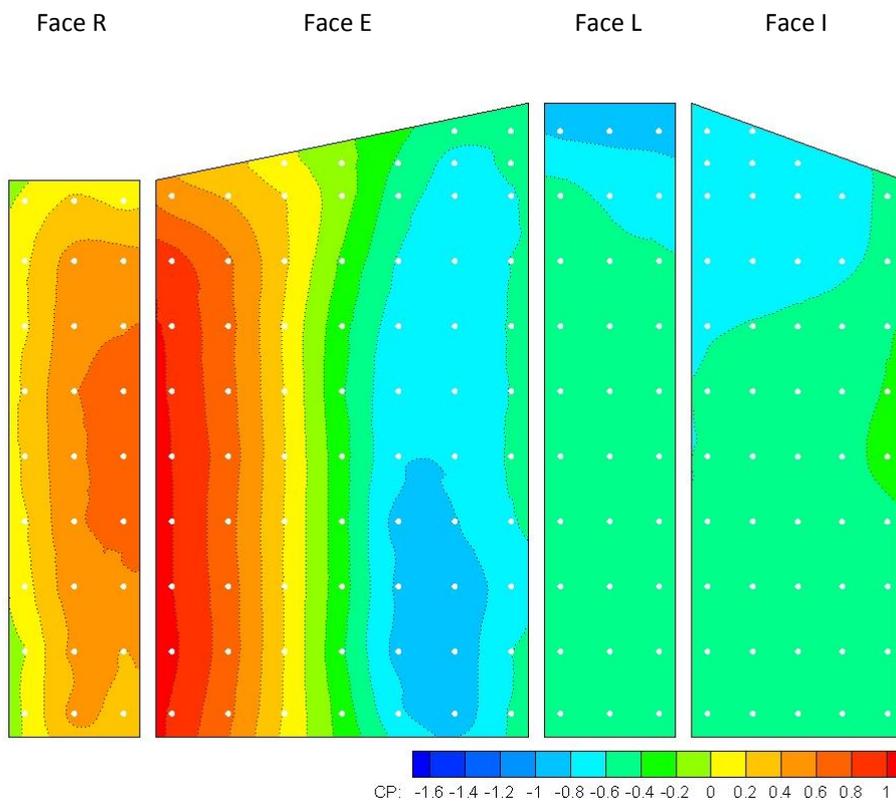
**Figura 29** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R5



**Figura 30** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R6



**Figura 31** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R7



**Figura 32** - Isolinhas do coeficiente de pressão nas faces planificadas da torre D, para rumo R8

## Anexo IV

Representação Tridimensional das isolinhas de pressão

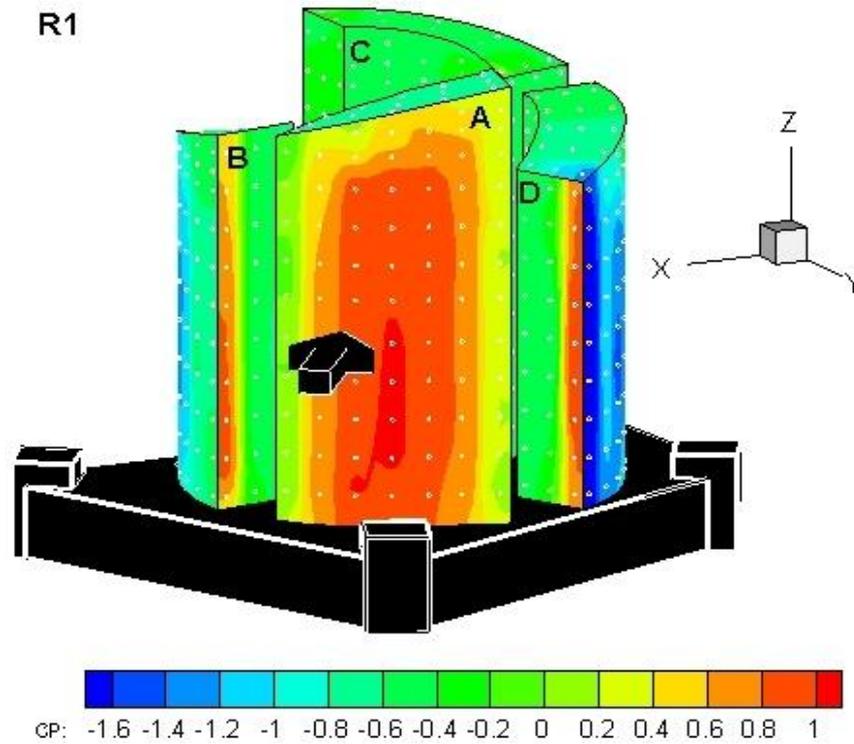


Figura 1 - Isolinhas do coeficiente para rumo R1

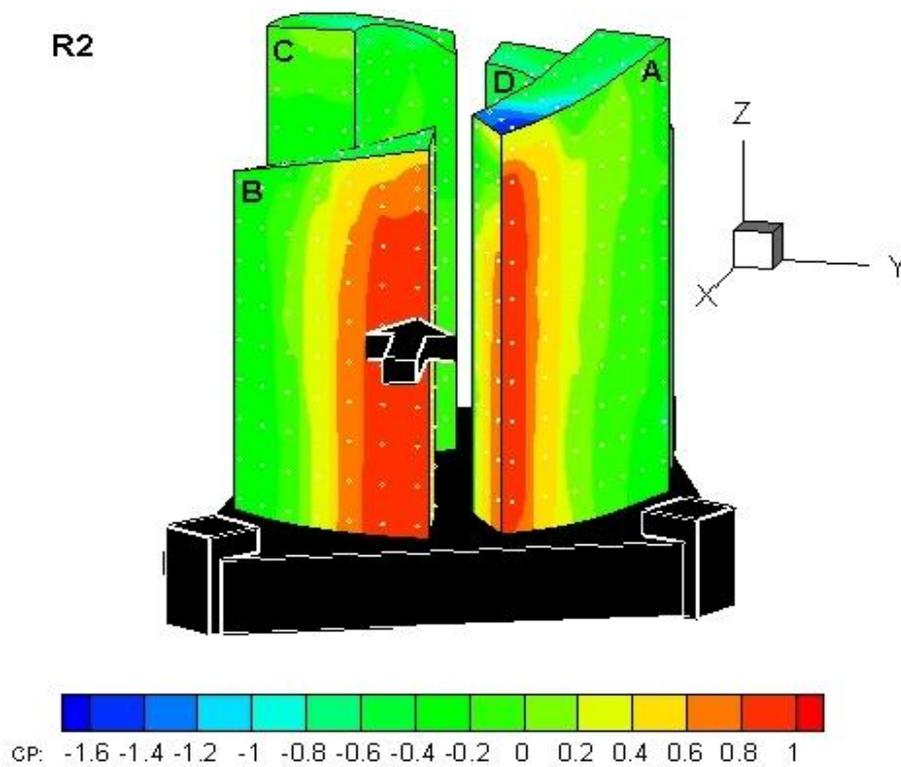


Figura 2 - Isolinhas do coeficiente para rumo R2

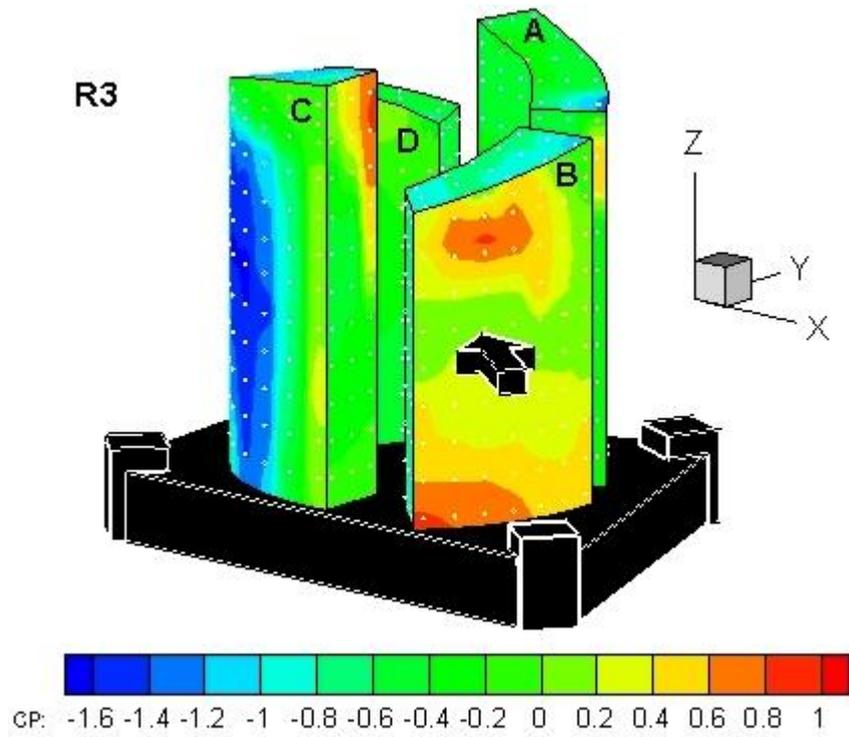


Figura 3 - Isolinas do coeficiente para rumo R3

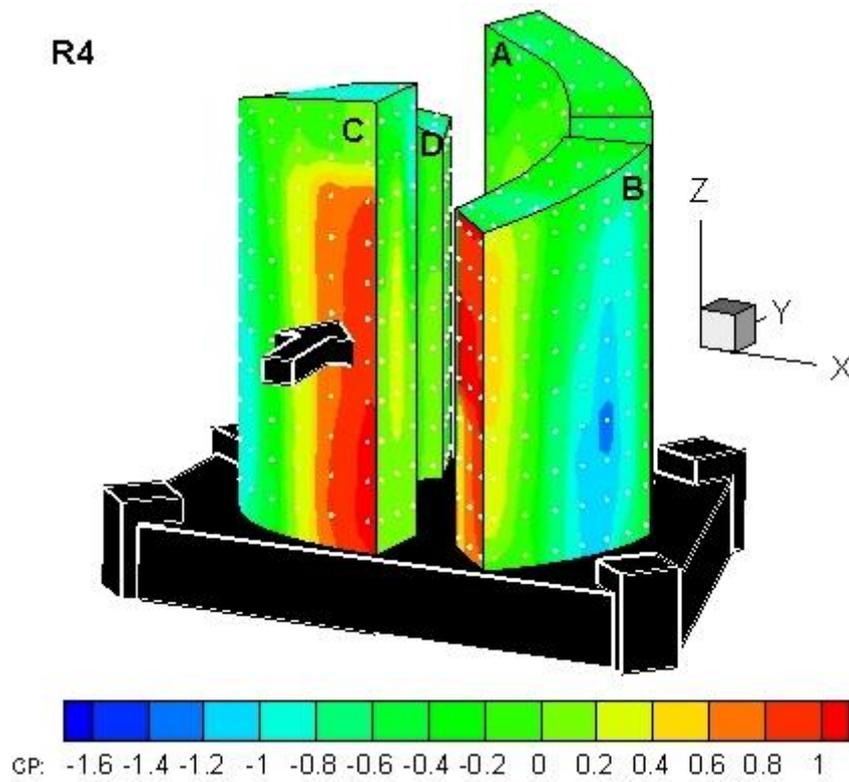
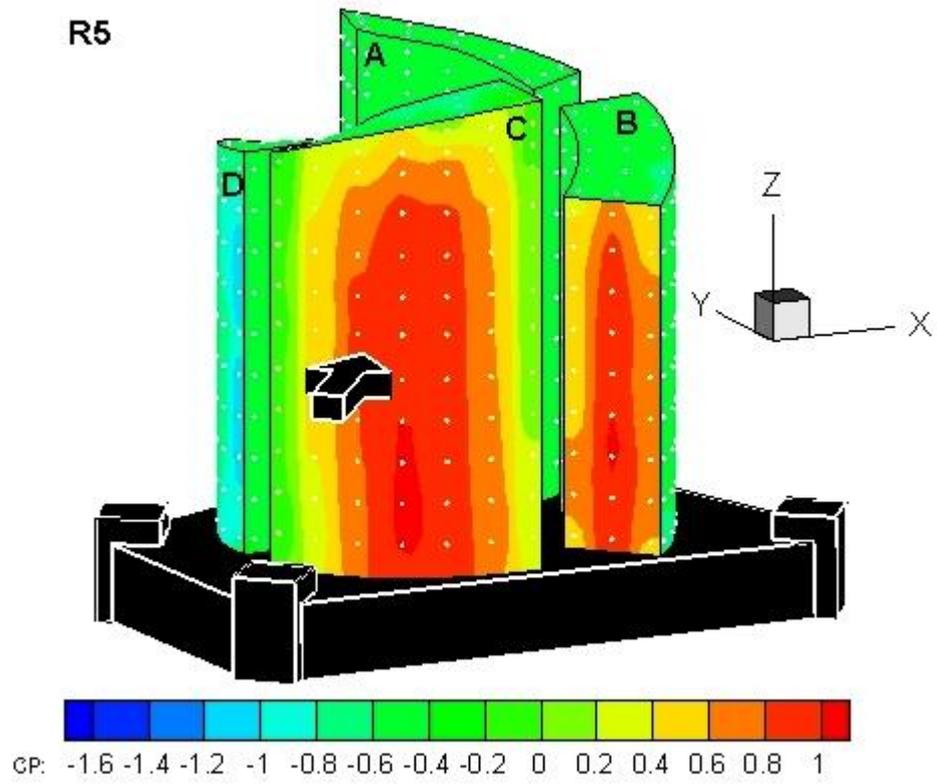
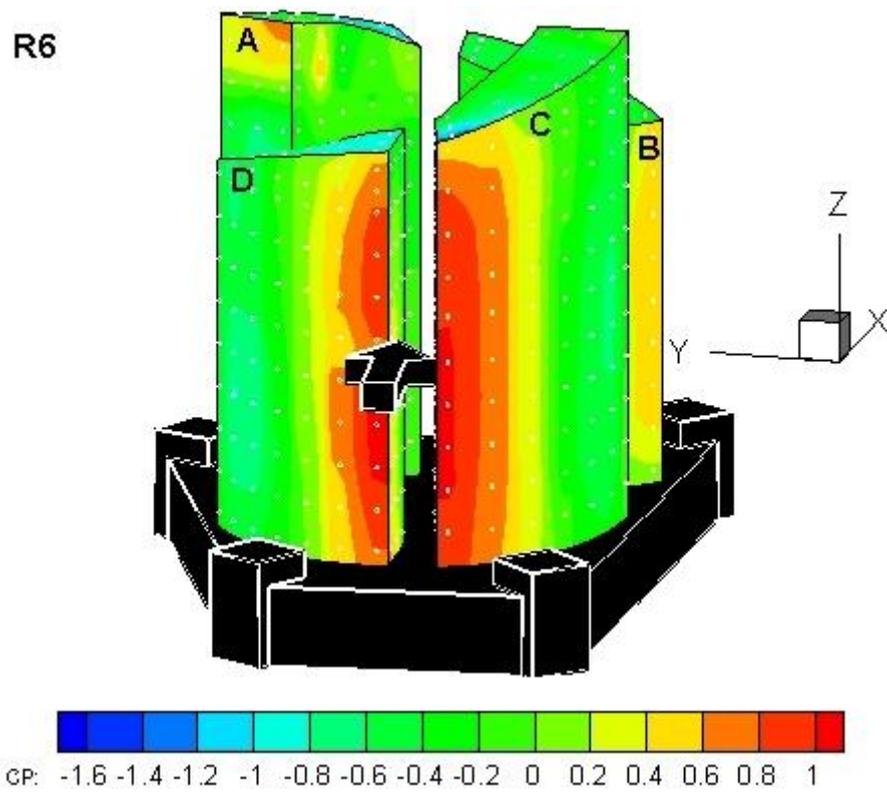


Figura 4 - Isolinas do coeficiente para rumo R4



**Figura 5-** Isolinas do coeficiente para rumo R5



**Figura 6 -** Isolinas do coeficiente para rumo R6

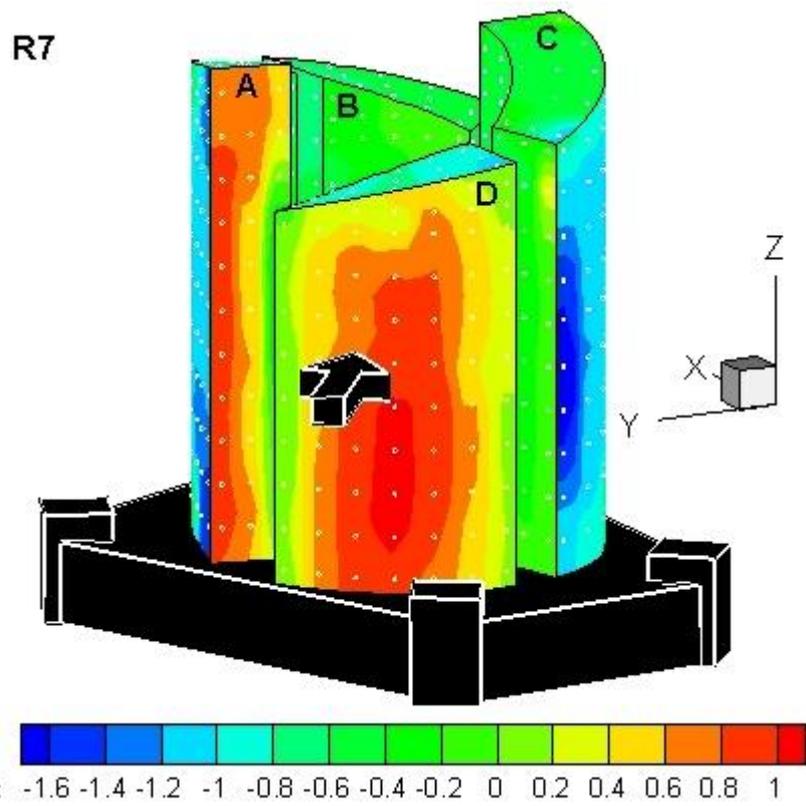


Figura 7 - Isolinhas do coeficiente para rumo R7

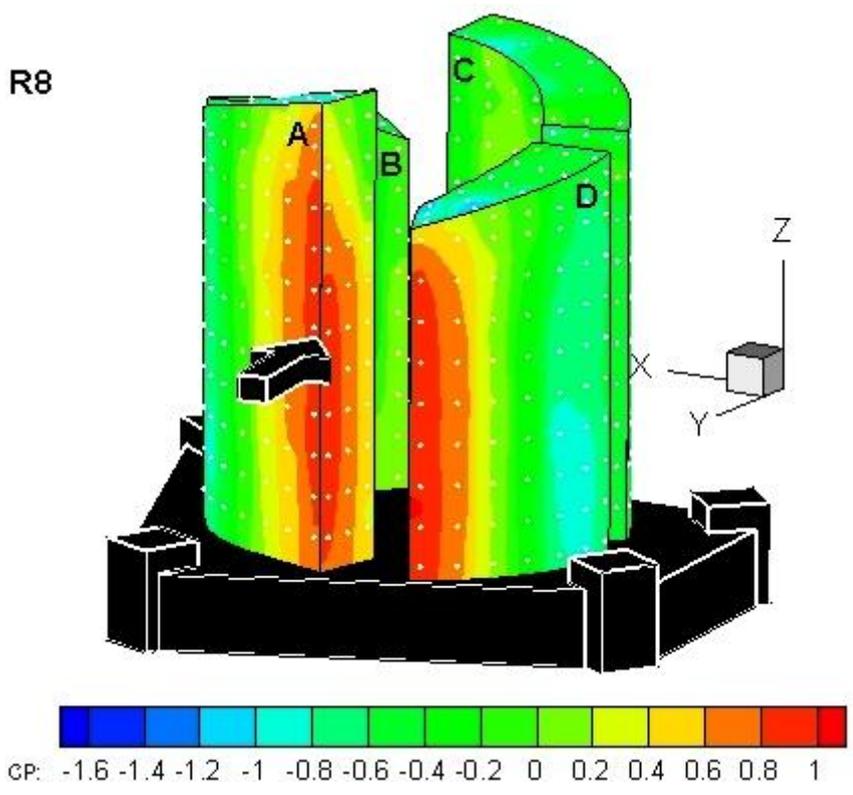


Figura 8 - Isolinhas do coeficiente para rumo R8

## Anexo V

|   |    | R3     |        |       |        | R4     |       |       |        |
|---|----|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
|   |    | FN     | Mx     | My    | Mz     | FN     | Mx    | My    | Mz     |
| A | AE | -37,13 | 12,47  | 8,56  | 14,27  | -18,77 | 6,89  | 3,92  | 8,11   |
|   | AI | -7,17  | -3,73  | -1,89 | -3,27  | -3,87  | -1,40 | -1,63 | -0,36  |
|   | AL | -6,53  | 0,74   | -3,00 | 5,71   | -6,99  | 0,74  | -3,03 | 6,12   |
|   | AR | -4,51  | -1,52  | 0,95  | -5,15  | -7,09  | -2,44 | 1,53  | -8,22  |
| B | BE | 11,73  | 1,42   | -3,44 | 7,18   | -17,72 | -0,88 | 5,94  | -9,19  |
|   | BI | -4,99  | 1,82   | -3,91 | 8,31   | -4,11  | 1,05  | -2,74 | 2,56   |
|   | BL | -10,35 | 2,23   | -0,16 | 5,44   | -6,92  | 2,70  | -0,41 | 7,85   |
|   | BR | -10,35 | -2,52  | -1,44 | -6,62  | 12,07  | 3,20  | 3,07  | 7,37   |
| C | CE | -41,42 | -14,10 | -8,69 | -14,89 | -4,77  | -0,88 | -5,75 | 3,81   |
|   | CI | -10,12 | 5,09   | 2,18  | 4,50   | -11,51 | 4,89  | 2,14  | 5,04   |
|   | CL | -1,36  | -0,01  | -0,31 | -0,01  | -1,50  | 0,04  | 1,61  | -0,27  |
|   | CR | -6,45  | 2,73   | -0,73 | 3,19   | -7,92  | 3,16  | -0,85 | 3,92   |
| D | DE | -14,31 | 2,29   | -4,35 | 9,51   | -17,33 | 2,92  | -5,18 | 11,61  |
|   | DI | -7,02  | -0,72  | 1,89  | -4,55  | -8,45  | -1,13 | 3,05  | -5,10  |
|   | DL | -6,17  | -2,58  | 0,15  | -2,68  | -6,84  | -2,84 | 0,16  | -2,97  |
|   | DR | -4,16  | 0,66   | 1,44  | -1,63  | -2,63  | 0,38  | 0,83  | -1,14  |
|   |    | R7     |        |       |        | R8     |       |       |        |
|   |    | FN     | Mx     | My    | Mz     | FN     | Mx    | My    | Mz     |
| A | AE | -38,88 | 14,72  | 7,43  | 17,79  | -0,24  | -1,46 | 1,24  | -1,81  |
|   | AI | -14,11 | -6,43  | -3,61 | -6,02  | -18,02 | -7,70 | -4,40 | -7,39  |
|   | AL | 6,60   | -0,78  | 3,17  | -6,01  | 7,51   | -0,65 | 2,65  | -6,69  |
|   | AR | -7,34  | -2,66  | 1,67  | -8,52  | -8,78  | -3,00 | 1,88  | -10,18 |
| B | BE | -14,99 | -1,57  | 5,12  | -8,58  | -17,55 | -1,90 | 5,77  | -10,21 |
|   | BI | -5,67  | 0,52   | -1,64 | 3,41   | -7,11  | 0,70  | -2,47 | 3,99   |
|   | BL | -8,51  | 3,42   | -0,52 | 9,64   | -9,47  | 3,63  | -0,55 | 10,72  |
|   | BR | -5,84  | -1,47  | -1,41 | -3,53  | -7,63  | -1,80 | -1,72 | -4,55  |
| C | CE | -38,34 | -11,63 | -8,05 | -9,02  | -22,09 | -6,31 | -3,22 | -6,73  |
|   | CI | -8,18  | 3,43   | 0,95  | 4,60   | -6,91  | 1,75  | 1,08  | 2,42   |
|   | CL | -6,07  | 0,07   | 2,64  | -0,76  | -7,03  | 0,07  | 2,90  | -0,87  |
|   | CR | -2,88  | 1,25   | -0,34 | 1,47   | -7,03  | 2,67  | -0,71 | 3,49   |
| D | DE | 20,69  | -3,30  | 5,87  | -14,24 | -4,84  | -1,21 | -2,75 | 0,54   |
|   | DI | -9,39  | -2,13  | 3,07  | -6,84  | -11,12 | -1,82 | 3,72  | -7,34  |
|   | DL | -3,38  | -1,59  | 0,09  | -1,49  | -7,15  | -3,03 | 0,17  | -3,11  |
|   | DR | -5,03  | 0,65   | 1,41  | -2,05  | 4,54   | -0,65 | -1,41 | 1,83   |

**Tabela 1** - Forças e momentos resultantes para os rumos R3, R4, R7 e R8