



Comportamento aerodinâmico de estrutura em casca fina de betão

Margarida Maria Marques Teixeira

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Prof^a Maria da Glória de Almeida Gomes

Prof. Fernando Vitor Marques da Silva

Júri

Presidente: Professor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Orientador: Professora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Professor Pedro António Martins Mendes

Outubro 2016

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho, que estabelece o culminar de uma grande etapa da minha vida não teria sido possível sem a ajuda e orientação de algumas pessoas às quais dedico esta secção.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professora Maria da Glória Gomes e Professor Fernando Marques da Silva pela atenção, acompanhamento e dedicação que demonstraram ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Eduardo Júlio pelo desafio lançado de elaborar este estudo, que me suscitou tanto interesse desde o início.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela oportunidade única que me concedeu, de realizar toda a atividade experimental no laboratório com todas as condições e apoio necessário.

Ao Manel, meu namorado e maior amigo, por me ter ajudado desde o primeiro dia, com uma atitude positiva e motivadora, por estar sempre pronto e disponível para me ajudar. Sem este apoio nada disto teria sido possível (pelo menos desta forma!).

À melhor família do Mundo, pais e irmãs, que sempre me apoiaram incondicionalmente, e me motivaram nesta etapa da minha vida!

Aos meus amigos, que me acompanharam de perto neste percurso, um especial obrigado pela motivação e carinho.

A todos, muito obrigada.

RESUMO

As estruturas em casca de formas livres ultrafinas são caracterizadas por terem capacidade portante decorrente da sua própria forma. Estas estruturas em casca, ao serem construídas em betão de ultra-elevado desempenho, podem ter espessuras extremamente finas que lhes conferem uma imagem de esbelteza e beleza bastante apreciada. A complexidade das formas arquitetónicas destas estruturas em casca exige uma descrição mais exata da ação do vento e da sua interação com estas estruturas.

No presente trabalho analisa-se o comportamento aerodinâmico de cascas finas pré-fabricadas em betão de ultra-elevado desempenho, com uma forma triangular. O objetivo é avaliar a interação entre a casca e o vento para diferentes ângulos de incidência do vento bem como a influência de fachadas incorporadas no modelo. Para isso, foi realizada uma campanha de ensaios experimentais em túnel de vento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), caracterizada por um perfil de velocidade do vento uniforme, a 20 m/s, em que se determinam os coeficientes de pressão internos e externos na superfície de um modelo de casca com três apoios para diferentes ângulos de incidência do vento. Foram ensaiadas três configurações distintas do modelo: i) sem fachadas, ii) com uma fachada e iii) com duas fachadas. Os resultados do ensaio são apresentados sob a forma de curvas isobáricas representativas de valores de coeficientes de pressão resultantes.

Verificou-se que a situação analisada que produz sucções mais acentuadas, e generalizadas a toda a superfície da casca é o caso do modelo com duas fachadas quando o vento incide segundo um ângulo de 180°. A influência das fachadas nos resultados é mais notória para os casos com uma e duas fachadas quando o vento incide segundo a direção 60°, e para o caso com uma fachada segundo 300°. Já o caso em que menos se fazem sentir as fachadas diz respeito à direção do vento 0°.

Palavras-Chave: Estruturas em Casca; Modelo reduzido; Túnel de vento; Coeficientes de pressão; Forma livre

ABSTRACT

The free form shell structures, very thin, are known for its slenderness and load bearing capacity due to its own form. These shell structures, built in ultra-high performance concrete, can have extremely thin thickness which gives them an image of slenderness and beauty. The complexity of the architectural forms of these shell structures requires a more accurate description of the wind action and interaction with these structures.

This paper presents study on the aerodynamic behaviour of prefabricated thin shells in ultra-high performance concrete, with triangular shape. The goal is to evaluate the interaction between the shell and the wind for different wind angles and the influence of the number of facades incorporated in the model. In order to determinate the internal and external wind pressure coefficients on the shell surface, experimental tests on a scale model were performed in a wind tunnel of the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), characterized by a uniform wind speed profile, 20 m/s. There were analysed three different model configurations: i) without facades, ii) with one facade and iii) with two facades. The experiment results are presented in the form of isobaric curves which represent values of resulting pressure coefficients for different wind incidence angles and model configuration.

From the results it was possible to conclude that the configuration with two facades, for an incidence angle of 180° , leads to the greater suctions situation and generalized to the entire shell surface. The facades have greater influence on results for model configurations with one or two facades an incidence angle of 60° , and for model configuration with one face and 300° . For incidence angle of 0° the facades have almost no influence.

Key-Words: Shell structure; Scale Model; Wind tunnel; Pressure coefficients; Free form

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento e fundamentação	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Estrutura do trabalho	2
2.	Estruturas em casca fina de betão	5
2.1.	Estruturas em casca	5
2.2.	Evolução histórica das estruturas em casca de betão	6
2.2.1.	Percursos das estruturas em cascas	6
2.2.2.	Atualidade das estruturas em casca (1970-2016).....	9
2.2.3.	O futuro das cascas finas	10
2.3.	Processos de geração da forma de estruturas em casca	11
2.3.1.	Processo geométrico	11
2.3.2.	Processo não geométrico	12
2.3.3.	Classificação de formas de estruturas em cascas	15
2.4.	Regulamentação aplicada a estruturas em casca	17
3.	Ação do vento sobre estruturas em casca	19
3.1.	Enquadramento geral	19
3.2.	Conceitos base da aerodinâmica	19
3.2.1.	Regimes de escoamento	19
3.2.2.	Parâmetros adimensionais	21
3.2.3.	Conceitos de camada limite e de vórtice	23
3.3.	Caracterização do vento atmosférico	24
3.3.1.	Camada limite atmosférica	24
3.3.2.	Velocidade média-horária do vento	26
3.4.	Interação vento-estrutura	28
3.4.1.	Escoamento do vento em torno de corpos rombos.....	28
3.4.2.	Equação de Bernoulli. Coeficientes de pressão.....	32
3.4.3.	Efeitos da interação vento-estrutura.....	33

3.5.	Estudos realizados sobre a ação do vento em estruturas em cascas	35
4.	Método Experimental	37
4.1.	Considerações gerais	37
4.2.	Descrição do modelo	37
4.2.1.	Hipóteses e opções de projeto. Processo de produção do modelo	37
4.2.2.	Caracterização do modelo	38
4.3.	Descrição da instalação experimental	42
4.3.1.	Túnel de vento em circuito fechado (LNEC)	42
4.3.2.	Equipamento de medição e registo	43
4.4.	Metodologia de ensaios	47
4.4.1.	Plano de ensaios	47
4.4.2.	Distribuição espacial das tomadas de pressão e direções ensaiadas	49
4.4.3.	Condições experimentais	53
4.5.	Determinação dos coeficientes de pressão	55
4.6.	Erros experimentais	56
5.	Análise de resultados	59
5.1.	Considerações gerais	59
5.2.	Análise comparativa entre modelos	60
5.2.1.	Ângulo de incidência 0°	62
5.2.2.	Ângulo de incidência 60°	64
5.2.3.	Ângulo de incidência 120°	67
5.2.4.	Ângulo de incidência 180°	68
5.2.5.	Ângulo de incidência 240°	70
5.2.6.	Ângulo de incidência 300°	72
6.	Considerações e desenvolvimentos futuros	75
6.1.	Conclusões	75
6.2.	Desenvolvimentos Futuros	77
	Referência bibliográficas	79
	Sites Consultados	83
	Anexos	85

Anexo I Coordenadas das tomadas de pressão em cada fase de ensaios.....	85
Anexo II Correspondência entre os valores da zona Z1 (zona ensaiada) e os valores das restantes zonas (zonas não ensaiadas).....	89
Anexo III Procedimento experimental	90
Anexo IV Peça desenhada do túnel de vento de circuito fechado (LNEC).....	92
Referência bibliográficas dos anexos.....	93

Índice de Tabelas

Tabela 4-1- Plano de ensaios da 1ª, 2ª e 3ª fase da campanha experimental.....	49
Tabela 5-1- Comparação entre alguns método de interpolação, adaptado de (Landim, 2000)	60
Tabela II-1 Correspondência entre os valores da zona ensaiada e das zonas não ensaiadas	89

Índice de Figuras

Figura 2-1- a) Panteão de Roma (125) e b) Basílica de Santa Sofia (537) em Istambul (w1)	6
Figura 2-2- a) Zeiss Planetarium (1926) por Dischinger, Finsterwalder and Bauersfeld, b) Frankfurt market hall (1928) por Dyckerhoff & Widmann AG, c) Algeciras market (1934) por Eduardo Torroja (w1) e d) Zurich exposition hall (1939) por Robert Maillart (w2)	7
Figura 2-3- a) Centro Nacional de Congressos, Brasília (1960) (w3) e b) Museu Nacional, Brasília (1960) (w4), ambos por Óscar Niemeyer	8
Figura 2-4- a) Restaurante Manantiales (1957) em Xochimilco, Mexico, por Félix Candela (w1) e b) representação do teste à integridade estrutural da estrutura de casca fina (1950s), México, por Félix Candela (w5)	8
Figura 2-5- Estação de serviço em Deitingen (1968) por Heinz Isler (w1)	9
Figura 2-6- Opera de Sydney (1973), por Ove Arup (Engenheiro) (w1)	9
Figura 2-7- a) L'Oceanografic (2002), Valencia, por Lázaro, Domingo Cabo e Candela (w1) e b) Opera de Tenerife (2003) por Calatrava (w3)	10
Figura 2-8- Desenhos do projeto da Opera House no Dubai, por Zaha Hadid (w6)	10
Figura 2-9- Superfície regrada do tipo conoide (w3).....	12
Figura 2-10 - Formas de cascas sugeridas por Isler no seu artigo "New Shapes for Shells", IASS (Isler, 1960) por (Chilton, 2012)	13
Figura 2-11- Desenhos esquemáticos de uma forma livre de casca apoiada em quatro pontos (w7) .	14
Figura 2-12- a) e b) Testes em modelos físicos do método da membrana suspensa, Isler (1994) (w8)	15
Figura 2-13- Estruturas reais em casca, inspiradas no método da membrana suspensa: a) Área de serviço de Deitingen, Isler (1965) e b) Empresa Kilcher em Recherwil, Isler (1968) (w3)	15
Figura 2-14- Anagrama da classificação proposta pela Indian Standar Criteria for the Design of Reinforced Concrete Shells and Folded Plates (Ramaswamy, 1984, citado por Cardoso, 2008)	16
Figura 3-1 Tubo de Pitot-estático (Cook N. , 1985)	21
Figura 3-2- Variação das tensões de Reynolds na CLA (Cook N. , 1985),	25
Figura 3-3- Registo de velocidades em altura e ao longo do tempo na CLA. (Davenport et al, 1980) por (Gomes, 2003)	26
Figura 3-4- Perfil vertical de velocidade do vento. Comprimento da rugosidade (Z0) (w9).....	27
Figura 3-5- Influência da rugosidade do terreno nos perfis do tipo potência de velocidade média (Davenport, 1962).....	28

Figura 3-6- Fluxo médio em redor de cilindro circular com camada limite laminar (FS – ponto de estagnação frontal; RS – ponto de estagnação a retaguarda; SP – ponto de separação do escoamento) (Cook N. , 1985)	29
Figura 3-7- Escoamento em torno de um cilindro circular. (a) $30 < Re < 5000$; (b) $5000 < Re < 200000$; (c) $Re > 200000$, (adaptado de Simiu & Scanlan (1996))	30
Figura 3-8- Sequência “Vortex shedding” (Cook N. , 1985).....	31
Figura 3-9- Circulação em torno de uma fachada em condições de: a) Perfil incidente de vento uniforme e b) Perfil incidente do tipo CLA (RS – Ponto de estagnação; GS – Ponto de separação no solo,) adaptado de (Cook N. , 1985)	34
Figura 3-10- Circulação sobre uma cobertura plana em condições de: a) Perfil incidente de vento uniforme e b) Perfil incidente do tipo CLA (RS – Ponto de estagnação; SP – Ponto de separação) adaptado de (Cook N. , 1985)	34
Figura 3-11- Circulação na esteira de um obstáculo (RS – Ponto de estagnação na esteira (Cook N. , 1985).....	35
Figura 4-1- Preparação do modelo tridimensional para impressão 3D: sub-divisão do modelo em 12 peças. Adaptado de (Tomé et al., 2014).....	38
Figura 4-2 – Modelo reduzido da casca e respetivas dimensões: a) vista em planta e b) alçado	39
Figura 4-3- Casca triangular de forma livre sob ação de luz natural (Tome, Vizotto, & Julio, 2014)....	39
Figura 4-4- Imagem do modelo reduzido – a) planta, b) segundo uma abertura, c) segundo um apoio.	40
Figura 4-5- Imagem da fachada 1, fachada presente e ensaiada nas fases de ensaio 2 e 3	40
Figura 4-6- Pormenor da pala formada pela colocação da fachada de forma reentrante em relação à casca	41
Figura 4-7- a) Pormenor da ligação aparafusada e b) pormenor da vedação nas ligações entre a superfície da casca e as fachadas (caso relativo à fachada colocada “à face”, sem formação de pala)	41
Figura 4-8- Combinações possíveis com a casca-módulo em ambiente AutoCAD, (Tome, Vizotto, & Julio, 2014)	42
Figura 4-9- Pormenor das janelas laterais existentes no túnel de vento fechado do LNEC	43
Figura 4-10 Interior do túnel de vento de circuito fechado (LNEC) em que é visível o tubo de Pitot-Prandtl	44
Figura 4-11 a) Micromanómetro tipo Betz pertencente ao LNEC e b) pormenor do ecrã com visualização do valor momentâneo de pressão dinâmica no decorrer de um ensaio	44
Figura 4-12- Termómetros exterior (à esquerda) e interior (à direita) ao túnel de vento, pertencentes ao LNEC	45

Figura 4-13 Instrumentos: a) Sistemas transdutores de pressão com ligação aos tubos de silicone, b) Sistema de aquisição de dados, c) Painel de controlo das pás do túnel de vento (LNEC).	46
Figura 4-14- Esquemas ilustrativos das ligações entre Tubo de Pitot, micromanómetro e psis.	46
Figura 4-15 – Layout do programa utilizado para monitorização e registo de dados: a) configurações do programa e b) obtenção de dados/ visualização instantânea dos valores de pressão em cada canal	47
Figura 4-16- Esquema ilustrativo dos três casos estudados. Caso 0F – modelo sem fachadas; Caso 1F – modelo com uma fachada; Caso 2F – modelo com duas fachadas	48
Figura 4-17 Casca triangular de forma livre. Esquema ilustrativo de apoios, bordos e alinhamentos do modelo em planta.	48
Figura 4-18- Tomadas de pressão ensaiadas (119), colocadas na zona Z1 da superfície da casca, caso 0F	50
Figura 4-19- Distribuição das tomadas de pressão na superfície de casca: a) 714 pontos e b) 269 pontos após eliminação de excedentes. Caso 0F	50
Figura 4-20- Direções ensaiadas durante a 1ª fase de ensaios	51
Figura 4-21- Tomadas de pressão na superfície da casca para os casos 1F e 2F	52
Figura 4-22- Ângulos de incidência do vento analisados durante a 2ª e 3ª fase de ensaio da campanha experimental	53
Figura 4-23- Tomadas de pressão analisadas na fachada A	53
Figura 4-24- Dimensão da seção de ensaios do túnel de vento com o respetivo modelo de casca posicionada para: Caso 1F e ângulo de incidência do vento de 60º; Caso 2F e angulo de incidência de 60, 180º ou 300º	57
Figura 5-1- Distribuições de coeficientes de pressão para o modelo sem fachadas, incidência do vento 0º segundo os métodos de interpolação: a) Kriging, b) Mínima curvatura e c) Inverso da distância.....	59
Figura 5-2- Esquema ilustrativo dos três casos estudados. Caso 0F – modelo sem fachadas; Caso 1F – modelo com uma fachada; Caso 2F – modelo com duas fachadas	61
Figura 5-3- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0º. Alinhamento 0/180.	62
Figura 5-4- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0º.	63
Figura 5-5- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 60º. Alinhamento 60/240.	64
Figura 5-6- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 60º.	65

Figura 5-7- Distribuições de coeficientes de pressão na fachada A, para ângulo de incidência 60°. ...	65
Figura 5-8- Distribuição de pressões numa fachada vertical frontal, sob influência de um perfil de velocidades uniforme. Adaptado de (Cook N. , 1985)	66
Figura 5-9- Distribuições de coeficientes de pressão na fachada B para ângulo de incidência 60°. ...	66
Figura 5-10- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 120°. Alinhamento 120/300.	67
Figura 5-11- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 120°.	68
Figura 5-12- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 180°. Alinhamento 0/180.	69
Figura 5-13- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 180°.	69
Figura 5-14- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 240°. Alinhamento 60/240.	70
Figura 5-15- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 240°.	71
Figura 5-18- Sequência de imagens correspondentes ao escoamento sob a zona do apoio no caso 1F, para um ângulo de incidência de 240°.	72
Figura 5-16- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 300°. Alinhamento 120/300.	72
Figura 5-17- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 300°.	73
Figura 0-1- Forma do modelo e casca e identificação dos eixos coordenados X, Y, Z.	85
Figura 0-2- Planta do túnel de vento de circuito fechado do LNEC (Borges, 1968, citado em Mendes, 1995).....	92

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E FUNDAMENTAÇÃO

O projeto de estruturas em cascas em betão teve uma época áurea durante as décadas de 50 e 60, em particular com as obras do engenheiro suíço Heinz Isler (1926-2009), reconhecido a nível mundial pelas suas famosas cascas finas em betão (Melaragno, 1991). Duas das características que justificam a popularidade das cascas são a elevada resistência proporcionada, bem como a liberdade de formas arquitetónicas (Peerdeman, 2008). Podem encontrar-se obras notáveis desta natureza entre 1950 e 1970, da autoria de projetistas como Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ove Arup (1895-1988), Eduardo Torroja (1899-1961) e Félix Candela (1910-1997). Apesar da enorme potencialidade, quer ao nível funcional quer estético demonstrado por este tipo de estruturas, observou-se nas últimas décadas do século XX, um decréscimo no projeto e construção de cascas finas em betão, relacionado com o elevado custo dos cimbres e aumento do custo da mão-de-obra, sobretudo nos países desenvolvidos (Peerdeman, 2008). No entanto, com os avanços nas técnicas de construção muito associados ao desenvolvimento tecnológico, as cascas finas têm vindo a ganhar importância e são uma solução plausível no futuro para grandes estruturas e soluções arquitetónicas. Destaca-se, a título de exemplo, o trabalho desenvolvido pela arquiteta Zaha-Hadid (1950-2016), conhecida pelas suas formas inovadoras e desafiantes, de curvas e contracurvas, em estruturas de casca fina.

Atualmente, existe a tendência para projetar estruturas em casca com as mais variadas formas livres, de esbeltezas cada vez maiores, o que tem gerado um grande desafio ao nível da interação destas estruturas com fenómenos naturais adversos, como é o caso do vento atmosférico (Ferreira, 2013). Neste sentido, os ensaios em túnel de vento são uma mais valia para arquitetos e engenheiros interessados nesta tipologia estrutural, tornando-se uma ferramenta ímpar e extremamente útil na investigação do comportamento aerodinâmico de cascas finas de forma livre, e que possibilitará o ressurgimento das cascas no século XXI.

Uma estrutura em casca de forma livre, como o próprio nome indica, não tem uma forma tipificada e, por isso, não existe regulamentação que avalie a sua interação com o vento. A inexistência de dados para os coeficientes de pressão para solicitações devidas ao vento em estruturas com este tipo de geometria cria a necessidade de estudar em maior detalhe este tema e divulgar informações, metodologias e ferramentas, que auxiliem na determinação de forças devidas ao vento que possam ser utilizadas para a simulação do comportamento estrutural, aerodinâmico e de ventilação de projetos atuais.

Apesar do avanço na área computacional, e da crescente utilização da modelação numérica para caracterização de estruturas, no que diz respeito ao cálculo dinâmico de escoamentos, a análise experimental continua a ter um peso muito grande, sendo mesmo considerada a via pela qual se

obtêm resultados mais fiáveis e próximos da realidade. A combinação de ensaios experimentais e modelação numérica no estudo de uma estrutura deste tipo leva a resultados e conclusões mais completas e assertivas, como seria de esperar. O trabalho desenvolvido aborda exclusivamente a via experimental, ficando a análise numérica como proposta para desenvolvimento futuro.

No âmbito de um projeto de investigação "*Design and Performance of Ultra-Thin Concrete Shells*", coordenado pelo Prof. Eduardo Júlio e envolvendo elementos do IST, LNEC, UniCamp (Brasil), ISEC e UC, está a ser desenvolvido um novo conceito de pré-fabricação de cascas ultrafinas em betão de muito elevado desempenho reforçado com fibras. A investigação recai sobre uma nova técnica construtiva de prefabricação por módulos, procurando assim otimizar e reforçar a utilização deste tipo de estruturas. O presente trabalho incide sobre o comportamento aerodinâmico de cascas finas, do modelo experimental desenvolvido com três apoios e diferentes configurações consoante o número de fachadas, constituindo uma fase crucial na investigação desta tipologia de estruturas.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo estudar em túnel de vento o comportamento aerodinâmico de cascas finas pré-fabricadas em betão de ultra-elevado desempenho, de um modelo experimental desenvolvido com três apoios e configurações diversas consoante o número de fachadas (1, 2 ou 3). Pretende-se assim determinar experimentalmente os coeficientes de pressão devidos à ação do vento, com o objetivo de identificar zonas da superfície e ângulos de incidência do vento críticos quando a casca se encontra sob a ação do vento.

A determinação das cargas atuantes sobre a superfície da casca, através dos coeficientes de pressão, para a situação condicionante, é fulcral para o dimensionamento da estrutura. Espera-se que o presente trabalho contribua para o avanço significativo na caracterização aerodinâmica deste tipo de estruturas.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, sendo o primeiro e o último referentes respetivamente à introdução e à conclusão.

O presente trabalho está organizado segundo quatro capítulos principais. Os dois primeiros referem-se a i) bibliografia existente relacionada com estruturas de cascas finas em betão e ii) interação destas estruturas com o fenómeno atmosférico vento. Os dois últimos são constituídos por i) descrição da campanha experimental e ii) análise de resultados.

No presente capítulo, introduz-se o tema e apresentam-se os principais objetivos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2, começa por definir o conceito de casca, segue-se uma abordagem histórica a esta tipologia de estruturas e uma descrição dos processos de geração e classificação da forma. Por último faz-se uma breve referência a regulamentos internacionais e nacionais que recaem sobre estruturas em casca.

No capítulo 3, faz-se em primeiro lugar uma breve descrição de conceitos associados ao vento atmosférico, abordando os temas de regimes de escoamento, parâmetros adimensionais que caracterizam um escoamento, e camada limite atmosférica. Apresenta-se uma breve descrição da interação vento-estrutura e fenómenos associados. É ainda feito um levantamento dos principais estudos já elaborados sobre a ação do vento em estruturas de casca.

O capítulo 4, descreve o modelo experimental e a instrumentação utilizada durante os ensaios em túnel de vento. Sintetiza-se o plano de ensaios, caracterizando-se cada uma das três fases de ensaios. Por fim, descreve-se como se determinam os coeficientes de pressão, parâmetro que será base de toda a análise de resultados elaborada.

O capítulo 5, trata toda a análise e discussão relativa aos resultados obtidos, feita através da exibição de gráficos de distribuição de coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca, e da evolução deste indicador segundo o alinhamento que fica na direção do vento. Apresentam-se conclusões para cada uma das configurações do modelo e para cada ângulo de incidência do vento.

2. ESTRUTURAS EM CASCA FINA DE BETÃO

2.1. ESTRUTURAS EM CASCA

O conceito de casca, como elemento estrutural, é um conceito amplo e que tem vindo a ser alvo de investigação ao longo dos tempos. Dentro desta categoria enquadram-se estruturas de superfície delgada, não planas e que funcionam predominantemente em duas direções. Apesar de qualquer estrutura existente na realidade ter três dimensões, há determinadas estruturas em que uma análise comparativa entre as próprias dimensões leva a desprezar uma delas, facilitando a sua análise (Melaragno, 1991).

As estruturas em casca são tratadas como um “elemento área”, por oposição ao “elemento linear” (Cardoso, 2008). Por oposição, as vigas e os pilares são casos de elementos lineares, em que determinada seção se desenvolve ao longo do eixo da peça. Um elemento área é algo que se desenvolve em duas direções e não apenas numa, como é o caso das cascas e também das lajes. São elementos bidimensionais em que a espessura é considerada pequena comparativamente às outras direções (Flugge, 1973, citado em Cardoso, 2008).

As cascas podem ser diferenciadas em cascas finas e cascas espessas. As cascas finas, objeto de estudo da presente tese, são caracterizadas por ter uma espessura bastante inferior às outras duas dimensões, o que leva a que a rigidez à flexão seja baixa e a rigidez no plano se sobreponha. Nestes casos, a casca pode ser analisada através da Teoria da Membrana, segundo a qual a estrutura desenvolve um mecanismo resistente às ações exteriores comportado maioritariamente por esforços no plano de compressão e de tração. Os esforços de flexão podem ser considerados muito pequenos e os esforços de corte desprezáveis (Cardoso, 2008). As cascas espessas, apesar da espessura ser inferior às outras duas dimensões, pode não ser suficientemente pequena para que se despreze a rigidez de flexão e se ignore a deformação por corte. Nestes casos aparecem na casca esforços por flexão e uma deformação por corte que deve ter tidos em conta.

Segundo Melaragno (1991), uma estrutura em casca fina é uma forma tridimensional mais espessa do que uma membrana, por isso resiste não só a tensões como a compressões. Por outro lado, é menos espessa do que uma laje o que a impede de resistir a momentos fletores. Uma estrutura de casca fina é uma tipologia especial de abóbada cuja geometria pode ter variadas formas. Pode ser uma abóbada esférica ou elíptica, uma estrutura parabólica, ou um parabolóide, conoide, ou um parabolóide hiperbólico (Melaragno, 1991).

O foco do presente texto é a tipologia estrutural de casca fina de forma livre. Ao contrário de conceitos como o de abóbada ou cúpula, conceitos já bem definidos e amplamente utilizados, a casca fina de forma livre, como a própria designação indica, pode ter inúmeras formas, sem uma definição geométrica concreta.

2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS ESTRUTURAS EM CASCA DE BETÃO

2.2.1. PERCURSORES DAS ESTRUTURAS EM CASCAS

A origem das estruturas em casca remete para o início do século II A.C, com a construção da cúpula do Panteão de Roma em betão leve (Figura 2-1). O Panteão, localizado no centro histórico da cidade de Roma, em Itália, é um ícone da História no que diz respeito à construção de cascas, com uma cúpula que apresenta um vão de 43 metros tornando esta estrutura na maior abóbada sem reforços da História (Peerdeman, 2008). O segundo exemplo de estruturas deste tipo surgiu já no século VI, com a construção da Basílica de Santa Sofia (Figura 2-1) também conhecida como Hagia Sofia, em Istambul, na Turquia.



a)



b)

Figura 2-1- a) Panteão de Roma (125 a.C) e b) Basílica de Santa Sofia (537 d.C) em Istambul (w1)

No século XVIII e XIX, as estruturas em casca caíram em desuso e foram praticamente esquecidas. As cascas em betão reapareceram por volta de 1920, aliadas ao aparecimento do novo e revolucionário material, o betão armado, por Franz Dischinger (1887-1953) e Ulrich Finsterwalder (1897-1988), projetistas Alemães na Dyckerch & Widmann AG (Melaragno, 1991). A construção do Planetário de Zeiss na Alemanha (1925) foi a primeira casca fina de batão armado do Mundo, com 25 m de vão, 125 m de altura e 60 mm de espessura, marcando o início da Era Moderna (1925) (Melaragno, 1991).

No período de transição para a Era moderna, Eugene Freyssinet (1879-1962), engenheiro Francês, construiu duas abóbadas cilíndricas no Campo Militar Aéreo de Orly, com vãos de 86 m e a altura de 50 m.

A Era moderna é constituída por diferentes períodos, destacando-se claramente o período que precede a Segunda Guerra Mundial, o período da guerra propriamente dito, e o período pós-Guerra considerado por muitos um período de expansão das cascas, mas que viria a acabar repentinamente nos anos 70. Algumas das estruturas em casca mais importantes do início da Era Moderna foram, o Planetário de Zeiss (1926), Mercado de Frankfurt (1928), Mercado em Algeciras (1934) e o Centro de Exposições em Zurique (1939) (Figura 2-2).



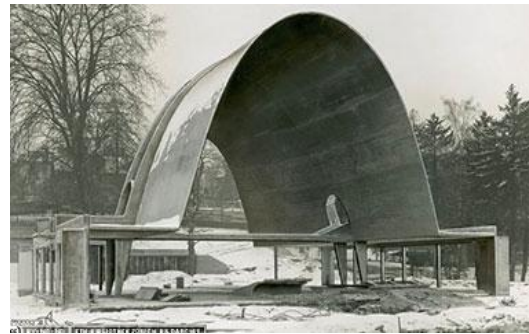
a)



b)



c)



d)

Figura 2-2- a) Zeiss Planetarium (1926) por Dischinger, Finsterwalder and Bauersfeld, b) Frankfurt market hall (1928) por Dyckerhoff & Widmann AG, c) Algeciras market (1934) por Eduardo Torroja (w1) e d) Zurich exposition hall (1939) por Robert Maillart (w2)

O projeto e construção do planetário de Zeiss (1926) constitui um marco essencial no desenvolvimento da construção de cascas, uma vez que pela primeira vez o conhecimento teórico sobre a teoria da membrana foi aplicada num edifício em betão armado (May, 2015).

Entre 1939 e 1945, a América do Sul deu os primeiros passos neste campo. Óscar Niemeyer (1907-2012), considerado um dos maiores arquitetos da arquitetura moderna internacional, projetou a Igreja de São Francisco de Assis, com uma forma inovadora à época. Introduziu as estruturas em casca no Brasil, com contributo em projetos para a Capital Brasília, na qual se destacam duas construções, o Centro de Congressos Nacional e o Museu Nacional (1960) (Figura 2-3).



a)

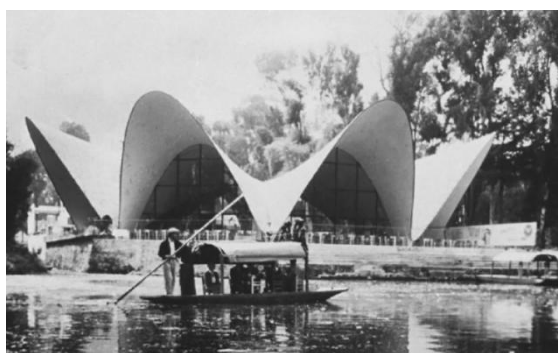


b)

Figura 2-3- a) Centro Nacional de Congressos, Brasília (1960) (w3) e b) Museu Nacional, Brasília (1960) (w4), ambos por Óscar Niemeyer

O período que sucede a 2ª Guerra Mundial, caracterizado pela necessidade em construir estruturas amplas com recurso a mão de obra barata e materiais mais económicos, levou à construção deste tipo de estruturas (Peerdeman, 2008).

Félix Candela (1910-1997), engenheiro Espanhol-Mexicano, ficou celebrenemente conhecido pelas suas formas ímpares de estruturas em casca. Construiu mais de 300 cascas (Peerdeman, 2008), entre elas o Restaurante Manantiales no México (Figura 2-4). Destaca-se também uma casca fina, do tipo parabolóide hiperbólico, como um “chapéu-de-chuva” em betão armado (Figura 2-4).



a)



b)

Figura 2-4- a) Restaurante Manantiales (1957) em Xochimilco, Mexico, por Félix Candela (w1) e b) representação do teste à integridade estrutural da estrutura de casca fina (1950s), México, por Félix Candela (w5)

Um dos mais importantes engenheiros de cascas, podendo ser considerado o fundador do conceito de *free-form* é o engenheiro Heinz Isler. Isler foi motivado por Felix Candela na sua mais célebre casca, o Restaurante de Manantiales em Xochimilco. Isler conseguiu provar a viabilidade económica das suas cascas, construindo vários exemplos até 1990. A essência do método passa por construir cascas com a forma mais eficiente para a superfície das mesmas (Peerdeman, 2008). Dos métodos que explorou, utilizou o *Hanging cloth reversed*, para a determinação da forma de cascas como a Estação de Serviço em Deitingen (Figura 2-5) ou a fábrica Sicli em Gêneva (Chilton, 2012).



Figura 2-5- Estação de serviço em Deitingen (1968) por Heinz Isler (w1)

Apesar do sucesso na construção de cascas nas décadas de 50 e 60, a partir dos anos 70 notou-se um declínio acentuado. As razões prendem-se maioritariamente com a subida do preço da mão de obra, em especial nos países desenvolvidos. A construção deste tipo de estruturas fez-se sentir com mais intensidade na América do Sul, comparativamente à Europa e USA onde o preço da mão-de-obra é mais elevado.

2.2.2. ATUALIDADE DAS ESTRUTURAS EM CASCA (1970-2016)

A partir dos anos 70, uma nova geração de engenheiros tentou combater o aumento dos custos da mão-de-obra investigando e procurando soluções para o problema. No continente americano, tipicamente os engenheiros construíam cascas de betão para igrejas e grandes arenas de desporto.

Um importante avanço no desenvolvimento e construção das cascas foi a introdução do conceito de membrana de ar insuflado como método de construção, mais precisamente como cofragem. Apesar de todas as inovações nas técnicas construtivas, as cascas em betão armado não são utilizadas com a frequência de outro tipo de estruturas mais comuns, e aparecem com maior prevalência em obras arquitetónicas de grande escala. Devido aos avanços computacionais, os arquitetos têm cada vez mais a possibilidade de desenhar estruturas de casca *free-form*. A Opera de Sydney, Figura 2-6, é uma estrutura em casca fina em betão pré-esforçado, cuja execução do projeto em obra iniciou em 1959 e finalizou em 1973.



Figura 2-6- Opera de Sydney (1973), por Ove Arup (Engenheiro) (w1)

Na Figura 2-7 é possível observar duas obras de casca fina do século XXI, sendo a primeira, l'Oceanografic em Valência, inspirada no Restaurante de Manantiales de Félix Candela. A segunda representa a casca da Ópera de Tenerife.



a)



b)

Figura 2-7- a) L'Oceanografic (2002), Valencia, por Lázaro, Domingo Cabo e Candela (w1) e b) Ópera de Tenerife (2003) por Calatrava (w3)

2.2.3. O FUTURO DAS CASCAS FINAS

Atualmente é possível construir longos vãos em diferentes tipos de materiais, tais como madeira, aço e betão armado. O aço e o betão armado são sem dúvida os grandes rivais também para esta tipologia estrutural, sendo que em grande parte dos países o aço perde relevo por razões económicas. Recentemente, os avanços na composição do betão armado, que deram origem a betões ultra-resistentes, levam a um aumento significativo na eficiência deste tipo de estruturas e consequentemente a um interesse crescente por parte de arquitetos e engenheiros, permitindo desenhar vãos ainda maiores. Estes avanços tornam possível a introdução de uma nova geração de cascas, extraordinariamente eficientes, com custos mais baixos, e limites alargados para os vãos.

Maioritariamente no Médio Oriente e na Ásia, os arquitetos têm demonstrado interesse pelas formas livres. Dois dos mais recentes projetos da arquiteta Zaha Hadid, muito popular pelas suas formas livres e curvas, são o Museu da Sardenha em Cagliari e a Ópera do Dubai (Figura 2-8). Estes projetos combinam aço e betão na sua constituição e identificam-se com o conceito de casca fina.



Figura 2-8- Desenhos do projeto da Ópera House no Dubai, por Zaha Hadid (w6)

Desde a antiguidade até aos dias de hoje, passando pelo período da arquitetura moderna em que as estruturas em casca não tiveram tanta importância, os avanços na tecnologia, as mudanças e o aparecimento de novos materiais permitiu reduzir muito a espessura destas estruturas, levando a uma redução drástica do peso próprio, o que constitui uma enorme vantagem não só ao nível estrutural, mas também económico.

2.3. PROCESSOS DE GERAÇÃO DA FORMA DE ESTRUTURAS EM CASCA

A geração da forma de uma estrutura em casca, com qualquer tipo de curvatura, pode ser feita através de um processo geométrico ou de um processo não-geométrico. A definição geométrica assenta na lógica de equações matemáticas, que definem a forma da casca no espaço. Por outro lado, a geração de forma através de métodos não-geométricos está associada a processos ditos naturais, usualmente denominados por *form-finding*. Pode afirmar-se que nas primeiras décadas do século XX predominaram as cascas com formas definidas analiticamente, com uma função matemática associada, e por isso conseguidas através de um processo geométrico.

2.3.1. PROCESSO GEOMÉTRICO

A grande maioria das superfícies definidas geometricamente, são geradas através da rotação (superfície de revolução) ou da translação (superfície de translação) de uma curva, dando origem a superfícies de revolução ou de translação, respetivamente. Podem ainda ser superfícies regradas.

2.3.1.1. SUPERFÍCIES DE REVOLUÇÃO

Nas superfícies de revolução tem-se em conta a existência de uma curva plana, designada por meridiano. Supondo que essa curva plana gira em torno de um eixo, designado por eixo de rotação e situado no plano da curva, é gerada uma superfície de revolução. São exemplos deste tipo de superfícies, os cilindros circulares, os cones, as cúpulas esféricas e elípticas, entre outras superfícies.

2.3.1.2. SUPERFÍCIES DE TRANSLAÇÃO

No caso de uma curva plana ser transladada paralelamente a si mesma, seguindo uma curva diretriz, é gerada uma superfície de translação.

As superfícies de translação podem ser muito variadas, em virtude das possíveis combinações entre curvas e retas. É possível obter superfícies cilíndricas, circulares e não circulares, por translação de uma curva plana sobre uma reta, em que a curva pode ser circular, elíptica, parábola ou catenária. Existem ainda as superfícies paraboloides elípticas que resultam da translação de uma parábola sobre outra parábola perpendicular, ambas com a mesma curvatura. As superfícies paraboloides hiperbólicas por sua vez, resultam da translação de uma parábola sobre outra parábola perpendicular, de curvatura oposta à primeira.

2.3.1.3. SUPERFÍCIES REGRADAS

As superfícies regradas resultam da movimentação de linhas retas entre duas curvas de extremidade. Os planos que contêm as retas não têm de ser obrigatoriamente perpendiculares aos planos que contêm as curvas. Os conoides (Figura 2-9) são um dos exemplos deste tipo de superfícies, e resultam da translação de uma reta em que numa extremidade se encontra uma curva e na outra extremidade uma reta. Os hiperboloides de revolução, cones e cilindros são exemplos de superfícies que podem ser geradas tanto por este processo como pelo processo de revolução.

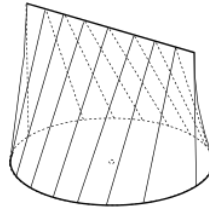


Figura 2-9- Superfície regradada do tipo conoide (w3)

2.3.2. PROCESSO NÃO GEOMÉTRICO

As cascas geradas através de processos não geométricos assentam na hipótese de que a forma é determinada pela carga atuante, e não o inverso, mais comum em projetos de estruturas típicas. A ordem lógica no projeto de uma estrutura em casca será: i) escolher um estado de tensão favorável e ii) a partir desse estado de tensão determinar a geometria da casca “correspondente”.

Um dos conceitos que se baseia neste processo de geração é a *form-finding*, introduzido por Heinz Isler e objeto de estudo do próximo subcapítulo.

2.3.2.1. O CONCEITO *FORM-FINDING* E OS MODELOS FÍSICOS DE CASCAS FINAS

Heinz Isler introduziu e explorou largamente o conceito de *form-finding*. Dos três métodos não convencionais de *form-finding*: *Freely shaped Hill*, *Membrane under pressure*, e *Hanging cloth reversed*, destaca-se o último (Isler, 1961, citado em (Chilton, 2012)). Isler indica 39 potenciais formas (Figura 2-10) para cascas e refere que existe ainda um número infinito por descobrir (Chilton, 2009).

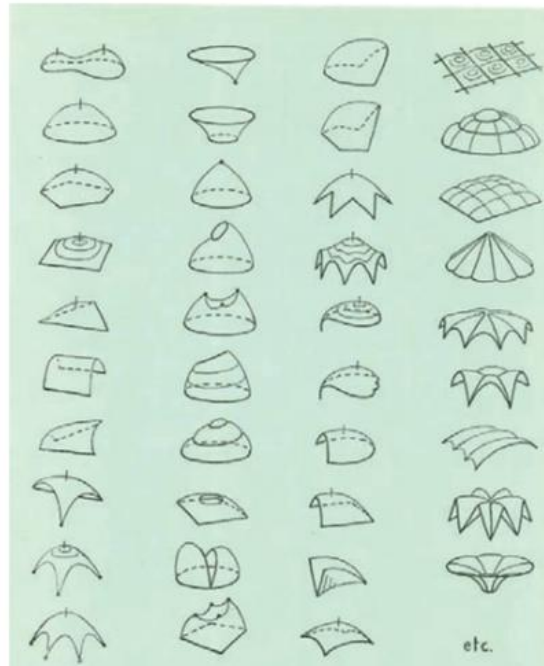


Figura 2-10 - Formas de cascas sugeridas por Isler no seu artigo “New Shapes for Shells”, IASS (Isler, 1960) por (Chilton, 2012)

Os primeiros e mais importantes projetos de Isler basearam-se nos métodos *Hanging cloth reversed* e *Membrane under pressure* que carrega um tecido que simula a casca. A técnica utilizada para carregar o tecido, que simula a casca, passa por colocar gesso, de forma a maximizar a maleabilidade do tecido molhado e manter a espessura constante. Depois de ter notado algumas limitações relacionadas com a influência do peso do tecido e a sua orientação relativamente às fronteiras, Isler experimentou alguns métodos mecânicos de *form-finding*. Neste sentido, para obter uma carga uniformemente distribuída sobre a superfície da casca colocou pequenos discos de madeira distribuídos (Chilton, 2012).

Isler demonstrou que é possível obter qualquer forma a partir de qualquer superfície lisa, utilizando “membranas invertidas”. Para Heinz Isler, os fatores-chave que influenciam a escolha da forma de uma estrutura em casca são: i) funcionalidade; ii) forma; iii) expressão artística; iv) estática; v) Construção; e vi) Custo. Isler deu especial ênfase à forma e ao custo no que toca à decisão de qual a forma ideal para as suas estruturas. A forma e o tamanho da superfície inicial influenciam as reações nos apoios e o estado de tensões interno da casca (Chilton, 2012).

Uma consideração adicional é a estabilidade da casca sujeita a esforços de compressão, especialmente nos bordos livres e nos locais onde as forças se concentram junto dos apoios. Nas estruturas geométricas mais tradicionais, como os paraboloides hiperbólicos, é frequentemente utilizada a incorporação de uma viga no bordo. Isler apercebeu-se de que desenhando a superfície ligeiramente maior do que a área planeada, entre os apoios e a dupla curvatura do contorno da casca fina, conseguia conferir ao modelo uma maior rigidez para resistir à encurvadura (Chilton, 2012).

A escala típica utilizada para a obtenção das coordenadas x , y , z de forma a conseguir construir a casca em tamanho real é aproximadamente 1:50 ou 1:100. De acordo com Isler, a fase de obtenção de coordenadas, feita de forma manual por não existir *laser-scanning*, é uma das fases mais críticas de todo o processo (Chilton, 2012). Construiu inúmeros modelos de resina epóxi utilizando modelos de gesso como cofragem que foram testados experimentalmente para determinação do estado de tensões internas e resistência à encurvadura da casca (Chilton, 2012).

O método da membrana suspensa (*Hanging cloth reversed*) consiste em suportes devidamente colocados, na mesma posição relativa da estrutura real, através dos quais se obtém um estado de tensão de tração pura. Ao inverter o modelo (Figura 2-11), resulta um estado de compressão pura, desejável. As cascas em modelos reduzidos, simuladas por membranas, apresentam desta forma um estado de tensão em compressão pura, o seu estado natural, apenas e só devido à ação da gravidade. É possível a obtenção de variadas formas, com diferentes condições de apoio e de carregamento, e que resultam de um balanço entre o número de apoios e o seu posicionamento (Cardoso, 2008). Este método é o mais interessante do ponto de vista de análise, em especial da relação existente entre a capacidade resistente por tração das fibras dos tecidos, e a capacidade resistente à compressão do betão.

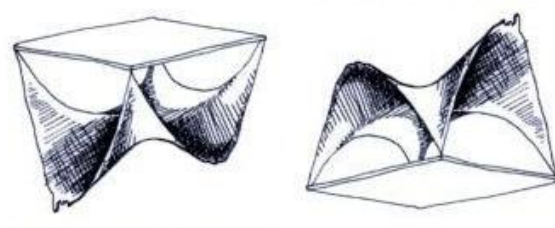


Figura 2-11- Desenhos esquemáticos de uma forma livre de casca apoiada em quatro pontos (w7)

Uma grande vantagem deste estado de tensão é a maximização da capacidade resistente do betão. Uma desvantagem deste método é a de que, caso exista mais de um caso de carga dominante, não é possível a obtenção de uma solução que equilibre e potencie ambos os casos. Deve ainda ser feita uma análise de estabilidade nomeadamente para cascas com grandes vãos em que a estrutura se torne mais flexível.

As Figura 2-12 e Figura 2-13 ilustram respetivamente, os estudos em modelos físicos pelo Método da membrana suspensa de Isler, e a concretização desses mesmos estudos pela construção das estruturas em casca.



a)



b)

Figura 2-12- a) e b) Testes em modelos físicos do método da membrana suspensa, Isler (1994) (w8)



a)



b)

Figura 2-13- Estruturas reais em casca, inspiradas no método da membrana suspensa: a) Área de serviço de Deitingen, Isler (1965) e b) Empresa Kilcher em Recherwil, Isler (1968) (w3)

Os métodos *form-finding* foram um grande avanço e uma ferramenta extremamente útil. No entanto, é importante referir que não é possível projetar estruturas eficientes, passando simplesmente do modelo reduzido para as dimensões reais. Existem limitações ao nível do processo construtivo, que envolvem a inversão do material, por não ser viável à escala das cascas de Isler. O que não significa que não se possa utilizar este processo para a geração da forma e construção de um elevado número de cascas em betão armado (Chilton, 2012).

2.3.3. CLASSIFICAÇÃO DE FORMAS DE ESTRUTURAS EM CASCAS

A classificação de estruturas em casca geradas por processos geométricos pode ser feita de acordo com o conceito da curvatura de Gauss (Cardoso, 2008). Para cascas geradas de forma não-geométrica, através de processos *form-finding*, naturalmente não existem critérios definidos nem existe uma classificação pré-definida.

Pela teoria das superfícies, qualquer superfície pode ser representada no espaço tridimensional por uma equação do tipo $z = f(x, y)$, em que x e y são variáveis independentes. Cada ponto da superfície tem coordenadas $(x, y, f(x, y))$, sendo a curvatura de Gauss o resultado do produto das curvaturas principais.

Curvas planas resultam da interseção de uma superfície com planos (superfícies planas). A curvatura é variável consoante a seção normal, existindo uma curvatura de valor máximo e outra de valor mínimo. O conjunto das curvaturas máxima e mínima designa-se por curvaturas principais. O sinal do produto das curvaturas principais define os três tipos de curvaturas de Gauss:

- i) Curvatura positiva gaussiana – o valor das curvaturas principais tem o mesmo sinal em todos os pontos da superfície, ou seja, o valor da curvatura Gaussiana é positivo. Um exemplo deste tipo de cascas são as cúpulas;
- ii) Curvatura nula gaussiana, simples ou sinclástica – o valor da curvatura Gaussiana é zero em todos os pontos. Ou seja, existe curvatura principal numa direção e é zero na direção ortogonal. As cascas cilíndricas são um exemplo bem conhecido e uma das formas mais utilizadas em cascas de betão.
- iii) Curvatura negativa gaussiana ou anticlástica – apresentam, em todos os pontos, curvaturas principais com sinais opostos nas duas direções, de que resulta a combinação de compressão e tração quando atuados por cargas perpendiculares à superfície. Alguns exemplos ímpares deste tipo são as Cascas de Félix Candela, mencionadas em 2.2.1.

A Figura 2-14 ilustra um resumo da classificação geral de cascas usualmente utilizadas em Engenharia Civil, geradas exclusivamente através de processos geométricos.

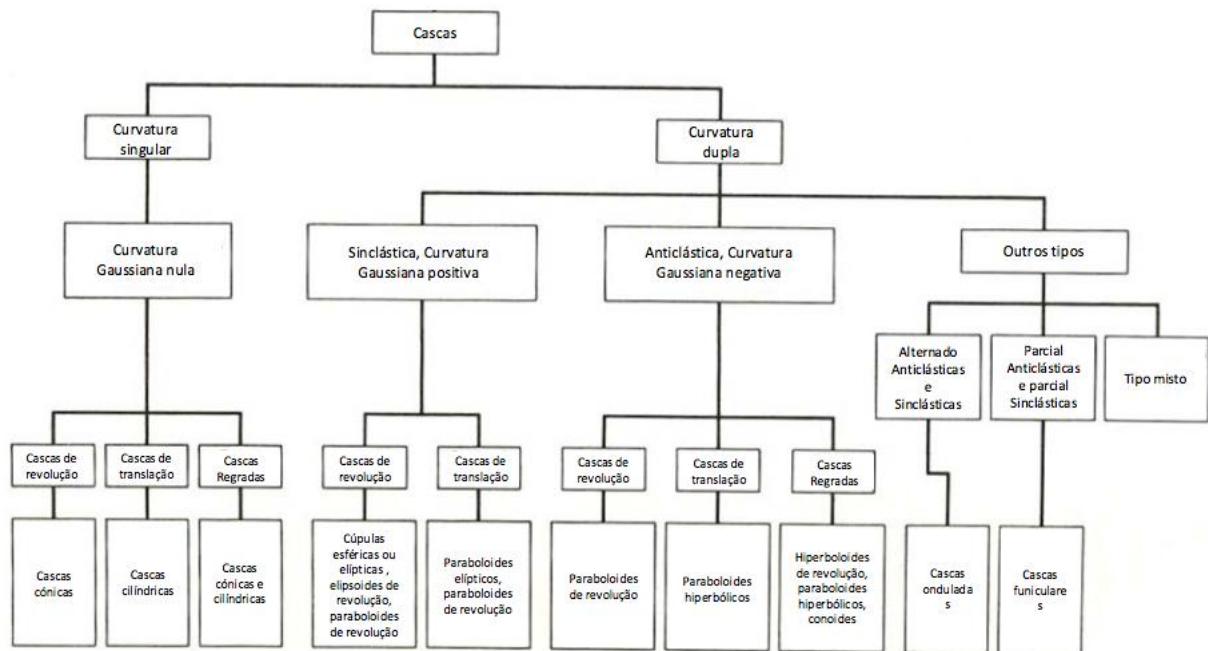


Figura 2-14- Anagrama da classificação proposta pela Indian Standard Criteria for the Design of Reinforced Concrete Shells and Folded Plates (Ramaswamy, 1984, citado por Cardoso, 2008)

2.4. REGULAMENTAÇÃO APLICADA A ESTRUTURAS EM CASCA

A regulamentação orientada para o projeto constitui o guia por onde se regem os engenheiros civis em todo o Mundo. No entanto as cascas de formas livres, pela sua singularidade, não são contempladas por estes códigos. A bibliografia existente para o estudo do comportamento desta tipologia estrutural prende-se com estudos experimentais e numéricos já realizados e publicados através de artigos, para determinadas formas, sem uma possível generalização.

Existem dois Códigos de Projeto que referem as cascas em betão, o *American Concrete Institute* (ACI) e o *International Association for Shell and Spacial Strutures* (IASS). Por ser um tema que ainda gera alguma controvérsia e que continua em constante investigação, a documentação existente, nomeadamente a documentação proveniente dos Estados Unidos da América ganha relevância e é utilizada de forma generalizada em todo o Mundo (Melaragno, 1991).

O *American Concrete Institute* (ACI) foi criado em 1903 nos Estados Unidos. Naturalmente foram surgindo códigos nacionais em alguns países, sem retirar a importância e significado do ACI, que foi e é a sua base. Apenas em 1959, o ACI evocou o assunto das cascas ao formar o comité 334-*Concrete Shell Design and Construction*, por Anton Tedesko, com objetivo de desenvolver e recolher informação no que diz respeito a cascas em betão. Alguns destes documentos fazem referência às práticas na construção de estruturas em casca, dando ênfase também ao tema da estabilidade (Melaragno, 1991).

O *International Association for Shell and Spacial Strutures* foi em tempos a *International Association of Shell Strutures*, fundada em Espanha, por Eduardo Torroja. Em 1959 a associação original mudou de nome ao estender o seu campo de estudos também às estruturas espaciais. A história da arquitetura, conceitos de *design*, teorias estruturais de design e aspetos construtivos são matérias abordadas. Também neste caso a documentação cobre maioritariamente temas sobre a questão da estabilidade das cascas (Melaragno, 1991).

No que diz respeito à análise do comportamento aerodinâmico de cascas a regulamentação existente é muito limitada. A Norma em vigor em Portugal, relativamente à ação do vento em estruturas, é o Eurocódigo 1 Parte 1-4: Ações em Estruturas- Ações do vento. A NP EN 1991-1-4 2010, no ponto 7.3 "Coberturas isoladas" define cobertura isolada como sendo a cobertura de uma construção que não tem paredes permanentes, como é o caso de estações de serviço ou armazéns (Eurocode 1 : Actions on Structures - Part 1-4: Wind Action). Neste documento normativo é possível encontrar uma tipificação de estruturas, com valores de coeficientes de pressão a utilizar na análise do comportamento para estruturas semelhantes e com as características geométricas *standard*, como é o caso da Abóbada. As cascas finas de formas livres não são passíveis de comparação ou relação direta com qualquer uma das configurações descritas. Por esta razão, a via experimental e ou numérica, caso a caso, torna-se a ferramenta mais adequada para o estudo da distribuição de coeficientes de pressão na superfície desta tipologia de estruturas.

3. AÇÃO DO VENTO SOBRE ESTRUTURAS EM CASCA

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A ação do vento é mais exigente em projetos de estruturas como coberturas, fachadas ou pilares isolados entre outros elementos mais suscetíveis à ação de fenómenos atmosféricos como o vento. O vento atmosférico é a representação do movimento de ar pelo transporte de massas de ar na atmosfera terrestre. Durante o seu movimento pela superfície terrestre esta massa de ar choca, varre e ultrapassa vários obstáculos, incluindo todo o tipo de estruturas de engenharia. A génese do fenómeno natural está relacionada com as condições térmicas e de pressão (Kolousek *et al.*, 1984). O estudo destas condições insere-se no domínio da meteorologia, o que sai fora do que será âmbito da presente dissertação. A temática das forças resultantes nas estruturas sujeitas a determinadas condições de escoamento do ar pertence à área da aerodinâmica.

As cascas finas pelas suas características geométricas também fazem parte deste grupo de estruturas. Neste sentido, a Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4: 2010 (2010), permite o cálculo da ação do vento sobre estruturas, em valores de pressão e força, e refere coeficientes de pressão a utilizar para determinadas tipologias de coberturas, como por exemplo “coberturas em terraço”, “coberturas de n vertentes” e “Coberturas em abóbada e cúpulas”. As cascas finas de forma livre, não são contempladas em NP EN 1991-1-4: 2010 (2010) precisamente pela sua natureza e especificidade. Para se proceder à análise aerodinâmica destas estruturas, através da determinação de coeficientes de pressão exteriores e interiores sobre a superfície da cobertura, recorre-se frequentemente a ensaios experimentais em túnel de vento.

No presente capítulo, de forma a interpretar melhor os fenómenos de interação entre o vento e a estrutura, será abordado primeiramente alguns conceitos-chave da aerodinâmica, como regimes de escoamento, coeficiente de pressão ou camada limite.

3.2. CONCEITOS BASE DA AERODINÂMICA

3.2.1. REGIMES DE ESCOAMENTO

Fluído Newtoniano define-se como um fluído cuja rigidez à compressão é infinita (fenómeno de incompressibilidade), e que segue a Lei da viscosidade de Newton dada por, (Cook N. , 1985):

$$\tau = \mu dU/dy \quad (3.1)$$

em que, τ representa a tensão de corte aplicada, dU/dy o gradiente de velocidade resultante e μ a viscosidade dinâmica, propriedade básica de um fluido assim definida por Newton.

3.2.1.1. ESCOAMENTO LAMINAR

Definem-se os conceitos de linha de corrente e tubo de fluxo, como a linha tangente ao fluxo em todos os pontos e o volume delineado pelas linhas de corrente, respetivamente. O escoamento em regime laminar caracteriza-se por ser um escoamento em que o ar se comporta como sendo composto por várias camadas finas, que se movimentam alinhadas umas por cima de outras, a velocidades diferentes (Cook N. , 1985).

Considerando um escoamento constante, e aplicando a lei da conservação de massa, pode escrever-se a bem conhecida Equação da Continuidade:

$$A_1 U_1 \rho_1 = A_2 U_2 \rho_2 \quad (3.2)$$

em que, A_1 representa a seção de entrada do tubo de fluxo, U_1 a velocidade de entrada, A_2 a seção de saída, U_2 a velocidade de saída e ρ a massa volúmica do fluido.

A equação de Bernoulli, é dada por,

$$p + \frac{1}{2} \rho_a U^2 + \rho_a g z = p_T = p_s + q \quad (3.3)$$

em que, p_T representa o termo de pressão total (equivalente à totalidade da energia do escoamento e que deve ser recuperada na forma de pressão); $\frac{1}{2} \rho_a U^2$ é o termo da energia cinética (a pressão dinâmica também designada por q); $\rho_a g z$ é o termo da energia potencial (ou pressão hidrostática), que pode ser desprezado se os pontos estiverem à mesma cota ou integrado no termo p_s , pressão estática, juntamente com p .

Ao contrário da prática corrente de aplicação generalizada desta equação em qualquer circunstância, esta lei é restrita, e assenta em quatro hipóteses (Cook N. , 1985):

- estabilidade do fluxo – sem acelerações e sem turbulência
- incompressibilidade do fluxo – velocidade de escoamento e diferenças de altitude reduzidas
- invíscido – viscosidade reduzida e gradientes de velocidade de escoamento reduzidos
- fluxo irrotacional – curvatura de fluxo pequena e sem vórtices

Como na prática, estas hipóteses não se verificam em simultâneo na grande maioria dos casos em Engenharia, a equação de Bernoulli é utilizada para comparar o comportamento em determinada situação com aquele que seria o comportamento ideal.

A utilização do tubo de Pitot-estático para a medição da velocidade do vento é um dos raros casos em que a equação de Bernoulli é aplicada diretamente e sem restrições. A Figura 3-1, ilustra um tubo de Pitot-estático, constituído por dois tubos dobrados que formam um ângulo de 90°. Existe um anel

de furos no tubo exterior a aproximadamente 10 diâmetros do final do tubo. O tubo é extremamente fino, sendo a parte final desenhada de forma a reduzir ao máximo a perturbação no fluxo de ar. A pressão no tubo exterior iguala a pressão estática, p_s , pela existência do anel de furos. O fluxo no tubo central equivale à pressão total, p_T , (Cook N. , 1985).

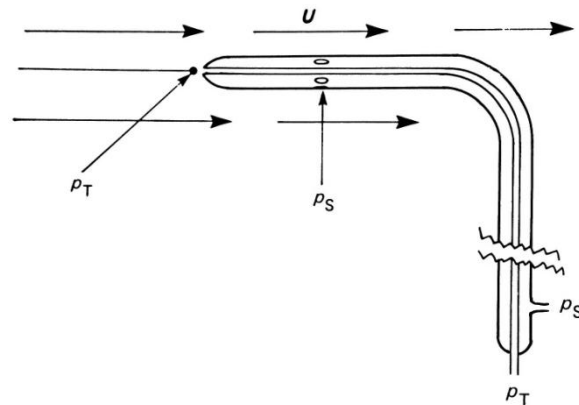


Figura 3-1 Tubo de Pitot-estático (Cook N. , 1985)

3.2.1.2. ESCOAMENTO TURBULENTO

No enquadramento de um escoamento em regime turbulento a definição de linhas de corrente e de tubo de fluxo deve integrar ainda o conceito de turbulência. Neste sentido, linha de corrente média define-se como a linha tangente ao fluxo médio em todos os pontos e, tubo de fluxo médio como o volume delimitado por linhas de corrente média.

Em regime turbulento, a componente de velocidade em qualquer direção pode ser dividida em duas componentes, estacionária e turbulenta. A turbulência é composta por componentes instáveis que se comportam de forma aleatória e caótica. Um modelo conceptual de turbulência considera um número elevado de turbilhões circulares, que variam de tamanho e orientação, e são transportados pelo escoamento médio, (Cook N. , 1985). Dada a sua natureza, não é possível fazer uma quantificação deste fenómeno através de parâmetros determinísticos, mas consegue-se retirar algumas propriedades básicas como a variância e a covariância. A média da componente turbulenta deve ser zero. A equação da continuidade (3.2) é válida em termos de fluxo médio (Cook N. , 1985).

3.2.2. PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

Na análise da interação entre o comportamento do escoamento do vento e as estruturas, é de extrema importância a definição de parâmetros capazes de proporcionar uma análise adimensional.

Neste sentido, e através da aplicação do Teorema de Buckingham, definem-se vários parâmetros adimensionais, (Cook N. , 1985), de onde se destacam:

- Coeficientes de pressão: $C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho_a V^2}$ (3.4)

- Número de Strouhal: $St = nD/V$ (3.5)

- Número de Reynolds: $Re = \rho_a V D / \mu$ (3.6)

O Teorema de Buckingham afirma que a relação entre N variáveis independentes é descrita por $N - m$ parâmetros adimensionais, em que m representa o número de dimensões contidas em N variáveis. As três dimensões, massa, comprimento e tempo encontram-se implícitas nos três parâmetros acima. As variáveis utilizadas para descrever estes três parâmetros e que caracterizam a interação fluxo-estrutura são: pressão p , velocidade V , frequência n , viscosidade dinâmica μ , massa volúmica do ar ρ_a e tamanho D (Cook N. , 1985).

O coeficiente de pressão, dado pela expressão $C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho_a V^2}$, é a relação entre a pressão local e a pressão dinâmica do escoamento. Este conceito é abordado em 3.4.2.

O número de Strouhal, dado por $St = nD/V$, também apelidado de frequência reduzida, é a relação entre o período de transição de escoamento do ar e o período de uma oscilação a dada frequência n .

O número de Reynolds foi desenvolvido por Reynolds em 1883 com o intuito de explicar o carácter de determinados escoamentos. Este parâmetro, Re , que permite classificar o regime de escoamento (laminar ou turbulento), traduz a relação entre as forças de inércia e as forças de natureza viscosa, dada pela expressão:

$$Re = \frac{\rho_a U D}{\mu} = \frac{U \cdot D}{\frac{\mu}{\rho_a}} = \frac{U D}{\nu} \quad (3.7)$$

em que, D é a dimensão característica do corpo, U a velocidade do escoamento e ν o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido (para ar a 20°C toma o valor de $1,51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Os fenómenos que podem ocorrer decorrentes da interação vento-estrutura dependem do tipo de escoamento.

Analisando a equação é possível deduzir que, caso Re seja muito pequeno, as forças viscosas dominam, e por outro lado, caso Re seja muito grande, as forças de inércia sobressaem. A viscosidade dinâmica e a massa volúmica do ar são propriedades físicas do ar pelo que não variam significativamente, no entanto a velocidade e a dimensão característica podem variar.

Usualmente, em escoamentos em ductos considera-se que para números de Reynolds inferiores a 2000 o escoamento é laminar, e que para o mesmo parâmetro de valor superior a 4000 o escoamento é turbulento (Bejan, A., 1993). Entre estes dois valores o escoamento pode apresentar características de um regime e de outro. Em escoamentos sobre placas isoladas considera-se

geralmente queo escoamento deixa de ser laminar para Re crítico de 5×10^5 (Bejan, A., 1993). Este valor crítico depende bastante da rugosidade da superfície e do nível de turbulência. Na grande maioria dos casos, a ação do vento em estruturas ocorre em regime turbulento.

3.2.3. CONCEITOS DE CAMADA LIMITE E DE VÓRTICE

Cook (1985) define camada limite como a região do fluxo perto da superfície de um corpo que é afetada pela ação de esforços de corte sobre o corpo. Uma placa fina e lisa, paralela ao escoamento médio, não perturba suficientemente o fluxo de forma a provocar deflexão do mesmo, pelo que não existem gradientes de pressão normal neste escoamento. A única ação causada pela placa sobre o escoamento dá-se através de tensões de corte na superfície da placa. Perto da superfície, onde z tende para zero, Re é muito reduzido e o escoamento é dominado pela viscosidade. Forma-se uma fina camada de escoamento laminar, denominada subcamada viscosa, que se mantém sempre junto à superfície independentemente das regiões exteriores do escoamento (Simiu & Scanlan, 1996).

Cook (1985), classifica uma superfície como sendo,

- 1) aerodinamicamente lisa – quando não existe nenhuma rugosidade presente na subcamada viscosa;
- 2) aerodinamicamente rugosa – caso existam rugosidades na subcamada viscosa. O escoamento turbulento das camadas exteriores passa a atuar diretamente sobre estas rugosidades produzindo forças normais de pressão sobre a placa.

A superfície da Terra é aerodinamicamente rugosa dada a presença constante de grandes elementos rugosos, como por exemplo edifícios, árvores, entre outros.

Um vórtice é a representação de uma massa de um fluido que roda em torno de um centro definido (Cook N. , 1985). Cook define três tipos de vórtices consoante as características do fluxo, i) vórtice livre, ii) vórtice forçado e iii) vórtice de Rankine.

Um vórtice livre acontece tipicamente quando o fluxo é invíscido. A ausência de viscosidade faz com que o vórtice seja “livre”, ou seja, sem constrangimentos. O vórtice de um ralo de uma banheira é o exemplo mais próximo deste tipo de vórtice. A teoria de um fluxo invíscido não se verifica perto do centro, onde dV/dr é bastante elevado, sendo V a velocidade num determinado ponto e r é a distância do mesmo ao centro. Perto do centro, o número de Re é reduzido e o escoamento não pode ser invíscido, pelo que o anel central de um vórtice livre não pode existir.

Um vórtice forçado acontece em fluxos viscosos. Para r elevados (pontos situados no anel exterior do vórtice), Re é bastante elevado, pelo que a inércia domina sobre a viscosidade, logo a região exterior de um vórtice forçado não pode existir.

Para um fluxo real, o vórtice toma o nome de Rankine. O centro do vórtice, anel central, não pode ser livre e a região exterior não pode ser forçada. Caracteriza-se por uma zona central do vórtice forçada cercada por um anel exterior livre, em que na interface destas duas regiões a velocidade e a pressão se igualam. Nesta mesma zona pode dizer-se que inércia e viscosidade tem a mesma influência sobre o escoamento. O anel central toma proporções sempre reduzidas quando comparadas com a totalidade da dimensão do vórtice.

Na interface entre dois fluxos paralelos que se movimentam a velocidades diferentes diz-se que se forma uma camada de corte. Esta interface pode ser descrita por uma placa lisa imaginária, ou por uma linha de muitos e pequenos vórtices (Cook N. , 1985).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO

3.3.1. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O vento atmosférico representa uma massa de ar em movimento relativamente à superfície terrestre. A caracterização deste movimento é diferente consoante a zona da atmosfera, podendo fazer-se uma divisão entre zona livre e camada limite. Designa-se por zona livre da atmosfera a zona onde não se faz sentir a influência da superfície terrestre. Por oposição o conceito de camada limite atmosférica (CLA) diz respeito à zona em que as forças de atrito exercidas pela superfície terrestre produzem efeito sob o escoamento. A altura da camada limite, altura gradiente, Z_g , depende da intensidade do vento e da rugosidade do terreno (Gomes, 2003).

Rugosidade aerodinâmica, Z_0 , do solo é um parâmetro que serve para designar o conjunto de obstáculos que se encontram à superfície e que perturbam o normal escoamento. A perturbação que se faz sentir perto da superfície terrestre causa uma variação de velocidades em altura, dando origem a um gradiente de velocidades, que parte de zero e aumenta até Z_g , aproximadamente entre 300 e 500 metros (Lopes, 2008). A partir dessa altura, a rugosidade aerodinâmica do solo pode ser desprezada, pelo que a velocidade média deixa de apresentar variação em altura e o escoamento é considerado livre (Ahuja et al., 2006 citado por Castanho, 2012).

Para ventos fortes, quando a velocidade média-horária do vento, \bar{V}_B , excede os 10 m/s, a turbulência gerada é suficiente para anular a maioria dos efeitos, e a CLA pode ser tratada como sendo adiabática – sistema isento de trocas de calor e matéria com o ambiente exterior, naturalmente estável. Este caso é aplicável à maioria das aplicações de solicitações do vento em Engenharia (Cook N. , 1985).

Na Figura 3-2 pode observar-se o perfil das tensões de Reynolds ao longo da camada limite. A CLA tem duas zonas bem distintas: a camada interfacial e a camada Ekman, Figura 3-2.

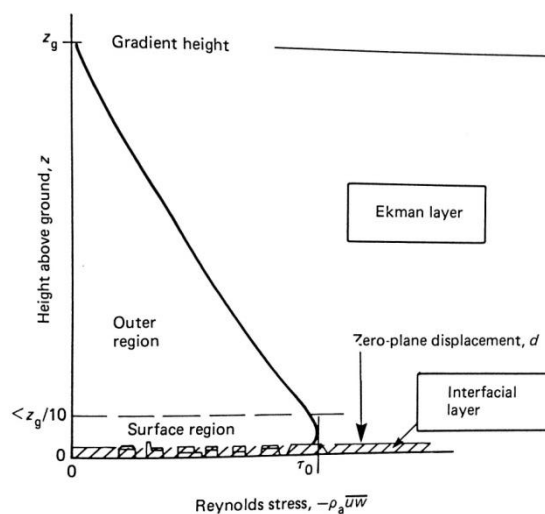


Figura 3-2- Variação das tensões de Reynolds na CLA (Cook N. , 1985),

3.3.1.1. CAMADA INTERFACIAL

A camada interfacial, bem identificada na (Figura 3-2), é a camada mais fina, correspondente à zona mais próxima do terreno, de altura d , igual à altura média dos edifícios perto da superfície terrestre. A esta altura dá-se a designação de *zero-plane displacement*. Este valor corresponde à altura média dos edifícios.

A camada interfacial encontra-se inserida na Região Superficial. Esta, por sua vez, tem uma altura aproximada de um décimo da altura da camada limite, $\frac{z_g}{10}$, (Cook N. , 1985), e apresenta tensão tangencial efetiva praticamente constante, de valor τ_0 .

Ainda na Figura 3-2, é possível observar o que acontece à curva que descreve as tensões de Reynolds nesta zona, que é máxima no topo dos edifícios, $-\rho_a \overline{u'w'}_{max}$, e reduz para zero na superfície do terreno (para $z = 0$). O máximo das tensões de Reynolds é indicado como τ_0 .

O escoamento de vento dá-se em diferentes direções (Figura 3-2), condicionado pela disposição e geometria dos edifícios, sendo o escoamento líquido global igual a zero (Cook N. , 1985). Quando a rugosidade do terreno é muito baixa, por exemplo em ambiente rural, esta camada torna-se muito fina, podendo mesmo ser desprezada.

Em suma, a subcamada viscosa, característica da camada limite de superfícies lisas, é neste caso da superfície terrestre rugosa, substituída por uma camada de altura inferior à dos elementos de rugosidade, denominada por camada interfacial.

3.3.1.2. CAMADA EKMAN

Designa-se por camada de Ekman, a zona da CLA, cuja tensão efetiva varia desde o valor máximo τ_0 , à altura d , até zero à altura da camada limite, Z_g (Cook N. , 1985). Assim sendo esta camada sobrepõe-se a parte da Região Superficial e totalidade da Região Externa (Figura 3-2).

Nesta camada existem três tipos de forças a atuar, i) tensões de Reynolds, ii) tensões de pressão e iii) forças de Coriolis. As tensões de Reynolds, são zero para Z_g e máximas para d . As forças de pressão, do campo de pressões estáticas são forças que atuam perpendicularmente às isobáricas. Por último, têm-se as forças de Coriolis, devidas ao movimento de rotação da Terra e que atuam perpendicularmente à direção do vento. O equilíbrio entre estas forças e o vento, que se verifica em qualquer ponto desta camada, denomina-se por balanço geotrópico (Cook N. , 1985).

3.3.2. VELOCIDADE MÉDIA-HORÁRIA DO VENTO

A Figura 3-3 apresenta um registo de velocidades do vento a três alturas diferentes, todas inseridas na CLA.

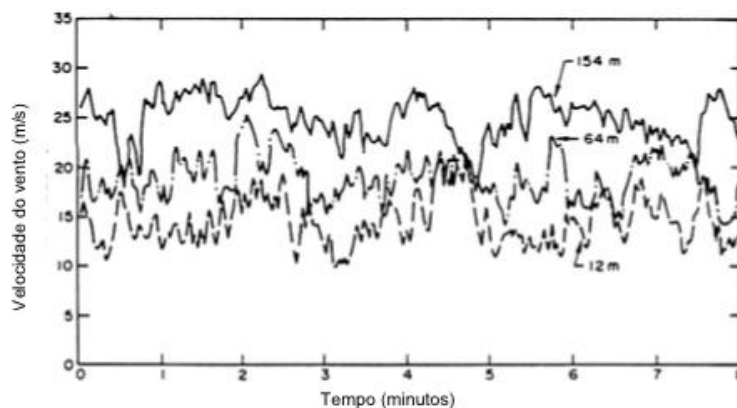


Figura 3-3- Registo de velocidades em altura e ao longo do tempo na CLA. (Davenport et al, 1980) por (Gomes, 2003)

Verifica-se que a velocidade do vento não é constante nem em altura nem ao longo do tempo na CLA. A componente longitudinal da velocidade do vento atmosférico, velocidade instantânea, $U(t)$, pode ser dada por:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (3.8)$$

em que, \bar{U} representa a velocidade média e $u(t)$, representa uma parcela variável instantânea de carácter turbulento, associada às flutuações da velocidade do vento.

A velocidade do vento na CLA aumenta em altura, pelo que o perfil de velocidades médias na camada limite (Figura 3-4) só é uniforme a partir de Z_g , início da zona livre.

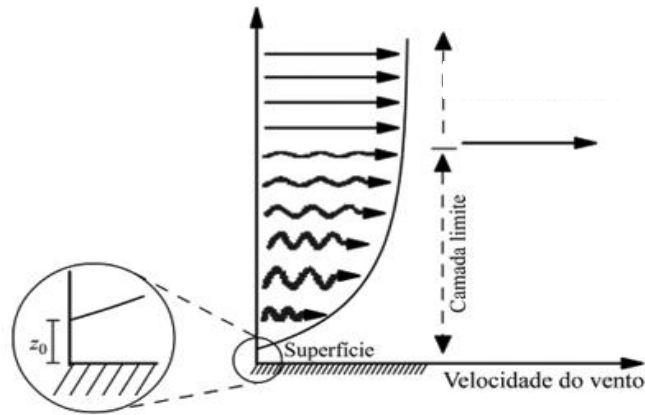


Figura 3-4- Perfil vertical de velocidade do vento. Comprimento da rugosidade (Z_0) (w9)

O escoamento do vento, sob influência de gradientes de pressão e livre das forças de atrito é conhecido como vento gradiente, e a sua velocidade como velocidade gradiente. No entanto, perto da superfície da terra, na zona de interesse para a engenharia estrutural, o vento é retardado pelo atrito da superfície e parte da sua energia cinética é dissipada sob a forma de turbulência (Davenport, 1962).

A variação em altura da velocidade média do vento junto à superfície, pode ser descrita por i) perfil do tipo potência e ii) perfil do tipo logarítmico. O perfil do tipo potencia é expresso pela seguinte equação,

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (3.9)$$

em que, \bar{U}_{ref} é a velocidade média à altura de referência z_{ref} e α é o expoente da lei potencial que caracteriza a rugosidade do terreno. A Figura 3-5 ilustra três perfis de velocidades médias para três rugosidades características diferentes, em meios urbano, suburbano e marítimo respetivamente da esquerda para a direita. Simiu & Scanlan (1996) sugerem valores de α para áreas costeiras, terrenos abertos, terrenos suburbanos e centros de grandes cidades.

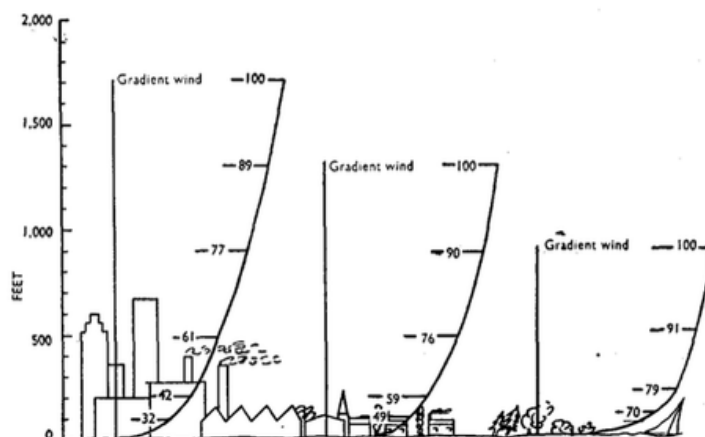


Figura 3-5- Influência da rugosidade do terreno nos perfis do tipo potência de velocidade média (Davenport, 1962)

O perfil das velocidades médias, segundo um perfil do tipo logarítmico, é dado por,

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3.10)$$

em que, z é a altura acima do solo, z_0 é a escala de rugosidade, caracterizada pela rugosidade do terreno, e k é a constante de Von Karman, $k \cong 0,4$. A grandeza u^* corresponde à velocidade de atrito e é dada por, $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, em que τ_0 representa a tensão de atrito e ρ a massa específica do fluido, ar. Neste caso os valores de z_0 para os diferentes tipos de terreno podem ser consultados em Simiu & Scanlan (1996) e Eurocódigo 1 (2004).

3.4. INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA

3.4.1. ESCOAMENTO DO VENTO EM TORNO DE CORPOS ROMBOS

Um corpo é aerodinamicamente rombo quando as linhas de corrente do fluxo não seguem a superfície do corpo, e descolam do mesmo criando regiões de separação do fluxo e uma zona considerável de esteira. Ao contrário das aeronaves em que a forma é ditada pelas características aerodinâmicas ideais, com linhas de corrente sempre tangenciais à superfície, em estruturas, as formas são ditadas muitas vezes pela sua finalidade que, por sua vez, dita as características aerodinâmicas. Face a isto, os edifícios e estruturas são na grande maioria das vezes rombos, criando grandes esteiras de carácter turbulento e elevado arrastamento (Cook N. , 1985).

Cook N. (1985) e Simiu & Scanlan (1996) fazem análises do escoamento em torno de corpos curvos e corpos com arestas vivas, separadamente. Para exemplificar o comportamento de um corpo curvo é comum analisar um cilindro infinitamente longo, circular, face a um escoamento uniforme e regular.

Ao contrário do que aconteceria num fluido perfeito (viscosidade nula), num escoamento real a ação da viscosidade retarda o fluxo perto do cilindro, formando uma camada limite inicialmente laminar, em cada lado do objeto (Figura 3-6). De forma a satisfazer a continuidade do escoamento, o fluxo separa-se do cilindro no ponto de separação (SP) (Figura 3-6), localizado numa posição que faz um ângulo de aproximadamente 85° com a horizontal. A partir deste ponto, a camada limite transforma-se numa camada livre laminar de corte. FS representa o ponto de estagnação frontal e RS o ponto de estagnação à retaguarda. Dado o elevado gradiente de velocidades na superfície do corpo, formam-se tensões tangenciais, originando a formação de uma fina camada limite.

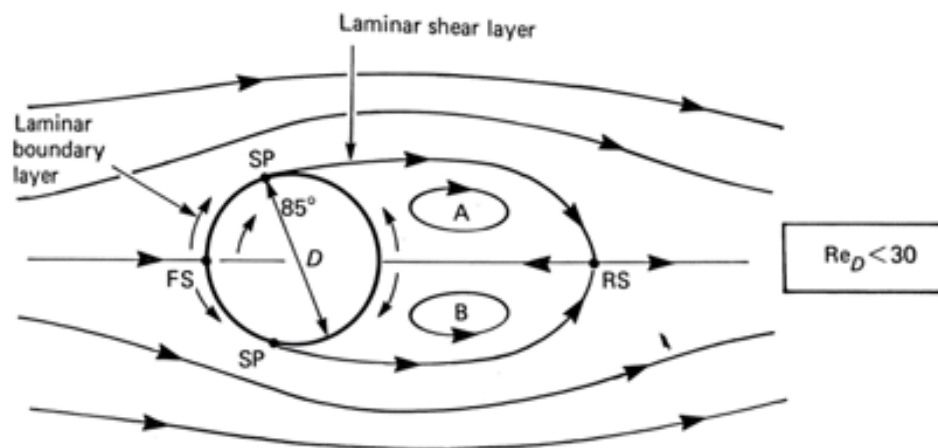


Figura 3-6- Fluxo médio em redor de cilindro circular com camada limite laminar (FS – ponto de estagnação frontal; RS – ponto de estagnação a retaguarda; SP – ponto de separação do escoamento) (Cook N. , 1985)

Para $Re_D < 30$ (Figura 3-6), sendo Re_D baseado no diâmetro D do cilindro, as camadas de corte permanecem laminares. Estas camadas encontram-se num ponto destacado do corpo localizado na linha central, RS. É possível observar dois vórtices, A e B, que rodam em sentidos opostos na retaguarda do cilindro, aproximadamente fixos na mesma posição através da velocidade imposta de um sobre o outro. Importante referir que esta gama de valores de Re não se aplica aos casos reais estudados no âmbito da engenharia de estruturas.

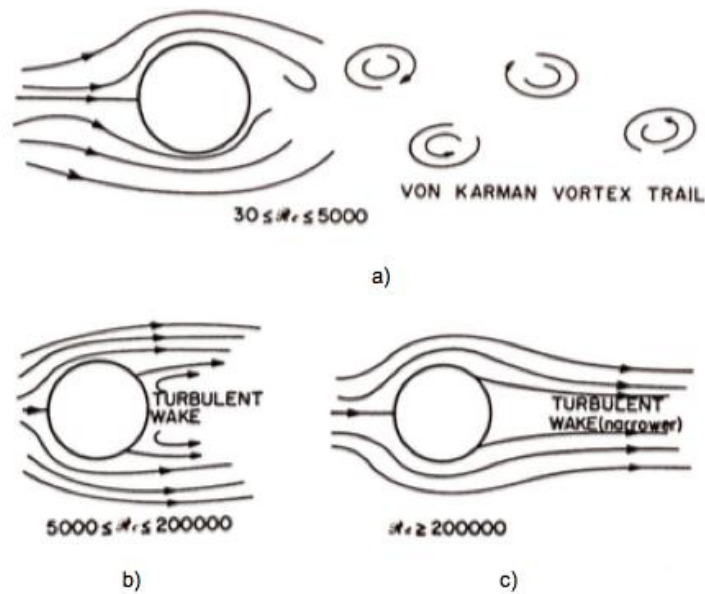


Figura 3-7- Escoamento em torno de um cilindro circular. (a) $30 < Re < 5000$; (b) $5000 < Re < 200000$; (c) $Re > 200000$, (adaptado de Simiu & Scanlan (1996))

Para valores de Re entre $30 < Re_D < 5000$, o par de vórtices torna-se instável e movimenta-se alternadamente (Figura 3-7 (a)), dando origem ao denominado *Von Karman Vortex Trail* (*Esteira de Von Karman*) que representa um padrão de vórtices causado pela separação instável do fluido em torno do corpo.

Dentro do intervalo $5000 \leq Re_D \leq 2 \times 10^5$, as camadas limite no cilindro continuam laminares, mas as camadas de corte tornam-se turbulentas na parte de trás do cilindro, formando uma grande esteira turbulenta (Figura 3-7 (b)). A este regime dá-se o nome de sub-crítico (Cook N. J., 1985).

Para valores bastante mais elevados deste parâmetro, $Re_D > 2 \times 10^5$, as camadas limite no cilindro tornam-se turbulentas mesmo antes da separação (Figura 3-7 (c)). A componente turbulenta é suficiente para atrasar o ponto de separação até aos 120° . A este regime dá-se o nome de supercrítico (Cook N. J., 1985). Considera-se a existência de um ponto de energia cinética máxima, velocidade máxima e pressão mínima. Existe uma transformação de energia de pressão em energia cinética entre o ponto de estagnação frontal e o ponto de energia cinética máxima. Desde o último ponto o escoamento perde velocidade, anulando-se no ponto de separação. Em consequência da separação do escoamento neste ponto forma-se uma esteira turbulenta a jusante do corpo caracterizada por valores de pressão relativamente baixos.

O facto da esteira turbulenta em regime sub-crítico ser bastante mais larga implica maiores perdas. Acima de $Re \sim 20 \times 10^5$ a esteira turbulenta torna-se mais estreita (Simiu & Scanlan, 1996). Como é

possível observar, em corpos curvos o ponto de separação do escoamento desloca-se para jusante à medida que Re aumenta.

A separação do escoamento pode acontecer tanto em corpos de arestas vivas, como em corpos curvos, como exemplificado no caso do cilindro, consequência do consumo de energia necessário para que o escoamento se efetue junto da superfície. A viscosidade característica do fluido faz diminuir a velocidade, induzindo gradientes de pressão adversos, que atrasam o escoamento e no limite são suficientes para contrariar o sentido do mesmo. Em esferas, cilindros e outras superfícies curvas o posicionamento do ponto de separação depende fortemente do número de Reynolds (Gomes, 2003).

3.4.1.1. FENÓMENO *VORTEX SHEDDING*

O fenômeno denominado por liberação de vórtices (*vortex shedding*) acontece na sua mais pura forma para $30 < Re_D < 5000$ na presença simultânea de um dado conjunto de características: fluxo aproximadamente uniforme, turbulência reduzida, cilindro longo, seção transversal do cilindro constante, cilindro rombo e ausência de “recolamento” da camada de corte.

Supondo que um dos vórtices, A ganha mais força do que B (Figura 3-8), o balanço criado induz B a movimentar-se entre A e o cilindro. Quando B ultrapassa a camada de corte de A, com movimento rotacional no sentido oposto, A vai sendo arrastado pela corrente. Ao mesmo tempo B vai aumentando e vai-se criando um novo vórtice, C, para substituir A. O mesmo processo que ocorreu entre A e B acontece seguidamente entre B e C.

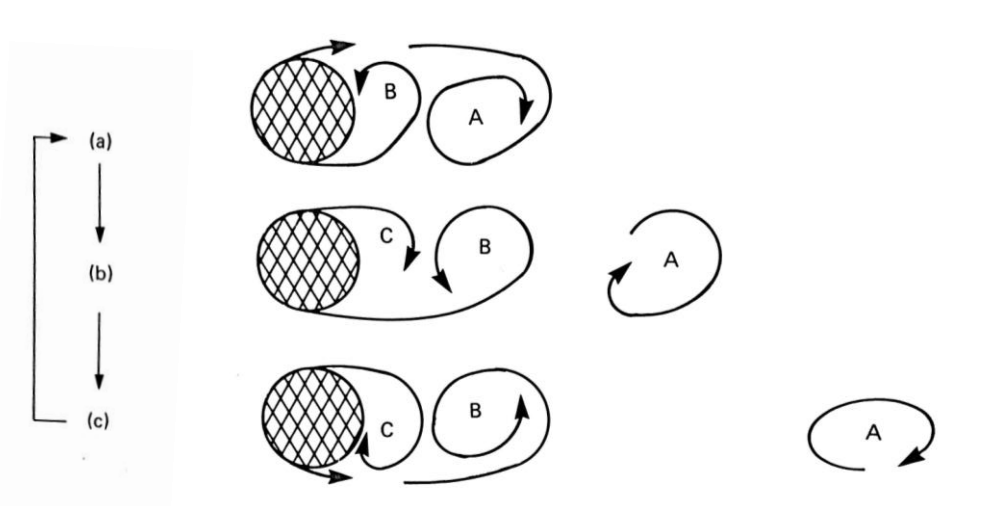


Figura 3-8- Sequência “Vortex shedding” (Cook N. , 1985)

3.4.2. EQUAÇÃO DE BERNOULLI. COEFICIENTES DE PRESSÃO

Nos pontos de estagnação (por exemplo no FS (Figura 3-6), a transformação de energia cinética em energia de pressão é total, pelo que a velocidade nestes pontos é nula. Nos restantes pontos a transformação acontece uma transformação parcial (Gomes, 2003). A redução de pressão que ocorre simultaneamente com um aumento na velocidade, no percurso do escoamento entre o ponto de estagnação e o ponto de energia cinética máxima (Figura 3-6), é descrita pelo princípio de Bernoulli. Este princípio afirma que para um fluxo sem viscosidade e incompressível, um aumento na velocidade do fluido ocorre em simultâneo com uma diminuição na pressão ou uma diminuição na energia potencial do fluido:

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{1}{2g} \bar{U}^2 + z = const. \quad (3.11)$$

em que, \bar{U} é a velocidade média do escoamento incidente, γ o peso volúmico do ar (dado por $(\rho \times g)$).

Reescrevendo a expressão de Bernoulli de forma a colocar em evidência a diferença de pressões estáticas do ar entre um ponto p_0 não perturbado pelo objeto, e um ponto de estagnação p_e , em que a pressão é total e a velocidade é nula e, colocando a hipótese de que os dois pontos se encontram à mesma cota, tem-se:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{1}{2g} \bar{U}^2 = \frac{p_e}{\gamma} \Rightarrow (p_e - p_0) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \quad (3.12)$$

Esta equação 3.12 é válida apenas para escoamentos permanentes de fluidos perfeitos, ou seja, a velocidade e pressão constantes, e fluido incompressível e com viscosidade nula.

O coeficiente de pressão num ponto é dado geralmente, em função da pressão dinâmica do vento, $(\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2)$, através da expressão (Simiu & Scanlan, 1996),

$$C_p = \frac{p_s(x) - p_0}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2} \quad (3.13)$$

em que, $p_s(x)$ é a pressão estática no ponto x da superfície do objeto; p_0 a pressão estática nas condições de referência; $\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2$ a pressão dinâmica do vento não perturbado pelo objeto à altura de referência (normalmente considera-se a altura do objeto). Este parâmetro adimensional permite fazer a correspondência entre resultados do modelo experimental e a escala real (Simiu & Scanlan, 1996).

Tendo em consideração um escoamento uniforme em torno de um cilindro infinitamente longo, e o caso ideal de um fluxo invíscido. O escoamento na linha de corrente central (Figura 3-6), tem a particularidade de no ponto em que se encontra com a superfície do cilindro recuperar o “momento do escoamento”. Neste ponto de estagnação o coeficiente de pressão é unitário, assumindo o valor

máximo para este caso específico (Cook N. , 1985). Nas zonas de pressão C_p tomará valores positivos e nas zonas de sucção valores negativos.

Analogamente, podem definir-se outros dois parâmetros adimensionais, o coeficiente de força C_F , e o coeficiente de velocidade C_V (definidos face a um ponto referência). Dois coeficientes de força específicos são o coeficiente de arrastamento, C_D , e o coeficiente de sustentação, C_L , em que a força corresponde ao arrasto e à sustentação, respetivamente (Simiu & Scanlan, 1996).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho_a V_{ref}^2} \quad (3.14)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho_a V_{ref}^2 A_{ref}} \quad (3.15)$$

$$C_V = V/V_{ref} \quad (3.16)$$

Em que, F_D e F_L são as forças do vento nas direções de arrastamento e sustentação respetivamente; V_{ref} é a velocidade do vento na localização de referência, p_{ref} pressão estática, A_{ref} representa a área de referência no corpo e ρ_a a massa volúmica do ar.

3.4.3. EFEITOS DA INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA

Quando o fluxo de escoamento encontra uma face frontal de uma estrutura Figura 3-9, as linhas de corrente percorrem um trajeto de forma a contornarem o objeto lateralmente e pela cobertura. No caso de um perfil incidente de velocidade uniforme, o vento flui para a zona superior da face frontal e a pressão é máxima no solo aproximadamente no centro da face. Nos bordos a pressão toma valores reduzidos (Cook N. , 1985). As linhas de corrente bem como a distribuição de pressões na face frontal estão representadas na Figura 3-9 a).

No caso de um perfil incidente do tipo CLA, a tendência do fluxo é, na zona inferior da fachada, descendente em direção ao solo, nos dois terços inferiores; ascendente no terço superior, e; de contornar o corpo lateralmente e pela cobertura. Como se pode observar na Figura 3-9 b, a sensivelmente 2/3 da altura da fachada forma-se um ponto de estagnação, FS, sendo que as linhas de corrente acima do ponto seguem para a cobertura e as linhas abaixo seguem em direção ao solo onde a energia cinética é maior. Estas linhas de corrente formam um vórtice junto ao solo, com o ponto GS da Figura 3-9 representando o ponto de separação do escoamento (Cook N. , 1985).

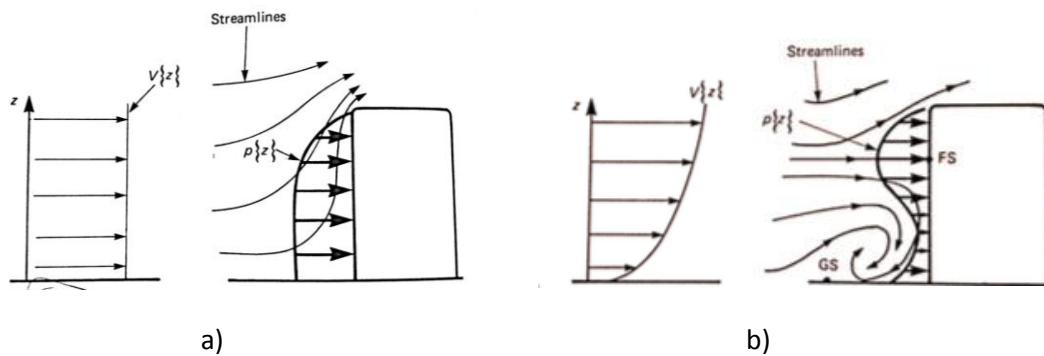


Figura 3-9- Circulação em torno de uma fachada em condições de: a) Perfil incidente de vento uniforme e b) Perfil incidente do tipo CLA (RS – Ponto de estagnação; GS – Ponto de separação no solo,) adaptado de (Cook N. , 1985)

Cook (1985) descreve o escoamento do vento sobre coberturas planas (Figura 3-10), quando o vento incide perpendicularmente à face frontal da estrutura. No caso de um perfil incidente de vento uniforme, as linhas de corrente não voltam a recolar na superfície a não ser que a estrutura seja muito comprida (Figura 3-10 (a)). No caso de um perfil incidente em camada limite, o escoamento ao nível da à cobertura tem mais energia cinética em virtude do perfil de velocidade, formando-se um vórtice sobre a cobertura junto à superfície. Verifica-se um ponto de estagnação do escoamento (RP) e um ponto de separação (SP2) antecipado (Figura 3-10 (b)).

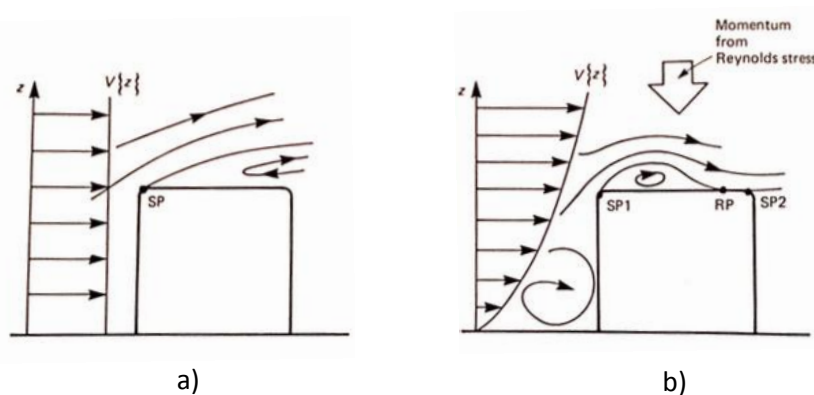


Figura 3-10- Circulação sobre uma cobertura plana em condições de: a) Perfil incidente de vento uniforme e b) Perfil incidente do tipo CLA (RS – Ponto de estagnação; SP – Ponto de separação) adaptado de (Cook N. , 1985)

A designação de esteira é utilizada para caracterizar o escoamento turbulento a jusante de um corpo (Cook N. , 1985). No caso de corpos rombos, esta zona divide-se em duas partes, região de recirculação do fluxo imediatamente atrás do corpo e a região mais afastada da esteira. A primeira zona (Figura 3-11) é caracterizada por diversos fenómenos: um par de vórtices verticais (A), é formado em em cada um dos lados do obstáculo; o fenómeno (B) indica a circulação sobre o topo da estrutura e que tende a “puxar” os dois vórtices (A) para cima; o trajeto de linhas de corrente (C) indica a parte do fluxo que escapa em direção à região mais afastada da esteira.

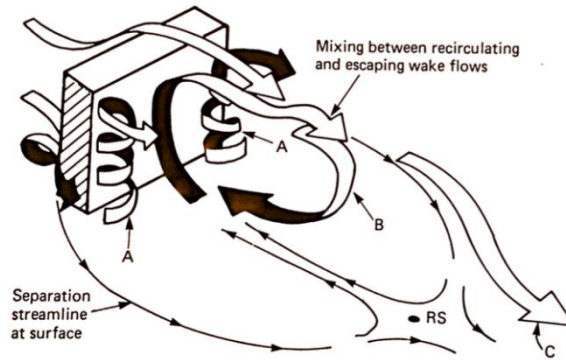


Figura 3-11- Circulação na esteira de um obstáculo (RS – Ponto de estagnação na esteira (Cook N. , 1985)

3.5. ESTUDOS REALIZADOS SOBRE A AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS EM CASCAS

Apesar de ainda não existirem muitos estudos em estruturas deste tipo, ir-se-ão referir alguns estudos anteriormente realizados nesta temática.

Cheung & Melbourne (1983) realizaram ensaios em túnel de vento sobre três modelos diferentes de forma cilíndrica e seção circular com o objetivo de investigar os efeitos da turbulência em determinados parâmetros aerodinâmicos, para números de Reynolds supercríticos. Os modelos, de diâmetros 51 mm, 169 mm e 250 mm, foram ensaiados para 0° , 90° e 120° de incidência do vento. Os parâmetros aerodinâmicos avaliados foram o coeficiente de sustentação, número de Strouhal e coeficiente de sustentação. Concluíram com o estudo, que testes em túnel de vento, em estruturas circulares e com escoamentos caracterizados por $Re < 2 \times 10^5$, são altamente dependentes do valor de Re e da intensidade da turbulência (Cheung & Melbourne, 1983).

Ganguli *et al.* (1984) analisaram a distribuição de pressões em cúpulas sob a ação do vento. Ensaíram três modelos de cúpula com relações diferentes de altura/ diâmetro da base (0.5, 0.7 e 0.25). O parâmetro estudado durante os ensaios foi o coeficiente de pressão. A análise da cúpula esférica consistiu na divisão da mesma em pequenas partes dividindo por linhas de latitude e longitude constantes, e medindo as pressões externas nos pontos de interseção dessas linhas. Resultou que a instabilidade em cúpulas ocorre nos planos de simetria e quando os coeficientes de pressão interna são respetivamente, 0.65, 0.49 e 0.44, da pressão dinâmica no topo da cúpula, para h/c 0.5, 0.37 e 0.25 respetivamente (sendo h a altura da cúpula e c o diâmetro da base) (Ganguli, Newman, & Shrivastava, 1984).

Também o trabalho de Taylor (1991) incidiu sobre a ação do vento em cúpulas. Taylor (1991) teve como objetivo a determinação experimental da distribuição de pressões aerodinâmica em cúpulas hemisféricas, bem como a determinação de valores críticos de pressões em projeto. Os três modelos ensaiados são composições distintas de elementos, o primeiro é uma cúpula hemisférica de $\Phi 300$

mm sobre cilindro de 150mm; o segundo é apenas a cúpula isolada; e o terceiro consiste numa cúpula de $\Phi 276$ mm e 92 de altura. Taylor fez variar o número de Reynolds entre $1,1 \times 10^5$ e $3,1 \times 10^5$, com dois perfis diferentes de turbulência. Concluiu que, para valores de intensidade de turbulência superiores a 15%, a medição de pressões torna-se pouco sensível ao número de Reynolds, para escoamentos com $Re > 1,7 \times 10^5$ (Taylor, 1991).

Meroney et al. (2002) comparam os resultados de análises numéricas e ensaios em túnel de vento, para cúpulas com a superfície lisa e rugosa imersas numa camada limite. O modelo real tem de dimensões 144 m de diâmetro na base e 45 m de altura. O modelo foi construído a uma escala de $\sim 1/300$ e ensaiado para 0° , 45° , 90° de incidência do vento (Meroney, Letchford, & Sarkar, 2002).

Ferreira (2013) estudou o comportamento de duas geometrias diferentes de cascas finas, com seis e cinco apoios, com simetrias segundo 6 e 5 eixos, respetivamente. Realizou ensaios em túnel de vento com o objetivo de determinar os coeficientes de pressão na superfície dos modelos para vários ângulos de incidência do vento. Os ensaios foram realizados em túnel de vento de circuito aberto, com uma seção de $0,72 \text{ m}^2$, simulando uma camada limite atmosférica com um perfil de velocidades e de turbulência equivalente à região periférica de uma cidade. Analisou separadamente os valores de coeficientes de pressão interna e externa, em condições de regime laminar e de regime turbulento. Realizou ainda um estudo numérico através da simulação computacional dos modelos de casca ($Re = 1,08 \times 10^6$), com o objetivo de comparar os resultados obtidos por via experimental e numérica.

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O modelo em causa reproduz uma casca ultrafina de forma livre, e que apresenta em planta, uma forma triangular equilátera. A forma estrutural de apenas três apoios, torna a estrutura simples, ampla e versátil. A campanha de ensaios experimentais em túnel de vento tem como objetivo a determinação dos coeficientes de pressão, fazendo variar o ângulo de incidência do vento, para três configurações diferentes do modelo de casca: i) sem fachadas, ii) com uma fachada e iii) com duas fachadas. Os ensaios foram realizados num túnel de vento, pertencente ao Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Com a presente campanha experimental pretende avaliar-se quais as zonas críticas da superfície da casca, quais os ângulos críticos bem como a influência das fachadas nas cargas aplicadas na estrutura. No que diz respeito à aplicação prática da estrutura, poderá ter inúmeras funcionalidades, enquadrando-se em espaços amplos com características diversas: áreas verdes, espaços culturais, entre outros.

Neste capítulo efetua-se em primeiro lugar uma caracterização do modelo e do equipamento experimental utilizado durante os ensaios em túnel de vento. O tema do plano de ensaios (configurações e direções do vento ensaiadas), e do tratamento dos dados (determinação de coeficientes de pressão) são também abordados no presente capítulo.

4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO

4.2.1. HIPÓTESES E OPÇÕES DE PROJETO. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO MODELO

No caso da casca em estudo, os parâmetros que determinaram a sua forma foram a área em planta, os pontos fixos, a altura máxima da estrutura, e por fim o peso próprio da membrana. Ao contrário da conceção usual de uma estrutura típica em engenharia civil, tratando-se de uma forma livre, a casca surge do equilíbrio entre curva e contracurva e de algumas opções colocadas *à priori* (Tomé *et al.*, 2014). A génese da casca foi condicionada por fatores como a preocupação de adequar a sua complexidade formal ao objetivo do projeto, permitindo com esta estrutura vencer grandes vãos e criar espaços amplos sem a necessidade de apoios intermédios. Neste sentido, e colocando como hipótese o número mínimo de apoios, surgiu a configuração de casca triangular (Tomé *et al.*, 2014).

No que diz respeito à produção virtual e física do modelo reduzido, o processo encontra-se descrito em detalhe sob a forma de oito “*Guidelines*” em (Tomé *et al.*, 2014). As fases que dão origem ao modelo reduzido são: 1) Importação da nuvem de pontos para o ambiente CAD; 2) Preparação do

modelo tridimensional para impressão por partes; 3) Impressão do modelo 3D; 4) Preparação dos moldes destinados a facilitar a conexão das peças; 5) Conexão das partes; 6) Reforço do modelo, fixações e pré-acabamentos; 7) Identificação das coordenadas das tomadas de pressão; 8) Furação, pintura e instalação dos sensores de pressão.

A *guideline* nº 2, que se refere à preparação do modelo tridimensional para impressão, é importante no sentido de perceber as divisões feitas ao nível da superfície da casca para a sua produção. Pelo facto de as ligações entre partes separadas da superfície constituírem fragilidades, adotou-se o critério da divisão no menor número de peças possível – 6 peças triangulares (Figura 5-1 de (Tomé *et al.*, 2014)). Esta divisão resultou da interseção de três planos verticais, que passam cada um por um dos vértices da superfície e pelo centro da aresta oposta. Uma segunda divisão, deu origem a 12 peças finais para impressão (subdivisão de cada uma das 6 peças) (Figura 4-1).

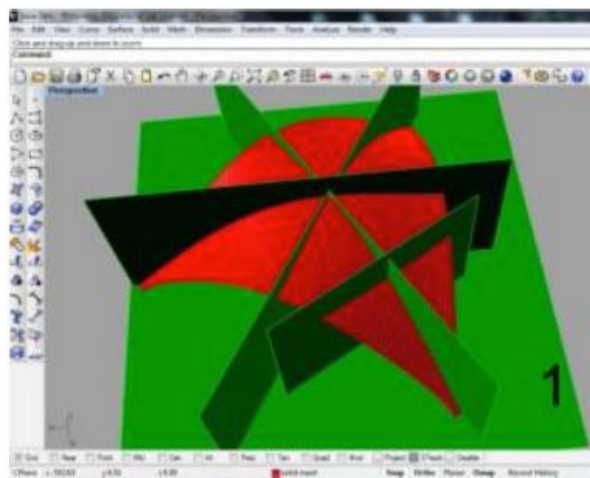


Figura 4-1- Preparação do modelo tridimensional para impressão 3D: sub-divisão do modelo em 12 peças.
Adaptado de (Tomé *et al.*, 2014)

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO

4.2.2.1. CASCA

A estrutura real tem a forma, em planta, de um triângulo equilátero de 25 m de diâmetro, cota máxima de 8 m e espessura de 0,08 m ou 0,10 m. A altura da membrana permite a divisão da casca em dois pisos garantido uma maior versatilidade da estrutura, com a possibilidade de um piso superior com pé direito de 3 m, para fins de serviço (de acordo com o nº3 do artº 65 do Regulamento Geral das Edificações Urbanas) (Tomé *et al.*, 2014). As dimensões referidas foram pensadas de acordo com os seguintes critérios:

- 1) Partição num número mínimo de elementos transportáveis num semi-reboque
- 2) Cobertura de um vão considerável para utilização do espaço
- 3) Garantia da maior extensibilidade espacial

Os três apoios têm uma largura de 1,00 m. O critério de escolha para esta dimensão baseou-se na maior leveza e especto estético da estrutura. Estima-se que a área coberta da casca-módulo, assim designada, seja aproximadamente 102,24 m² (Tomé *et al.*, 2014). A Figura 4-2 ilustra a forma da casca e dimensões do modelo.

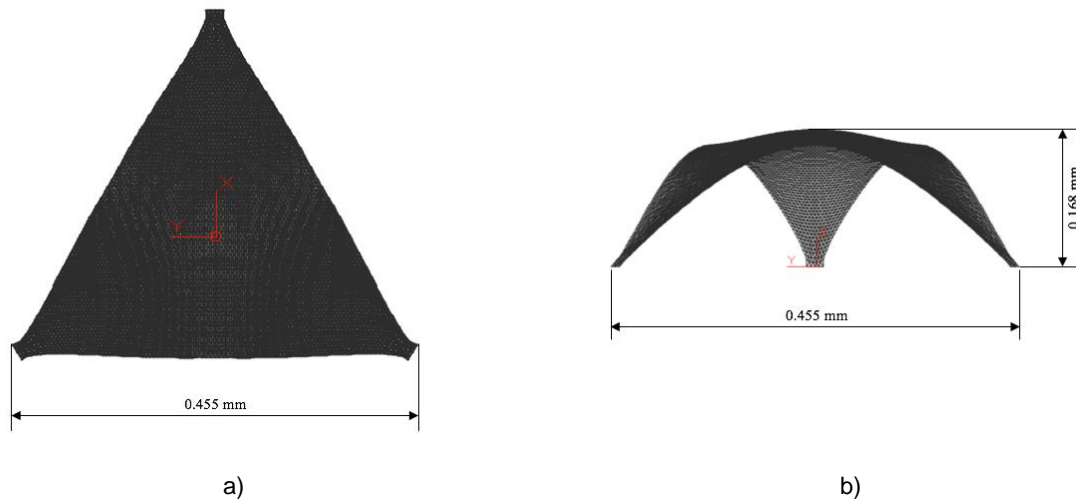


Figura 4-2 – Modelo reduzido da casca e respectivas dimensões: a) vista em planta e b) alçado

Ao modelo reduzido, Figura 4-3, impresso (3D) em filamentos de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), foi depois aplicada manta de fibra de vidro no intradorso por forma a conferir maior uma maior robustez. Utiliza-se uma escala 1:50, que reproduz com nitidez a geometria da forma livre e que é compatível com as dimensões da câmara de ensaios do túnel de vento: 1,2 m x 1,0 m x 3,0 m (largura x altura x comprimento).

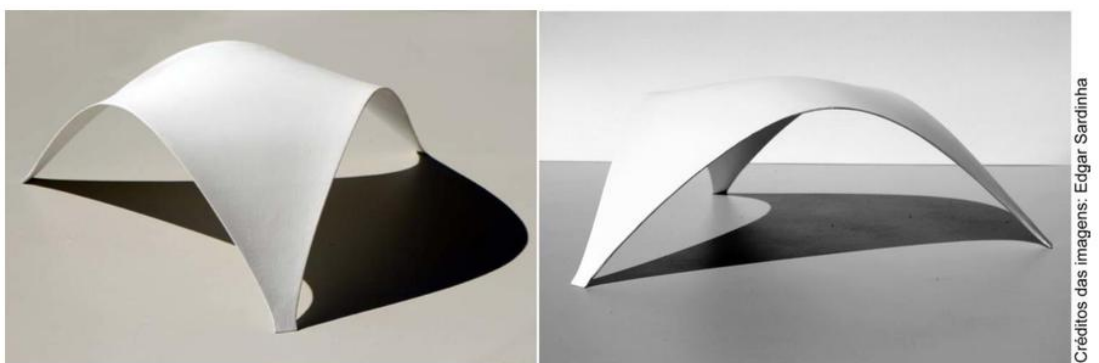


Figura 4-3- Casca triangular de forma livre sob ação de luz natural (Tome, Vizotto, & Julio, 2014).

A espessura adotada para o modelo reduzido foi e 4 mm, um valor bastante superior aos 1,6 mm e 2 mm (correspondentes respetivamente aos 0,08 m e 0,10 m reais), caso se mantivesse a escala para este parâmetro. A razão prende-se com a construção de um modelo estável, resistente e com robustez suficiente para o manuseamento da peça em laboratório. Para além disso, esta espessura permite as perfurações para colocação das tomadas de pressão. A não verificação da escala geométrica na espessura não influencia a forma global e, dado que mantém as arestas vivas que

impõem a separação do escoamento, mantêm as condições de semelhança necessárias à validade dos resultados.

A largura dos apoios no modelo é de 2 cm, permanecendo de acordo com a escala estabelecida. O modelo foi aparafusado a uma base de madeira que assenta no interior do túnel de vento, contendo uma abertura ao centro, que serve de passagem a cabos, tubos e facilita o seu manuseamento. A ligação aparafusada entre a casca e esta base permite a fácil remoção e movimentação sempre que necessário. A base, apoiada no túnel sem qualquer ligação fixa, permite a rotação do modelo no plano horizontal possibilitando ensaios para qualquer ângulo de incidência do vento.

Na Figura 4-4 é possível visualizar o modelo de casca segundo, aparafusado a uma base de madeira com as marcações de diferentes ângulos de incidência. Na figura é ainda possível observar as marcações das coordenadas das tomadas de pressão sobre a superfície da casca.

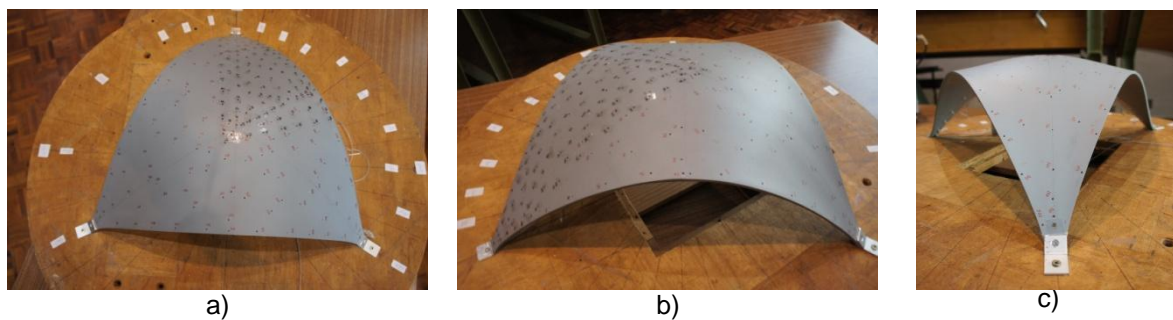


Figura 4-4- Imagem do modelo reduzido – a) planta, b) segundo uma abertura, c) segundo um apoio.

4.2.2.2. FACHADAS

Posteriormente à conceção do modelo de casca, foram construídas fachadas para as aberturas do modelo de casca. A Figura 4-5 é uma imagem da fachada, em acrílico transparente e incolor de 2 mm de espessura e com a forma geométrica das aberturas da casca. As dimensões das fachadas no modelo reduzido estão de acordo com as dimensões das aberturas do modelo de casca: a base da fachada tem 450 mm e altura máxima de 133 mm.



Figura 4-5- Imagem da fachada 1, fachada presente e ensaiada nas fases de ensaio 2 e 3

A linha de bordo da casca nas três aberturas descreve um arco tanto no plano vertical como no plano horizontal. O posicionamento das fachadas, pode ser i) “à face” ou ii) ligeiramente recuado, formando uma “pala”. Por forma a estudar o comportamento da casca face às duas soluções estruturais, e alargar o estudo do modelo, optou-se por uma solução mista em que apenas um dos lados apresenta uma pala, Figura 4-6.



Figura 4-6- Pormenor da pala formada pela colocação da fachada de forma reentrante em relação à casca

As fachadas encontram-se aparafusadas à base de madeira através de chapas metálicas, Figura 4-7 a). A ligação entre as fachadas e os bordos da casca não é materializada por nenhum elemento, é feita através de contacto. Durante os ensaios, devido às imperfeições no corte das fachadas, foi necessário vedar a ligação para vedar para garantir que não existia passagem de ar entre estes dois elementos do modelo, Figura 4-7 b).



a)



b)

Figura 4-7- a) Pormenor da ligação aparafusada e b) pormenor da vedação nas ligações entre a superfície da casca e as fachadas (caso relativo à fachada colocada “à face”, sem formação de pala)

4.2.2.3. VERSATILIDADE DA FORMA

Entende-se como casca-módulo a estrutura com as características definidas anteriormente, podendo ou não conter fachada(s). A forma triangular equilátera permite a conjugação de vários módulos idênticos entre si formando espaços maiores e mais amplos. A pré-fabricação da forma e multifuncionalidade espacial potenciam a “casca piloto” como é denominada em (Tomé *et al.*, 2014). Assim sendo faz todo o sentido o estudo desta forma enquanto elemento singular e com capacidades de gerar formas como as apresentadas em Figura 4-8.

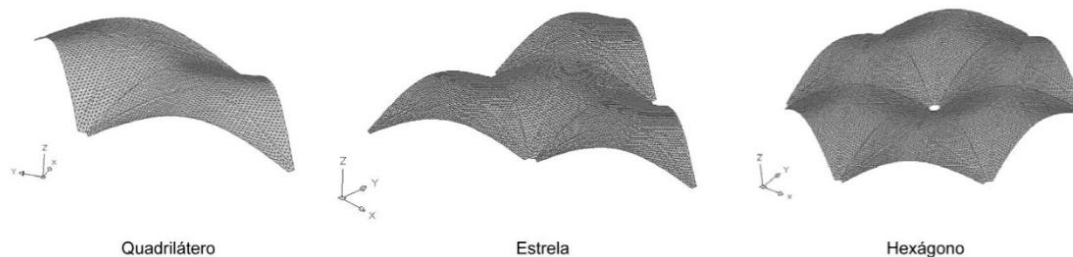


Figura 4-8- Combinações possíveis com a casca-módulo em ambiente AutoCAD, (Tome, Vizotto, & Julio, 2014)

A solução de implementação de fachadas neste modelo acrescenta valor à estrutura. Este elemento deve ser utilizado não apenas com o sentido estético que confere, mas também com o sentido prático de, por exemplo, tornar o espaço útil da estrutura mais agradável, menos suscetível a condicionantes atmosféricas, entre outros aspetos. A diversidade de combinações com a casca-módulo aumenta ainda mais com a utilização de fachadas. Pode pensar-se no futuro, em desenvolver e estudar formas que agreguem várias cascas-módulo como na Figura 4-8, aplicando o conceito das fachadas com o objetivo de criar configurações inovadoras.

4.3. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

4.3.1. TÚNEL DE VENTO EM CIRCUITO FECHADO (LNEC)

O túnel de vento utilizado nos ensaios experimentais pertence à Unidade de Aerodinâmica de Estruturas (UADinE), do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Trata-se de um túnel de vento de circuito fechado, do tipo aeronáutico, que dispõe de um ventilador axial controlado que assegura uma velocidade do escoamento continuamente variável até ~45 m/s. O ventilador é constituído por 12 pás reguláveis, motor de 24 KW de potência nominal a cerca de 900 rpm. A câmara de ensaios tem dimensões de 1,0x1,2x3,0 m³ (seção transversal de 1,20 m²), a jusante de uma contração que garante um escoamento uniforme e de baixa turbulência (<1%) (w10).

Optou-se pelo túnel em circuito fechado, de seção transversal significativamente menor que os restantes túneis disponíveis, por se entender que a seção é suficiente e adequada às dimensões e características geométricas do modelo. Considera-se que nestas condições não existe a possibilidade de ocorrência de fenómenos de bloqueio, por diminuição significativa da secção transversal livre do túnel em qualquer dos casos ensaiados.

Nas paredes laterais da câmara de ensaio do túnel existem duas janelas de cada lado (Figura 4-9) que tornam possível o controlo por observação do ensaio, e manuseamento do modelo. Dada a reduzida dimensão do modelo, os ensaios realizam-se com a totalidade das janelas fechadas. O espaço para colocação do disco giratório, contendo o modelo aparafusado, tem 75 cm de diâmetro.



Figura 4-9- Pormenor das janelas laterais existentes no túnel de vento fechado do LNEC

O túnel apresenta dois difusores, i) o 1º difusor permite a transição entre a seção retangular e a seção octogonal, ii) o 2º difusor permite a transição entre esta seção octogonal e a seção circular (conduta de retorno). A jusante da câmara de ensaios pode observar-se uma folga de 20 mm de espessura, de ligação ao primeiro difusor, com objetivo de manter a câmara à pressão atmosférica.

4.3.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E REGISTO

4.3.2.1. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE E PRESSÃO NO INTERIOR DO TÚNEL

Para a medição da velocidade no interior do túnel de vento, utiliza-se por norma anemómetros de fio quente (medição direta) ou tubos de Pitot (medição indireta). Neste caso o instrumento utilizado foi o tubo de Pitot.

A medição da velocidade do escoamento através do tubo de Pitot faz-se a partir da medição da pressão dinâmica do vento ($p_d = 0,5\rho\bar{U}^2$). O funcionamento de um tubo de Pitot foi abordado em 3.2.1.1 e ilustrado em Figura 3-1.

Tendo conhecimento do valor da massa específica do ar, ρ , e estando o tubo de Pitot localizado numa zona não perturbada, de forma indireta é possível obter a velocidade, ($p_d = 0,5\rho\bar{U}^2$). Existe no túnel de vento um tubo de Pitot-Prandtl (Figura 4-10), com 5 mm de diâmetro, colocado sensivelmente a meio da câmara de ensaios e a 30 cm do topo do túnel.



Figura 4-10 Interior do túnel de vento de circuito fechado (LNEC) em que é visível o tubo de Pitot-Prandtl

Caso o ensaio fosse realizado em escoamento não uniforme, o que incluiria a simulação de camada limite atmosférica, o tubo deveria estar colocado à altura do modelo.

O tubo de Pitot-Prandtl encontra-se ligado a um micromanómetro de precisão Van Essen, tipo BETZ (Figura 4-11), capaz de medir diretamente o diferencial de pressão, p_d (Pa), na gama de -50 a +2500 Pa, com precisão de 0.5 Pa. No mostrador deste instrumento é possível ler o valor de p_d e compará-lo durante o decorrer dos ensaios com o valor obtido no canal escolhido para leitura da pressão dinâmica.



a)



b)

Figura 4-11 a) Micromanómetro tipo Betz pertencente ao LNEC e b) pormenor do ecrã com visualização do valor momentâneo de pressão dinâmica no decorrer de um ensaio

4.3.2.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Dois termómetros e um manómetro de Torricelli (600-830 mmHg, escala 1mmHg), com nónio incorporado, para medição da pressão atmosférica, Figura 4-12, destinam-se a obter, com precisão o valor da massa volúmica do ar:

- Termómetro exterior ao túnel para medição da temperatura ambiente- da LAMBRECH – Figura 4-12 a);
- Termómetro interior ao túnel para medição da temperatura dentro do túnel- da ROTRONIC Figura 4-12 – Figura 4-12 b).



a)



b)

Figura 4-12- Termómetros exterior (à esquerda) e interior (à direita) ao túnel de vento, pertencentes ao LNEC

4.3.2.3. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E REGISTO DE PRESSÃO NA SUPERFÍCIE DO MODELO

Para medição e registo da pressão nos diferentes pontos assinalados na superfície do modelo são necessários vários instrumentos:

- Tomadas de pressão – em cada ponto previamente definido, é colocada um tubo de PVC com cerca de 1 cm de comprimento (ajustável) e 0,7 mm de diâmetro, funcionando como um piezómetro em que é medida a pressão superficial nesse ponto da superfície – Figura 4-13 a);
- Tubos de silicone – tubos de ligação das tomadas ao aparelho de medição, em silicone e com 0,7 mm diâmetro – Figura 4-13 a);
- Sistemas transdutor de pressão/ *PSI's DTC miniature ESP pressure scanners (miniature pressure scanner)* – que através de transdutores de pressão medem diferenças de pressão entre dois pontos em lados opostos do diafragma que separa o interior do aparelho. Do lado ativo mede-se a pressão em cada ponto, e do lado passivo a pressão de referência. A

deformação registada no diafragma é registada eletricamente, sendo a diferença de potencial elétrico proporcional à diferença de pressão (Cook N. J., 1985) – Figura 4-13 a);

- Sistema de aquisição de dados – DTC Initium[®] que faz a interface entre as PSI e o software de aquisição - *PSI_UTILITY_ShortCut* - via ligação Ethernet – Figura 4-13 b);
- Painel de controlo do túnel de vento – regula a velocidade do ventilador e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento. Contém ainda todas as funções acessórias como os interruptores de luzes do interior do túnel ou o botão de emergência – Figura 4-13 c).



a)



b)



c)

Figura 4-13 Instrumentos: a) Sistemas transdutores de pressão com ligação aos tubos de silicone, b) Sistema de aquisição de dados, c) Painel de controlo das pás do túnel de vento (LNEC).

Foram utilizados três PSI *scanners*, ambos com um transdutor por canal, um de 64 canais disponíveis e dois de 32 canais.

Efetuuou-se uma derivação em “T” à saída do tubo de Pitot (valor de P_E) fazendo a ligação ao micromanómetro e às Psi. Desta forma faz-se a ligação entre as tomadas de referência das Psi e a pressão estática do tubo de Pitot. A Figura 4-14 ilustra o caso de utilização de três Psi em simultâneo.

Por outro lado, é necessário fazer a ligação da pressão total do tubo de Pitot, P_T , a um canal livre num aparelho de medição, e à P_T do micromanómetro, o que permite a obtenção e leitura, do valor de pressão dinâmica do escoamento, P_d , nesse canal (Figura 4-14).

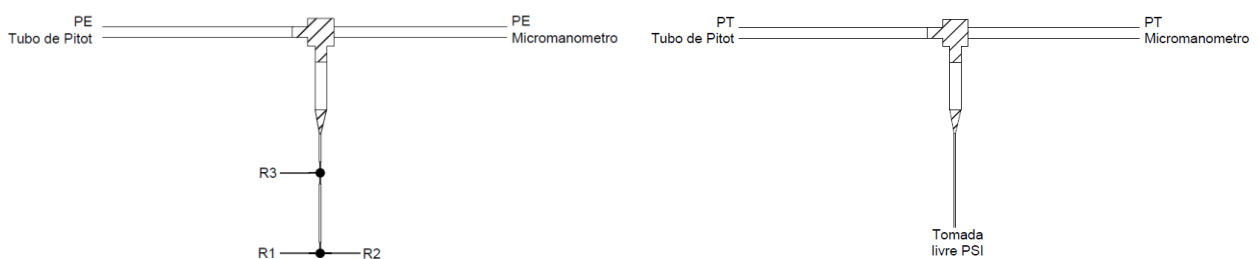


Figura 4-14- Esquemas ilustrativos das ligações entre Tubo de Pitot, micromanómetro e psis.

Os esquemas apresentados em Figura 4-14 são meramente ilustrativos, sendo que, “PE Tubo de Pitot” e “PT Micromanómetro”, representam respetivamente as saídas do tubo de Pitot de pressão estática e total; “Tomada livre PSI” representa a tomada utilizada de uma psi em utilização em dado ensaio; “R1”, “R2” e “R3” representam as tomadas de referência das psis 1, 2 e 3 respetivamente, utilizadas em determinado ensaio.

A Figura 4-15 apresenta o modo de visualização de dados do programa. Na Figura 4-15 é possível observar ainda a janela de controlo e configurações do programa, como por exemplo a definição do sistema de unidades (neste caso Pa- pascal). Na janela de obtenção de dados, cada campo de valores representa uma tomada de pressão. As aquisições foram realizadas à taxa de 16,5 Hz com uma duração de 1,5 minutos para cada ensaio.

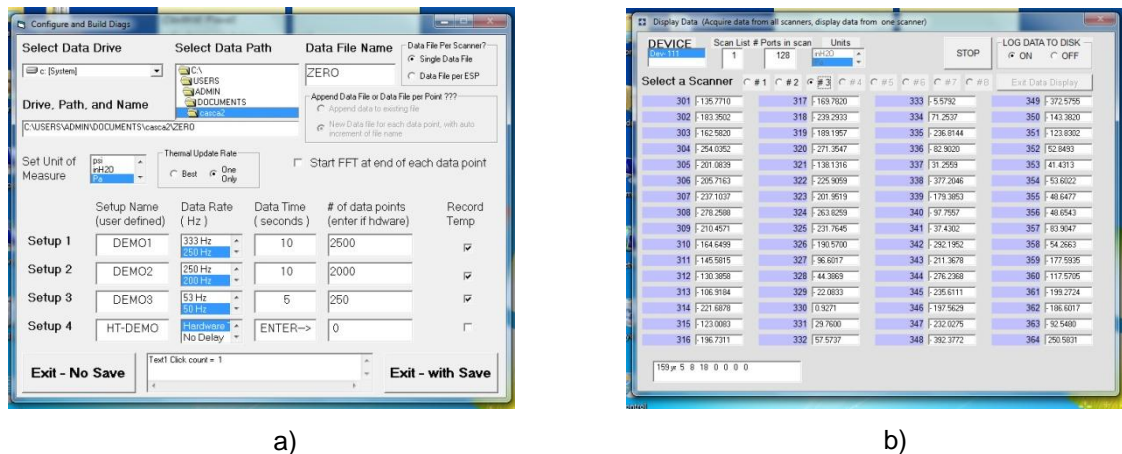


Figura 4-15 – Layout do programa utilizado para monitorização e registo de dados: a) configurações do programa e b) obtenção de dados/ visualização instantânea dos valores de pressão em cada canal

4.4. METODOLOGIA DE ENSAIOS

4.4.1. PLANO DE ENSAIOS

A campanha experimental inerente ao presente estudo divide-se em dois grupos de ensaios distintos:

- 1ª Fase de ensaios – Ensaios realizados ao modelo de casca na sua configuração mais simples, sem qualquer fachada – Caso 0F. Medição de pressões internas e externas na superfície da casca;
- 2ª Fase de ensaios – Ensaios realizados ao modelo com 1 fachada colocada – Caso 1F. Medição de pressões internas e externas na superfície da casca e na fachada colocada;
- 3ª Fase de ensaios – Ensaios realizados ao modelo com 2 fachadas colocadas – Caso 2F. Medição de pressões internas e externas na superfície da casca e numa das fachadas colocadas.

A Figura 4-16 ilustra os 3 casos estudados, correspondentes às três configurações do modelo de casca.

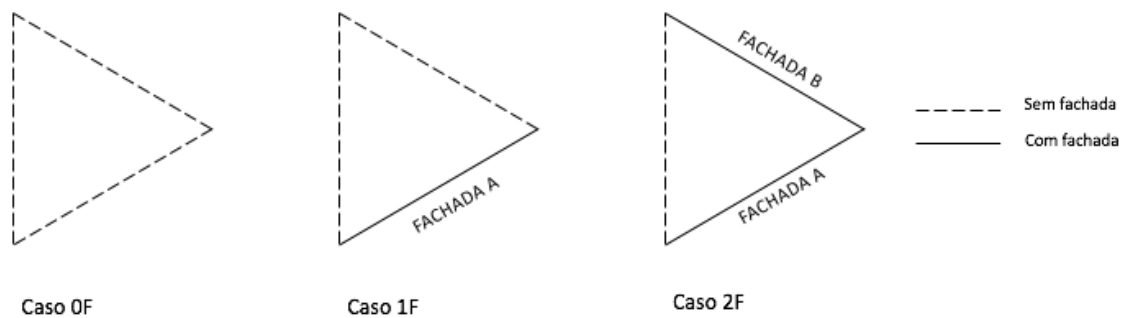


Figura 4-16- Esquema ilustrativo dos três casos estudados. Caso 0F – modelo sem fachadas; Caso 1F – modelo com uma fachada; Caso 2F – modelo com duas fachadas

Por forma a facilitar o tratamento de dados e a análise do modelo por zonas devidamente identificadas, foi utilizada a divisão da superfície apresentada na Figura 4-17.

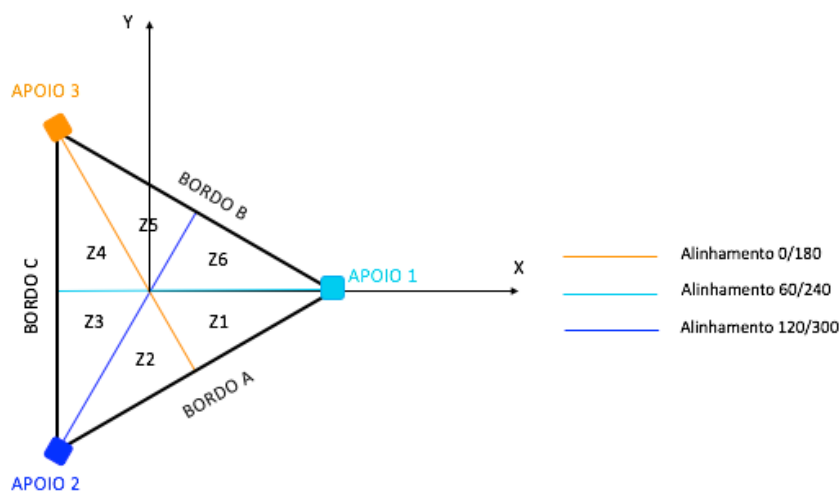


Figura 4-17 Casca triangular de forma livre. Esquema ilustrativo de apoios, bordos e alinhamentos do modelo em planta.

Na Figura 4-17, podem identificar-se 6 zonas idênticas, com forma muito próxima de um triângulo. Estas zonas são delimitadas pelos alinhamentos identificados: alinhamento 0/180 – na direção do ângulo de incidência de 0° e de 180°, alinhamento 60/240 – na direção do vento 60° e 240°, e alinhamento 120/300 – na direção 120° e 300°. Os apoios 1, 2 e 3 correspondem aos três apoios da casca. Os bordos A, B e C, correspondem em planta às arestas do triângulo. Para os casos 1F e 2F são colocadas fachadas nos bordos A, e A e B, respetivamente, Figura 4-16. A interseção dos três alinhamentos traduz-se na origem do referencial X-Y, que será utilizado para a identificação das coordenadas das tomadas de pressão.

O plano de ensaios, elaborado de acordo com: 1) configuração do modelo, 2) forma de aquisição de dados 3) direções do vento ensaiadas, e 4) Densidade de pontos amostrados, encontra-se sumarizado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1- Plano de ensaios da 1ª, 2ª e 3ª fase da campanha experimental

Caso	Sem Fachadas	Uma Fachada	Duas Fachadas
Código	0F	1F	2F
Aquisição de dados	Parcial	Total	Total
Ângulos de incidência do vento (°)	0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 140, 160, 180, 205, 240, 270, 300, 330, 340 e 350	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330
Densidade de pontos amostrados	119 (zona Z1)	124+30 (superfície casca+fachada)	124+30 (superfície casca+fachada)

O Anexo I, contém uma tabela que resume de forma simplificada os dados referentes aos ensaios, nomeadamente número e coordenadas das tomadas de pressão. O Anexo III, apresenta o material que foi necessário para a realização dos ensaios, e de forma esquemática o procedimento experimental seguido.

4.4.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS TOMADAS DE PRESSÃO E DIREÇÕES ENSAIADAS

4.4.2.1. 1ª FASE DE ENSAIOS

A 1ª fase corresponde à realização de ensaios da casca sem qualquer fachada, isto é, caracterizada por três apoios e três aberturas. A distribuição espacial das tomadas de pressão na superfície da casca foi feita manualmente no Sector de Aerodinâmica do LNEC. Com o auxílio do programa computacional *Rhino* foi possível obter a lista de coordenadas dos pontos a ensaiar. O procedimento levado a cabo é explicado em detalhe em (Tome *et al.*, 2014).

Dada total simetria da estrutura, aliada à limitação ao nível do número de canais disponíveis em aparelhos de medição e ao desconhecimento do comportamento da estrutura, optou-se por ensaiar apenas parte da superfície da casca com o objetivo de ter uma grande densidade de tomadas de pressão. Para as zonas não ensaiadas é necessário fazer corresponder os valores de pressão corretos, através de uma lógica construída e ilustrada pela Tabela II-1. Foram colocadas 119 tomadas (Figura 4-18) em aproximadamente 1/6 da área da superfície da casca, correspondente à zona Z1 na Figura 4-17. Para garantir a extrapolação das coordenadas para a restante parte da casca de forma eficaz e a continuidade de resultados, foram colocadas várias tomadas na fronteira entre a zona Z1 e as zonas adjacentes.

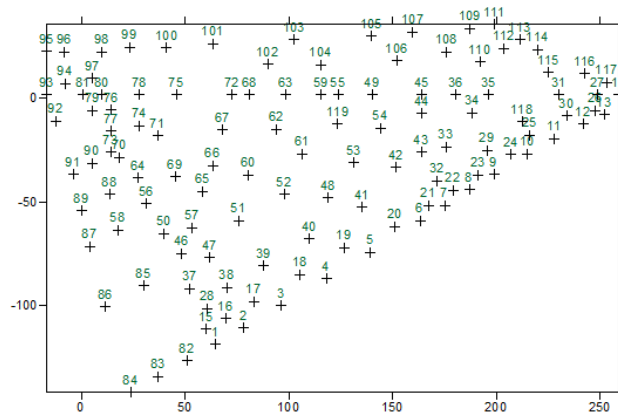


Figura 4-18- Tomadas de pressão ensaiadas (119), colocadas na zona Z1 da superfície da casca, caso 0F

A correspondência entre os 119 valores de pressão obtidos e a restante superfície da casca, dá origem a 714 pontos em toda a superfície, Figura 4-19 a). Após uma análise da distribuição de coordenadas dos 719 pontos com o intuito de tornar a malha o mais regular possível, foram ignorados alguns pontos Figura 4-19 b). Deste procedimento resultaram 269 pontos destinados à análise de resultados final.

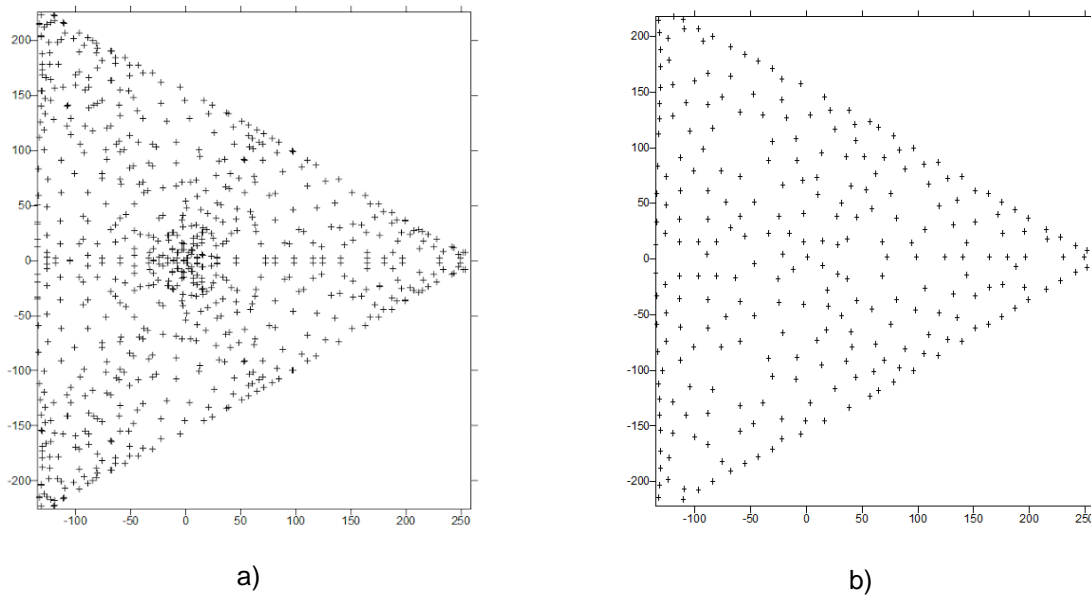


Figura 4-19- Distribuição das tomadas de pressão na superfície de casca: a) 714 pontos e b) 269 pontos após eliminação de excedentes. Caso 0F

Da Figura 4-19 é possível observar que a distribuição final, com apenas 269 pontos, está bastante mais regular e sem vários pontos sobrepostos, sobretudo na zona central da superfície.

O modelo foi ensaiado para vários ângulos de incidência do vento, Figura 4-20. Esta definição foi feita com base nas seguintes hipóteses:

- A medição de vários ângulos de incidência de acordo com a Figura 4-20, aliada a característica de simetria, permite fazer uma correspondência de valores de pressões entre a zona ensaiada e a restante superfície da casca
- Maiores variações na distribuição de pressão junto dos apoios onde a curvatura é mais acentuada. Por este facto o plano de ensaios contempla medições mais refinadas nestas zonas (intervalos angulares menores)

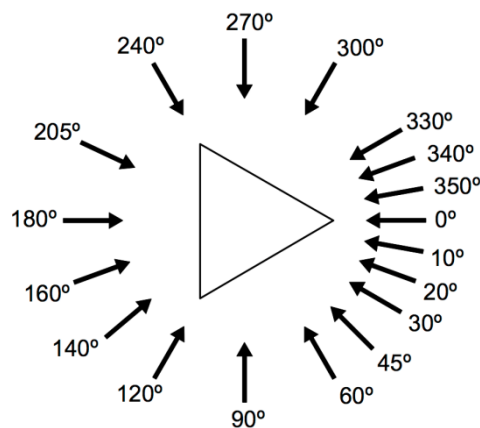


Figura 4-20- Direções ensaiadas durante a 1ª fase de ensaios

A Tabela II-1 do Anexo II representa a correspondência entre os valores amostrados (zona Z1) e os valores correspondentes para as restantes zonas (Z2, Z3, Z4, Z5 e Z6), para as diferentes direções.

Os ângulos utilizados permitem cobrir grande parte da casca para cada direção ensaiada, fazendo corresponder valores de pressão às áreas não ensaiadas. É possível detectar algumas zonas para as quais não existe uma relação direta de valores, pelo que se optou, nestes casos, pela interpolação entre os valores conhecidos mais próximos.

Resumindo, o desconhecimento do comportamento da estrutura levou a que, nesta 1ª fase fossem adotadas medidas conservativas:

- Densidade elevada de pontos amostrados na superfície da casca;
- Ângulos de incidências do vento muito próximos (intervalos mínimos de 10° junto aos apoios).

Após análise de dados, estas medidas relativas ao método experimental revelaram-se demasiado conservativas:

- 1) Obteve-se uma distribuição de valores na superfície de casca uniforme e sem interrupções, com vários pontos sobrepostos após a “extrapolação” para zonas da superfície não ensaiada;
- 2) Pela comparação entre distribuições de coeficientes de pressão para incidências do vento próximas (por exemplo entre 10°, 20° e 30°), verifica-se que não existe uma diferença significativa nos valores de pressão medidos para determinado ponto da superfície.

4.4.2.2. 2ª E 3ª FASES DE ENSAIOS

A 2ª e 3ª fase de ensaio consistem no ensaio em túnel de vento do modelo de casca com uma e duas fachadas, respetivamente. Estas duas configurações, ao contrário do modelo sem qualquer fachada, não apresentam planos de simetria. Após terem sido tiradas algumas conclusões sobre as hipóteses colocadas para o ensaio do modelo sem fachadas – densidade de tomadas de pressão e ângulos de incidência do vento – concluiu-se que não seria necessário adotar medidas tão conservativas a estes níveis. Assim sendo, e tendo em consideração os seguintes aspetos,

- Número de canais disponíveis em aparelhos de medição: 3 aparelhos, total de 128 tomadas de pressão (127 tomadas livres e 1 destinada à medição/ monitorização da pressão dinâmica)
- Conclusões no final da 1ª fase de ensaios: não existe a necessidade de uma malha de pontos amostrados tão densa

Optou-se por uma distribuição de tomadas que cobre a totalidade da superfície da casca, contando com um total de 124 pontos, Figura 4-21.

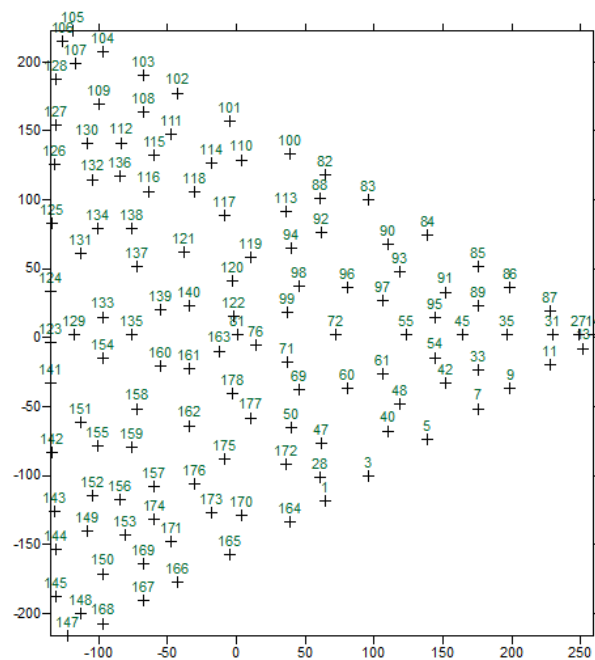


Figura 4-21- Tomadas de pressão na superfície da casca para os casos 1F e 2F

O conjunto de direções do vento ensaiado é bastante menor comparativamente com o da 1ª fase. Optou-se por um plano de ensaios com intervalos dos ângulos de incidência constantes de 30°, Figura 4-22.

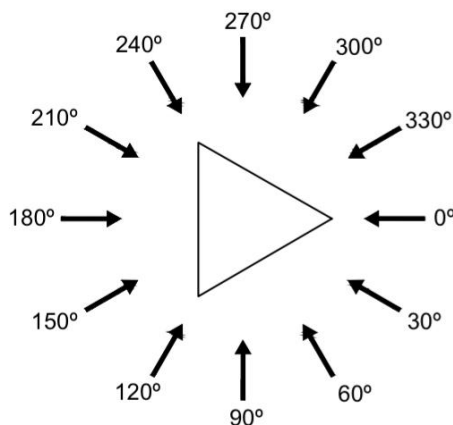


Figura 4-22- Ângulos de incidência do vento analisados durante a 2ª e 3ª fase de ensaio da campanha experimental

Para qualquer dos ensaios com uma ou duas fachadas colocadas, a fachada A foi a única fachada alvo de medições em túnel de vento. A distribuição de tomadas de pressão é regular e cobre na totalidade a área da fachada. Num total de 30 furos realizados, a grande concentração ocorre ao longo da linha de contorno superior, descrevendo um arco. No centro da fachada as tomadas são dispostas segundo linhas verticais e horizontais, formando uma malha quase regular, Figura 4-23.

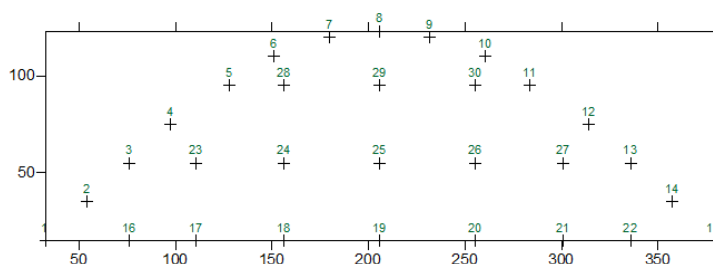


Figura 4-23- Tomadas de pressão analisadas na fachada A

4.4.3. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram todos realizados nas mesmas condições, possibilitando uma comparação de resultados entre ensaios realizados em fases diferentes da campanha. Das condições experimentais relevantes, tem-se:

- Velocidade constante de escoamento no interior do túnel: 20 m/s
- Duração de cada medição: ~1,5 minutos

Os ensaios descritos anteriormente foram realizados em regime uniforme, ou seja, com perfil de velocidade do escoamento do vento constante. Para a definição da velocidade, realizaram-se vários testes em túnel de vento a diferentes velocidades (variação crescente), em que se avaliou a influência do número de Reynolds sobre a distribuição de coeficientes de pressão para cada velocidade (testes

de sensibilidade ao número de Reynolds). Observou-se que na transição de 20 m/s para 25 m/s já não existe alteração significativa dos valores de pressão relativa medidos na superfície da casca, pelo que a velocidade estabelecida para a campanha experimental foi de 20 m/s. A curvatura moderada do modelo, permite que a partir de um certo número de Re (para velocidades superiores a ~20 m/s), a distribuição de pressões não apresente variações com significado, e por isso se torne independente deste parâmetro.

O cálculo do número de Reynolds para a campanha experimental deve ser feito com base nas variáveis da expressão,

$$Re = \frac{U \cdot D}{\mu} \cdot \rho = \frac{U \cdot D}{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.1)$$

Considera-se D , a dimensão característica do modelo a altura máxima do mesmo, $D = 0,162 \text{ m}$ por ser a dimensão comum a todos os ensaios e direções ensaiadas. Se se tomasse o valor da largura da seção do modelo, para incidências segundo o apoio faria sentido $D = 0,02 \text{ m}$ e para incidências segundo a abertura o valor correspondente seria $D = 0,455 \text{ m}$.

Tendo em consideração as condições padrão do ar atmosférico (a 20°C), valor próximo da temperatura no interior do túnel durante os ensaios (Simiu & Scanlan, 1996) (Neto, 2011),

- Massa específica ar (20°C): $\rho = 1,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 1,80 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Tem se para o coeficiente de viscosidade cinemática,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \cong 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.2)$$

O número de Re é então dado por,

$$Re = \frac{U \cdot D}{\frac{\mu}{\rho}} \cong \frac{20 \times 0,162}{1,5 \times 10^{-5}} \cong 2,16 \times 10^5 \quad (4.3)$$

O valor obtido para o parâmetro adimensional Re situa-se na gama de valores para o qual o escoamento é turbulento, pertencendo mesmo ao intervalo $Re > 2 \times 10^5$ que caracteriza escoamentos supercríticos (Cook N. , 1985). Como tal, pode considera-se que as características do escoamento e da distribuição de pressões se mantêm independentes da escala do modelo e da velocidade do escoamento (Simiu & Scanlan, 1996), isto é, que são garantidas condições de semelhança.

A opção de realização desta campanha experimental com base num perfil uniforme de velocidades do vento, não simulando uma camada limite atmosférica, prende-se com diversos fatores, entre eles:

- 1) Espessura extremamente reduzida (constante) do modelo de casca ensaiada

- 2) Estrutura base da casca – totalmente aberta
- 3) Desconhecimento sobre o espaço envolvente do que será a estrutura real

4.5. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO

Os coeficientes de pressão constituem um parâmetro adimensional que pode ser calculado através dos resultados dos ensaios em túnel de vento. O valor lido em cada tomada corresponde à pressão num ponto da superfície exterior ou interior da casca. A pressão medida pelo aparelho, $(p_s(x) - p_0)$, corresponde à pressão relativa entre a pressão superficial do modelo num ponto e a pressão estática do tubo de Pitot.

Na janela de leitura de resultados é possível observar dois valores de pressão, podendo fazer-se uma pré-avaliação rápida da variação em cada canal e perceção de eventuais problemas de montagem. O valor a utilizar na determinação do coeficiente de pressão é a média dos valores e cada aquisição.

A equação (3.4), $(cp = \frac{p_s(x) - p_0}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2})$ é utilizada no cálculo dos coeficientes de pressão. O denominador $(\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2 = p_d)$ refere-se à pressão dinâmica do escoamento, medida no canal escolhido para o efeito (Figura 4-14).

No início de cada ensaio é crucial a realização de um ensaio com o túnel desligado ($V=0$ m/s), para medição do “zero” da pressão em cada canal. No cálculo do coeficiente de pressão é necessário fazer a correção do valor médio da pressão para cada direção, através dos resultados “zero” correspondentes obtidos subtraindo o primeiro pelo segundo em cada canal. Desta forma, o numerador da equação (3.4) é na realidade $(p_s(x) - p_0 - p_{zero})$.

Ao serem realizados ensaios do modelo para a superfície externa e interna, são obtidos valores de coeficiente de pressão distintos (Cp_e) e (Cp_i) , sendo o valor final a considerar, $(Cp_e - Cp_i)$, de acordo com as expressões,

$$Cp_e = \frac{p_{se}(x) - p_{0e}}{p_d} = \frac{\Delta p_e}{p_d} \quad Cp_i = \frac{p_{si}(x) - p_{0i}}{p_d} = \frac{\Delta p_i}{p_d} \quad (4.5)$$

$$\Delta p = (Cp_e - Cp_i) p_d \quad (4.6)$$

$$(Cp_e - Cp_i) = \Delta Cp = \frac{\Delta p}{p_d} \quad (4.7)$$

em que,

Cp_e – representa o coeficiente de pressão externa

Cp_i – representa o coeficiente de pressão interna

p_d – representa a pressão dinâmica do escoamento

4.6. ERROS EXPERIMENTAIS

Erros sistemáticos dizem respeito a erros decorrentes da leitura e aquisição de dados. Estes erros, provenientes da precisão de aparelhos de medição e aquisição de dados, após manipulação matemática propagam-se, tomando proporções cada vez maiores.

Por outro lado, existem erros afetos ao próprio procedimento experimental. As causas podem ser variadas, mas maioritariamente prendem-se com a má colocação dos tubos plásticos das tomadas de pressão, que podem ficar obstruídos, dobrados ou mal colocados. As tomadas identificadas como danificadas durante o ensaio ou durante o tratamento de dados foram excluídas para efeitos de análise de resultados. Sempre que se identifica uma tomada imprópria, por exemplo num ensaio de pressões interna, a mesma tomada não é contabilizada durante o ensaio “homólogo” de pressões externas.

O correto posicionamento dos aparelhos de medição no interior do túnel é crucial para a minimização dos erros daqui decorrentes. A título de exemplo, na 2ª e 3ª fases de ensaio, durante os ensaios de medição de pressões exteriores, procurou sempre esconder-se (aparelhos de transdutores de pressão) por detrás da Fachada A, de forma a que a interferência no escoamento fosse mínima. Já durante os ensaios para medição de pressões internas a prioridade foi colocar estes instrumentos no centro da placa, procurando tapar a abertura ao máximo.

O modelo no interior do túnel de vento obstrui parcialmente a passagem de ar, e por sua vez produz uma aceleração do escoamento. A este fenómeno dá-se o nome de blocagem (Simiu & Scanlan, 1996). Este efeito é definido como a percentagem de área transversal da câmara de ensaios ocupada pelo modelo, ($A_{\text{modelo}}/A_{\text{túnel}}$). Segundo (Cook N. J., 1985) e (Matos *et al.*, 2010), este valor não deve exceder os valores entre 7% e 10%. Mendes 1995 refere que a blocagem, no caso de pontes, não deve exceder os 5% a 10%. A escala a adotar para o modelo, deve ter em conta, tanto a minimização dos efeitos de blocagem, como a não violação da semelhança de Reynolds, procurando um compromisso entre modelos de pequenos e grandes dimensões, respetivamente.

Neste caso em particular, os ensaios para os quais o modelo ocupa maior percentagem de área transversal da seção do túnel são:

- Caso 1F – ângulos de incidência 60°
- Caso 2F – ângulos de incidência de 60°, 180° ou 300°

Nestes casos, dada a área transversal do túnel (1,25x1,00m²), e a área transversal do modelo, calculada de forma conservativa, (0,455x0,162m²), pode afirmar-se que a % de blocagem ($A_{\text{casca}}/A_{\text{túnel}}=1,25/(0,455 \times 0,162)=5,9\%$) Figura 4-24. De acordo com (Cook N. J., 1985), esta percentagem é suficientemente baixa para que não se considerem alteração da velocidade do vento

junto à superfície do modelo, e conseqüentemente não se façam correções tendo em conta a blocagem.

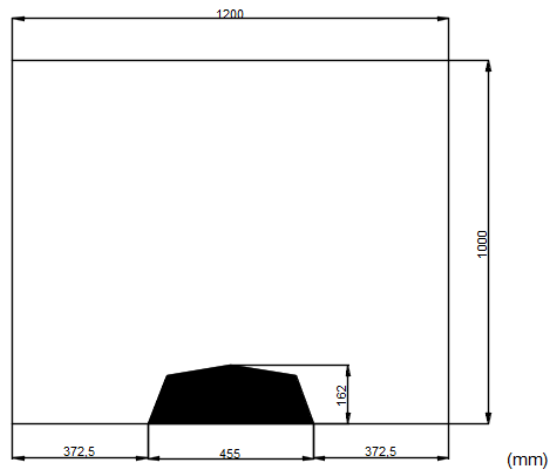


Figura 4-24- Dimensão da seção de ensaios do túnel de vento com o respetivo modelo de casca posicionada para: Caso 1F e ângulo de incidência do vento de 60°; Caso 2F e angulo de incidência de 60, 180° ou 300°

Comprovando que para esta situação a percentagem máxima de blocagem é garantida, pode afirmar-se que não existem situações no decorrer da campanha experimental em que o efeito de blocagem interfira com o normal fluxo de escoamento podendo desprezar-se este fenómeno.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo da campanha experimental é a caracterização da distribuição dos coeficientes de pressão resultantes (ΔC_p) na superfície da casca, em função do ângulo de incidência do vento e da incorporação de fachadas no modelo, de forma a analisar as cargas aplicadas neste tipo de estruturas leves. Neste sentido, apresentam-se os resultados obtidos nas três fases de ensaios: modelo sem fachadas (Caso 0F), modelo com uma fachada (Caso 1F) e modelo com duas fachadas (Caso 2F).

Na seção 4.5 é descrito o método pelo qual os valores de pressão relativa – resultantes dos ensaios experimentais – se traduzem em valores de C_p internos e externos à superfície da casca. A análise de resultados é feita com base no valor de C_p resultante (ΔC_p), em determinado ponto, correspondente à diferença entre o valor do coeficiente de pressão medido no exterior ($C_{p_{ext}}$) e no interior ($C_{p_{int}}$) da superfície de casca (4.7). A representação é feita através de gráficos de isolinhas de coeficiente de pressão, desenhadas por interpolação de valores discretos conhecidos, que correspondem às tomadas de pressão. De forma a facilitar e melhorar a leitura dos resultados, foram testados diferentes métodos de interpolação dos dados. Na Figura 5-1 é possível visualizar a distribuição de ΔC_p com base em diferentes métodos de interpolação de dados para as mesmas condições de ensaio – vento 0° , e para o modelo sem fachadas.

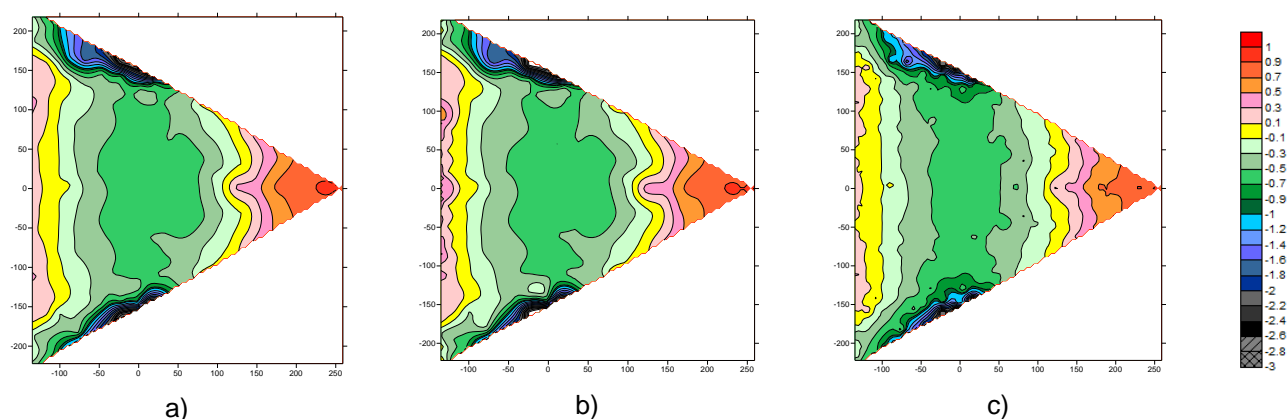


Figura 5-1- Distribuições de coeficientes de pressão para o modelo sem fachadas, incidência do vento 0° segundo os métodos de interpolação: a) Kriging, b) Mínima curvatura e c) Inverso da distância

As ligeiras diferenças entre as distribuições devem-se ao facto de cada método corresponder a um algoritmo diferente, atribuindo pesos diferentes a cada nó da malha. A Tabela 5-1 resume as características dos métodos mais importantes referindo vantagens e desvantagens de cada um.

Tabela 5-1- Comparação entre alguns métodos de interpolação, adaptado de (Landim, 2000)

Método de interpolação	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão
<i>Krigagem</i>	2	3	5	1
Inverso da distância	3	4	2	4
Superfície	5	1	3	2
Mínima curvatura	4	2	4	3

(1- melhor; 5-pior)

Analisando a classificação de cada método para os parâmetros descritos em Tabela 5-1, verifica-se que o método *Kriging* é o que apresenta melhor precisão e também mais fidelidade aos dados originais. Constrói ainda gráficos com uma suavidade moderada, embora a uma velocidade de processamento baixa. Através da Figura 5-1 é também possível observar que este método é o que gera uma distribuição mais uniforme. Por estas razões optou-se por utilizar este método para a análise e exposição de resultados relativos a todos os ensaios experimentais. O método *krigagem* é também um dos mais apropriados quer para conjuntos de dados pequenos (<250 observações), quer para moderados (250 a 1000 observações (Neto, 2011)) (Golden Software, Inc., 2002), sendo que os conjuntos de dados analisados neste caso se enquadram nos intervalos descritos – modelo sem fachadas: 269 pontos, modelo com uma e duas fachadas: 124 pontos.

5.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS

Como foi já referido no capítulo 4, a 1ª fase de ensaios corresponde ao ensaio da casca sem fachadas (Figura 5-2 - Caso 0F), com largura máxima nas aberturas de 0,455 m e altura máxima de 0,168 m. Este modelo é utilizado como termo de comparação face aos restantes modelos que incluem fachadas e que se consideram de complexidade acrescida na sua geometria. Os ensaios foram realizados em túnel de vento de circuito fechado do LNEC, em regime uniforme de velocidade a 20 m/s, após testes de sensibilidade ao número de Reynolds referidos em 4.4.3, para um total de 119 tomadas de pressão colocadas na zona Z1 da superfície da casca (Figura 4-18). A partir deste conjunto de tomadas, foi possível chegar a 714 valores de pressão distribuídos pela superfície, dos quais se analisam agora 269 valores. O modelo foi ensaiado para os ângulos de incidência de 0, 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 140, 160, 180, 205, 240, 270, 300, 330, 340 e 350 graus, na superfície interna e externa, separadamente.

Os ensaios em túnel de vento dos modelos com uma e duas fachadas constituem a 2ª e 3ª fases da campanha experimental, Figura 5-2 - Caso 1F e Caso 2F. As configurações da casca foram apresentadas no capítulo 4 e ensaiadas de igual forma em túnel de vento de circuito fechado do LNEC, em regime uniforme e a uma velocidade de 20 m/s. Nestes dois casos as configurações do modelo não são simétricas em relação a todos os eixos, pelo que os ensaios foram realizados na

totalidade da superfície da casca, com 124 tomadas de pressão uniformemente distribuídas pela superfície. A Fachada A foi também alvo de ensaio, colocando-se 30 tomadas de pressão distribuídas pela totalidade da área da fachada. Os ensaios foram realizados para ângulos de incidência do vento de 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330°.

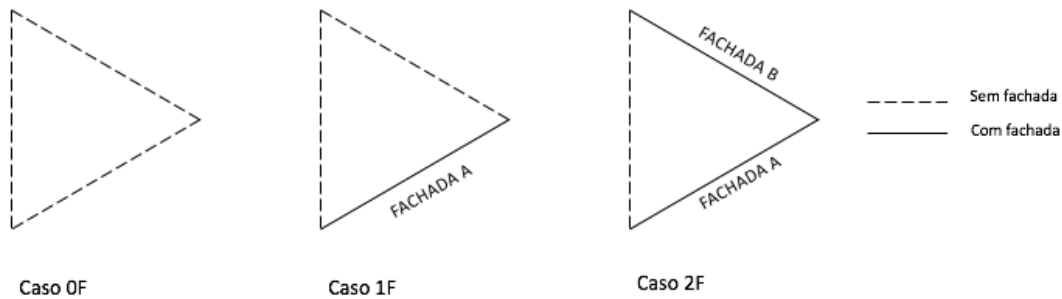


Figura 5-2- Esquema ilustrativo dos três casos estudados. Caso 0F – modelo sem fachadas; Caso 1F – modelo com uma fachada; Caso 2F – modelo com duas fachadas

No presente capítulo faz-se uma análise comparativa entre os resultados de ΔC_p dos três modelos – Casos 0F, 1F e 2F – e para cada um dos ângulos de ataque: 0°, 60°, 120°, 180°, 240° e 300°. Considera-se este conjunto de ângulos uma amostra representativa da totalidade dos ensaios realizados. Para além da visualização daqueles resultados sob forma de distribuições de ΔC_p na superfície, analisam-se as variações daquele parâmetro ao longo de uma linha sobre a casca na direção do vento, segundo os três alinhamentos – alinhamento 0/180, alinhamento 60/240 e alinhamento 120/300 – correspondentes aos três eixos de simetria da superfície da casca, Figura 4-17. A posição das tomadas de pressão sobre os alinhamentos é identificada através do parâmetro adimensional (x/L), em que x é a distância da origem do alinhamento ao ponto e L é o comprimento do alinhamento ($L \cong 394\text{mm}$).

5.2.1. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 0°

A distribuição de ΔC_p segundo o alinhamento 0/180, direção do escoamento para 0°, é analisada para os três casos, 0F, 1F e 2F, em Figura 5-3.

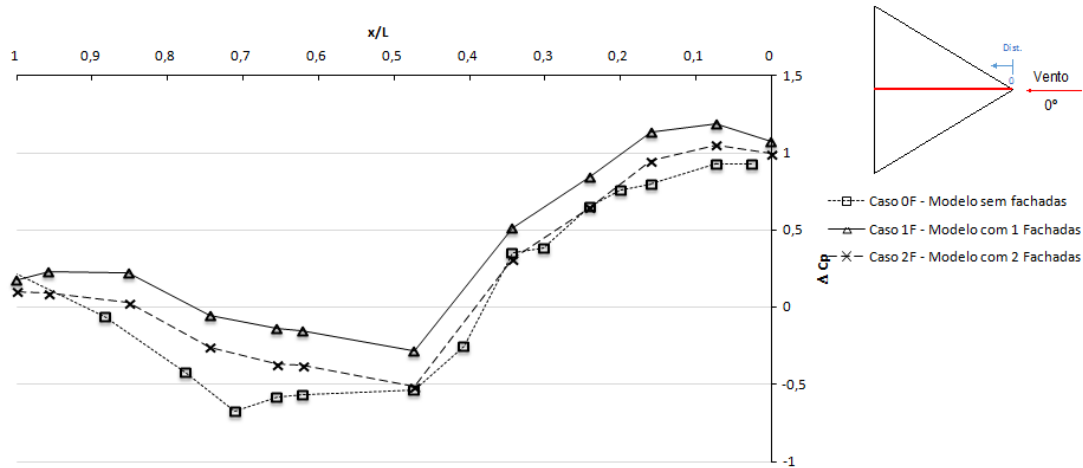


Figura 5-3- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0°. Alinhamento 0/180.

Para uma incidência do vento a 0° e analisando o alinhamento em questão, pode afirmar-se que os três modelos têm comportamentos muito semelhantes. Os coeficientes de pressão seguem a mesma tendência, sendo que para o caso 1F os valores de ΔC_p são sempre superiores aos outros dois casos, com valores de pressões mais elevados e suções menos acentuadas. Pode observar-se um pico positivo comum aos três casos a $\sim 0,1 L$, e um pico negativo a $\sim 0,5L$ (correspondente ao ponto mais alto da casca). O valor máximo de pressão observado para esta direção do vento é de ($\Delta C_p = +1,25$) para o caso 1F, e o valor mínimo é de ($\Delta C_p = -0,3$) registado para o caso 0F.

O ponto de estagnação sobre o apoio 1, ponto na superfície para o qual o valor da pressão é máximo e a velocidade do escoamento é nula (Cook N. , 1985), coincide nos três casos. Tendo em consideração que a estrutura é aberta e que foram realizados ensaios na superfície externa e interna, pode dar-se o caso do valor de ΔC_p ser superior a 1. Este fenómeno verifica-se precisamente sobre o apoio 1 para o Caso 1F ($\Delta C_p = +1,19$), no primeiro ponto do alinhamento analisado em Figura 5-3, e pode ser explicado por pressões positivas do lado exterior ($C_{p_{ext}} = +0,71$) e suções do lado interior ($C_{p_{int}} = -0,48$). A zona de separação do escoamento posiciona-se neste caso, a aproximadamente $\sim 0,35L$.

Na Figura 5-4 observam-se as distribuições de ΔC_p em toda a superfície da casca.

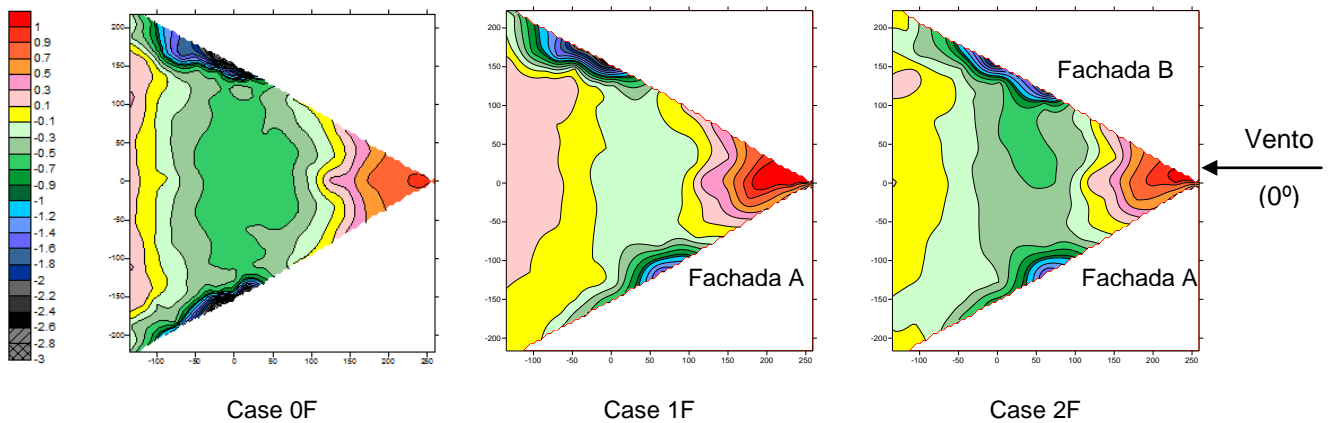


Figura 5-4- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0° .

Pela observação das distribuições distintas de ΔC_p nos três casos é possível concluir:

- A existência de duas zonas simétricas, junto das arestas laterais a cerca de $x/L=0,75$, de forte sucção ($\Delta C_p = -2,8$), na configuração 0F;
- A natural assimetria da distribuição de ΔC_p com a inclusão de uma fachada (1F) mantendo-se a zona de forte sucção na aresta sem fachada. Sobre a zona central os valores de ΔC_p são menos negativos;
- Na configuração 2F esperar-se-ia nova distribuição simétrica para esta incidência. Um possível desalinhamento do modelo, ou a existência de uma saliência (pala) do lado da fachada A, provocando alguma assimetria na interação escoamento-modelo e consequentemente na distribuição de ΔC_p pode justificar a assimetria verificada.

Estas fortes suções, junto dos bordos A e B, nos casos 0F e 1F devem-se ao facto de, devido à forma da casca e da ausência de fachada, o escoamento separar junto das arestas.

Os valores obtidos no presente estudo para o modelo de casca triangular são da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados no estudo de Ferreira (2013) que analisou separadamente os valores de coeficientes de pressão interna e externa em modelos de casca pentagonais e hexagonais. Tendo em consideração o modelo de 5 apoios e a direção do vento de 0° , e os valores de pressão interna e externa no modelo, Ferreira (2013) obteve um valor médio de ΔC_p na zona do apoio, em que o escoamento incide diretamente, de $\sim(+0,9)$. O centro da superfície da casca apresenta valores de sucção máximos de $\sim(-0,85)$. Ambos os valores, que caracterizam diferentes zonas da casca, são próximos dos obtidos no modelo triangular em estudo.

O número de Reynolds em Ferreira 2013, utilizado na simulação numérica com elementos finitos é de $Re=1,08 \times 10^6$, situando-se na mesma gama de valores que caracteriza a campanha experimental desenvolvida no presente estudo, $Re \cong 2,8 \times 10^5$. Para estes valores o regime de escoamento é turbulento, pelo que as distribuições de pressões bem como as características do escoamento são independentes da escala do modelo e do valor da velocidade (Gomes, 2003).

5.2.2. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 60°

Para um ângulo de incidência de 60° o vento incide perpendicularmente à abertura no caso 0F, e perpendicularmente à fachada A nos casos 1F e 2F. A Figura 5-5 ilustra a variação de ΔC_p ao longo do alinhamento 60/240.

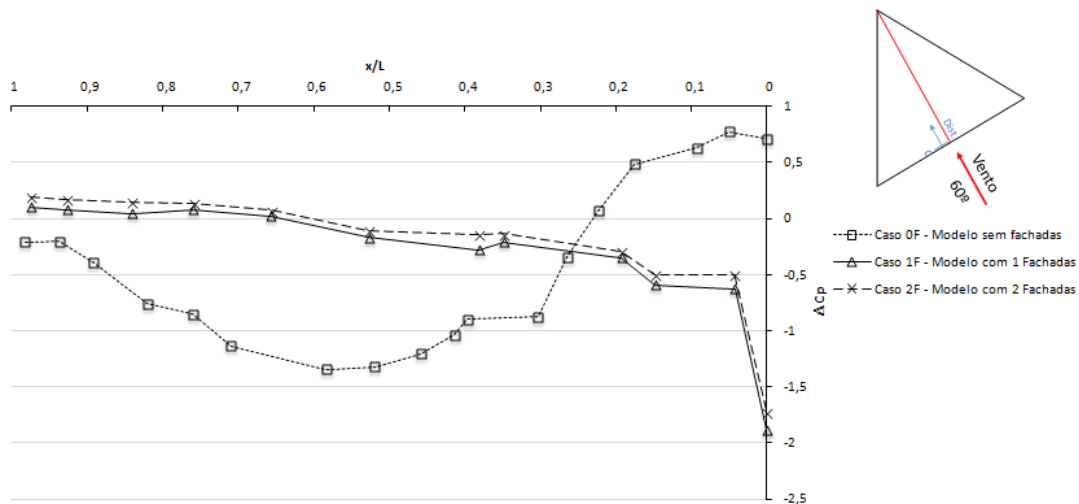


Figura 5-5- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 60°. Alinhamento 60/240.

É notória a diferença no andamento dos valores de ΔC_p entre os casos 0F e os casos 1F e 2F. Observa-se uma tendência de ΔC_p decrescente no caso 0F, e uma tendência crescente nos casos 1F e 2F. Para o caso 0F fazem-se sentir pressões desde a zona inicial da superfície até $\sim 0,25L$. A partir desse ponto os valores de ΔC_p são negativos atingindo um mínimo para $0,6L$ ($\Delta C_p = -1,4$), voltando depois a crescer até ($\Delta C_p = -0,2$).

O comportamento do escoamento varia muito no caso dos modelos que contêm a fachada A. A posição da fachada, com a formação da pala, provoca suções bastante acentuadas, as tomadas na zona da pala atingem valores de ($\Delta C_p = -2,0$) nos casos 1F e 2F (Figura 5-6). A zona da pala, correspondente a $\sim 0,05L$ inicial, é caracterizada por um gradiente de pressões muito elevado, dado que ΔC_p varia entre ($\Delta C_p = -2,0$) e ($\Delta C_p = -0,5$) nesta curta distância. A partir deste ponto os valores de ΔC_p aumentam, sendo o gradiente significativamente menor, até atingirem valores de ΔC_p próximos de 0 para $x=L$. O zoom realizado nesta zona da superfície de casca (Figura 5-6) é ilustrativo desta variação, com a passagem por várias gamas de valores de ΔC_p .

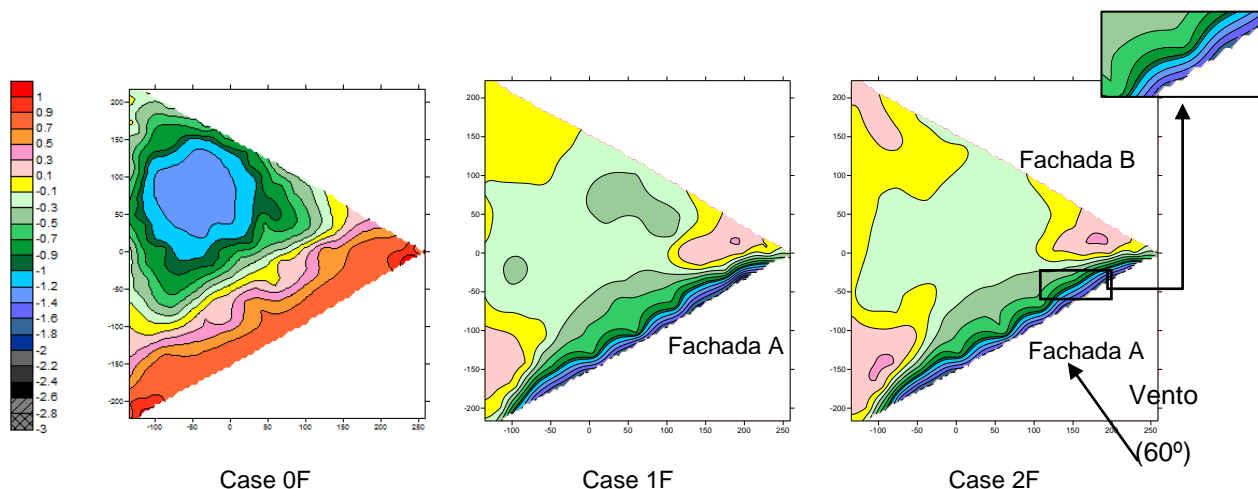


Figura 5-6- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 60°.

Pela observação das distribuições distintas de ΔC_p nos três casos é possível concluir:

- A diferença na configuração dos modelos para um ângulo de incidência 60° produz um efeito muito acentuado comparativamente com a análise feita para 0°. Esta diferença é mais significativa entre o caso 0F e os casos 1F e 2F, dado que o vento para os casos 1F e 2F incide segundo a fachada A;
- Na configuração 0F, a distribuição de ΔC_p na superfície apresenta uma zona de sucção bem definida, com valores até ($\Delta C_p = -1,4$);
- A zona a barlavento encontra-se sobre pressões no caso 0F e sob sucções nos casos 1F e 2F. Nos últimos dois casos, a separação do escoamento imposta pela pala na fachada A provoca sucções que se estendem por quase toda a superfície da casca;
- Nas configurações 1F e 2F as áreas de ΔC_p positivos (pressão) são muito reduzidas e posicionam-se na parte de trás dos apoios 1 e 2.

Para os casos 1F e 2F, fachada A foi monitorizada e os resultados (ΔC_p) são semelhantes para ambas as configurações do modelo (Figura 5-7).

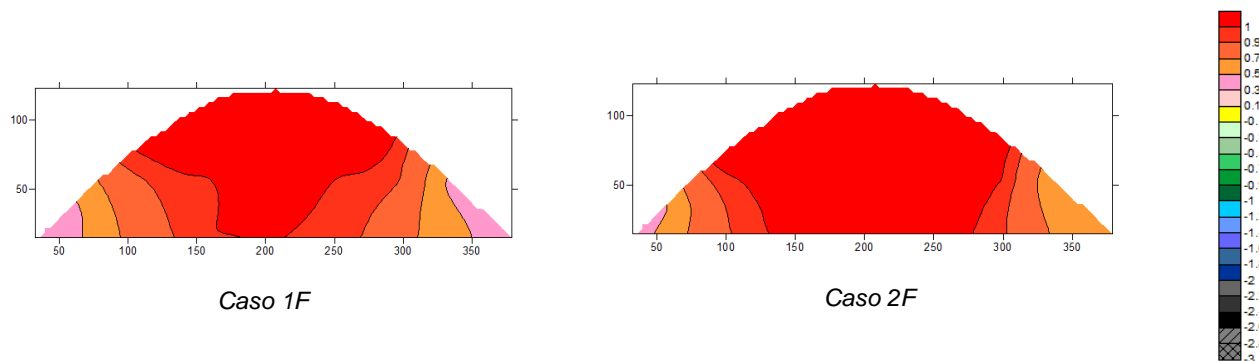


Figura 5-7- Distribuições de coeficientes de pressão na fachada A, para ângulo de incidência 60°.

Pela observação da Figura 5-7, praticamente toda a área da fachada apresenta valores unitários de ΔC_p , tornando a fachada numa enorme zona de estagnação do escoamento. Cook (1985) ilustra o trajeto das linhas de corrente quando o escoamento incide diretamente sobre uma parede vertical (Cook N. , 1985) (Figura 5-8).

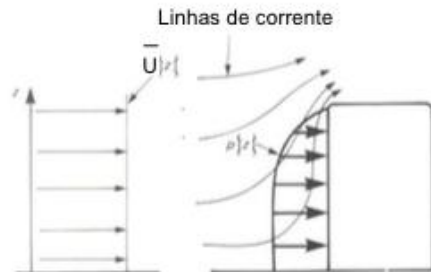


Figura 5-8- Distribuição de pressões numa fachada vertical frontal, sob influência de um perfil de velocidades uniforme. Adaptado de (Cook N. , 1985)

Naturalmente o modelo de casca estudado, ao apresentar uma pala, altera o trajeto das linhas de corrente na aresta da cobertura, face ao que acontece na Figura 5-8, onde o escoamento sofre uma separação muito mais acentuada.

A fachada B, existente apenas no caso 2F, não tem qualquer influência no escoamento (no exterior da casca), pelo que o comportamento dos modelos nos casos 1F e 2F é idêntico – distribuições ΔC_p na superfície da casca e na fachada A idênticas. A fachada B apresenta uma distribuição de ΔC_p ilustrada pela Figura 5-9 (equivalente à distribuição de ΔC_p na fachada A para um ângulo de incidência de 300°). Os valores constantes em toda a fachada ($C_{p_{ext}}=-0,4$) e ($C_{p_{int}}=-0,4$), para a superfície exterior e interior respetivamente, resultam num valor final ($\Delta C_p=0$). Os valores em módulo $C_{p_{ext}}$ e $C_{p_{int}}$ serem consideravelmente reduzidos significa que a fachada não tem uma interação forte com o escoamento.

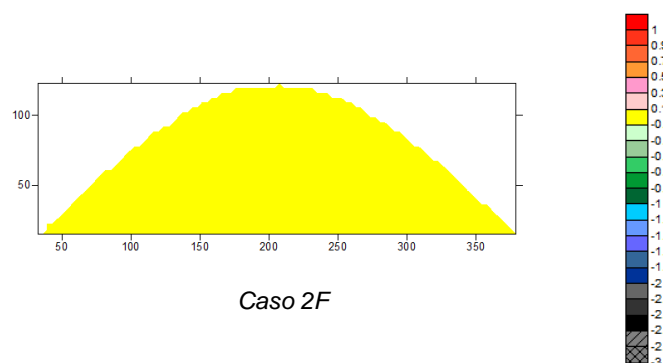


Figura 5-9- Distribuições de coeficientes de pressão na fachada B para ângulo de incidência 60° .

5.2.3. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 120°

Para um ângulo de incidência de 120° o vento incide segundo o apoio 2 do modelo. Observando a Figura 5-10 é possível fazer uma análise da interação vento-estrutura segundo o alinhamento 120/300.

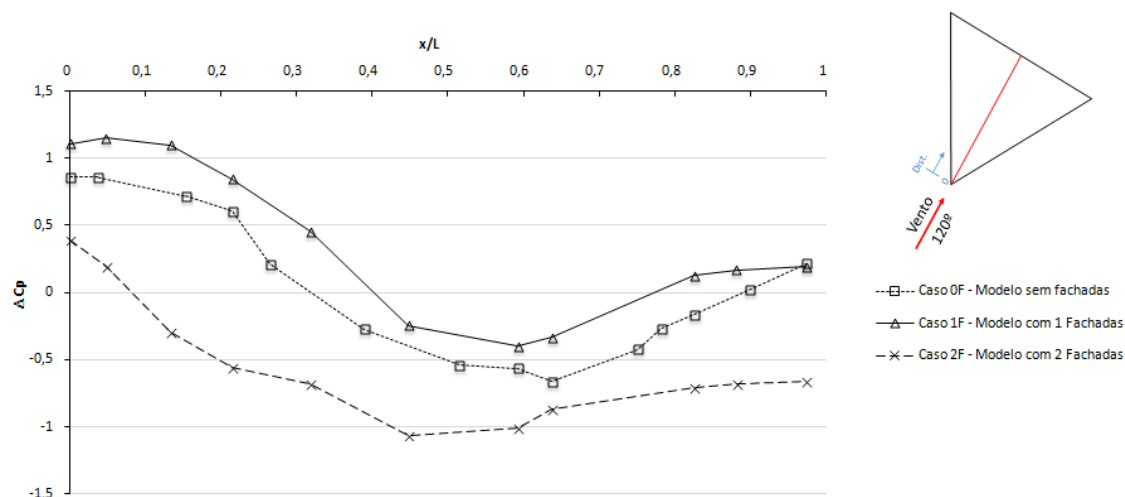


Figura 5-10- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 120°. Alinhamento 120/300.

Os valores de ΔC_p nas tomadas de barlavento – origem do alinhamento – são próximos da unidade para os casos 0F e 1F, sendo que para 1F, Figura 5-10. O andamento das pressões sobre o alinhamento 120/300 é semelhante nos três casos, com uma zona de decréscimo de pressões desde o início do alinhamento até $\sim 0,5L/ 0,6 L$, e uma zona crescente até L .

Comparativamente com a análise feita para o ângulo 0°, segundo o alinhamento 0/180, apenas difere o andamento de ΔC_p no caso 2F, apresentando neste caso (ângulo 120°) valores consideravelmente mais baixos. Para os casos 0F e 1F os valores de ΔC_p são naturalmente semelhantes.

O caso 2F mantém sempre valores inferiores aos restantes casos ao longo de todo o alinhamento. Para este caso o valor de ΔC_p não volta a atingir valores positivos no trecho crescente, mantendo valores de sucção relativamente baixos, entre ($\Delta C_p = -1$) e ($\Delta C_p = -0,7$).

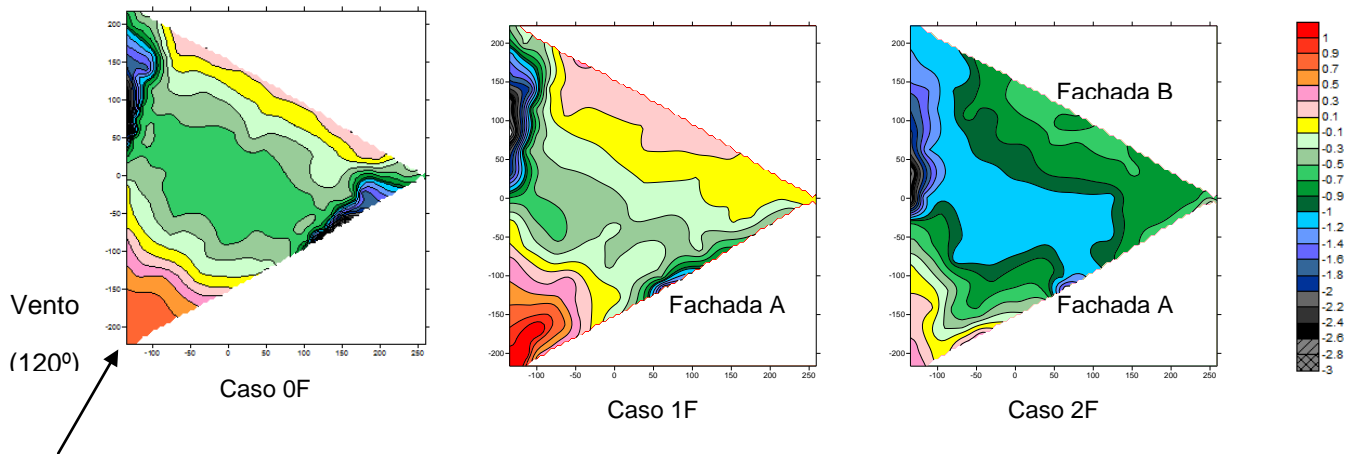


Figura 5-11- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 120°.

Observando as distribuições da Figura 5-11, verifica-se que:

- Nos casos 0F e 1F existe uma zona em que os valores de $C_{p_{int}}$ e $C_{p_{ext}}$ se igualam, e que representa a transição entre a zona de sucções e a zona de pressões muito reduzida;
- A distribuição de ΔC_p , na configuração 2F, exhibe valores de sucção acentuados na grande maioria da superfície da casca, ao contrário do que acontece nos casos 0F e 1F, devido ao aumento de pressão na superfície interna da casca (para que contribui o posicionamento da fachada B), contribuindo para um valor resultante ΔC_p ainda mais negativo;
- Para este ângulo de incidência, à semelhança do que acontece para 0°, formam-se 2 zonas simétricas de sucções fortes no caso 0F. Nos casos 1F e 2F esta zona é mais acentuada no bordo C por este não ter fachada, sendo que no lado da fachada A este fenómeno é muito reduzido (praticamente inexistente no caso 2F).

5.2.4. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 180°

Para o ângulo de incidência do vento 180°, analisa-se novamente o alinhamento 0/180, à semelhança do ângulo 0°, mas desta vez percorrendo a casca no sentido inverso. É importante referir que nenhum dos casos estudados apresenta fachada no bordo 3, bordo sobre o qual o vento incide diretamente.

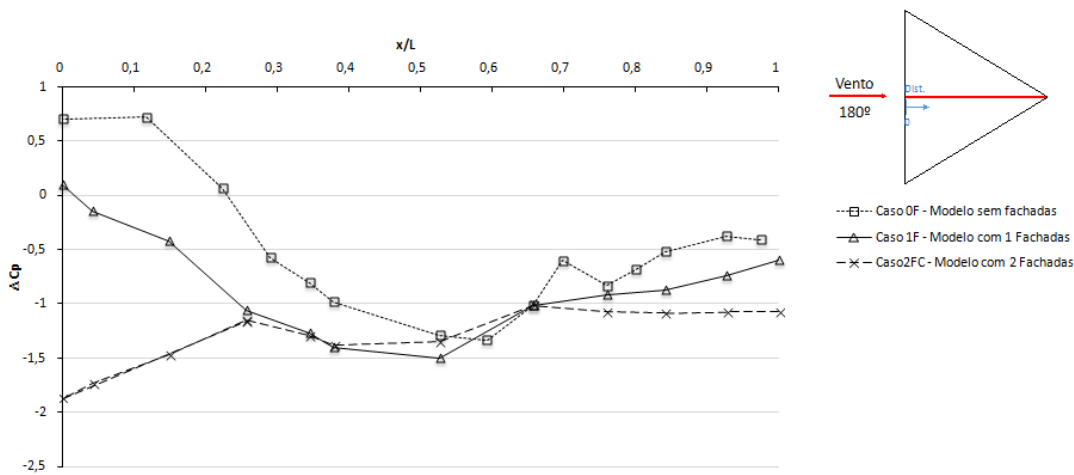


Figura 5-12- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 180°. Alinhamento 0/180.

Pela figura Figura 5-12, pode observar-se que os valores nas tomadas iniciais do alinhamento são muito diferentes para os três casos. No caso 2F o valor é particularmente baixo ($\Delta C_p = -1,8$), no caso 1F o valor é praticamente nulo e no caso 0F o valor é positivo ($\Delta C_p = +0,7$). À medida que se percorre o alinhamento os valores de ΔC_p nos três casos vão se aproximando tendendo para valores negativos de ΔC_p , entre ($\Delta C_p = -1$) e ($\Delta C_p = -0,5$) a sotavento.

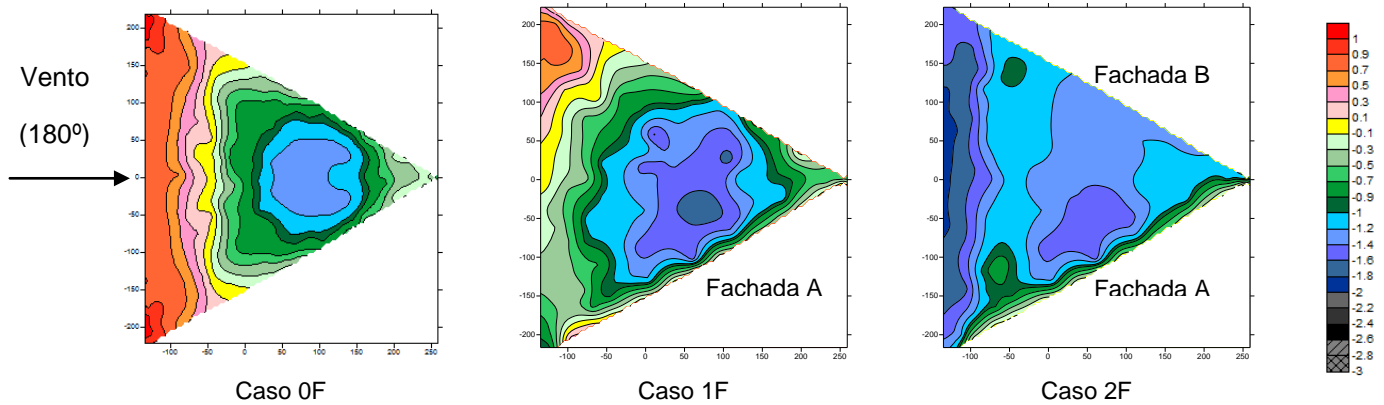


Figura 5-13- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 180°.

Das distribuições de ΔC_p , Figura 5-13, para este ângulo de incidência destaca-se:

- Uma mancha de sucções mais acentuada até ($\Delta C_p = -1,4$) nos casos 0F e 1F. No caso 1F verifica-se que a mancha toma proporções maiores, apresenta valores mais negativos e desloca-se em direção à fachada. Este facto deve-se à presença da fachada A que torna a distribuição de ΔC_p assimétrica;
- No caso 0F, como seria de esperar, a distribuição de ΔC_p obtida é idêntica à distribuição para o ângulo de incidência de 60°, rodada 120° no sentido horário;

- No caso 2F a distribuição de ΔC_p apresenta valores consideravelmente negativos comparativamente com os restantes casos. O escoamento ao “entrar” no modelo de casca fica confinado entre as duas fachadas A e B, formando uma enorme bolha de pressões positivas na superfície interna. A superfície apresenta valores médios de ($\Delta C_{p_{med}} = -1,5$);
- No caso 2F verifica-se que a distribuição não é simétrica, apresenta uma faixa longitudinal ao longo da fachada A caracterizada por valores de ΔC_p menos acentuados, que variam entre ($\Delta C_p = -0,9$) e ($\Delta C_p = -0,1$). Este facto deve-se à forma como as fachadas estão colocadas, mais propriamente à existência de uma pala no lado da fachada A.

5.2.5. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 240°

Nos ensaios para um ângulo de incidência de 240°, tanto a configuração 0F como 1F são simétricas em relação à direção do escoamento (alinhamento 60/240). Dada esta característica, é expectável que as distribuições de pressão obtidas sejam também simétricas.

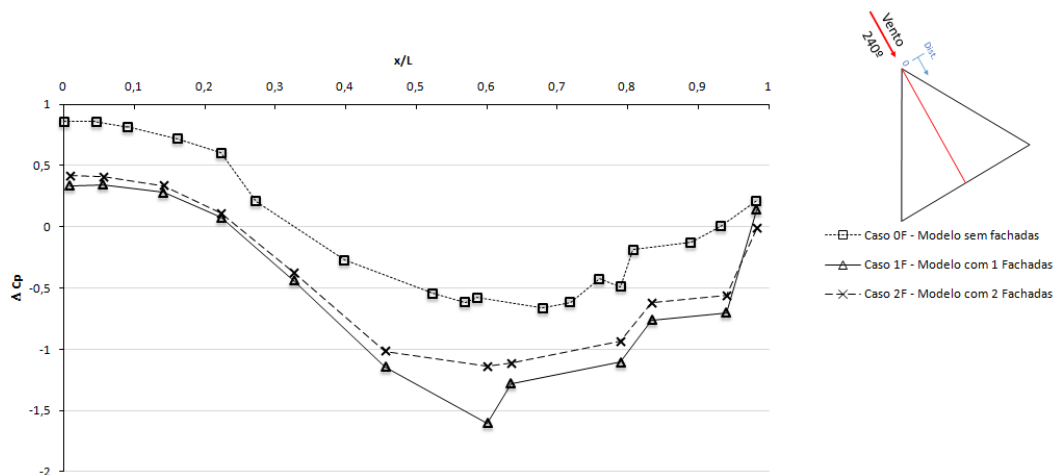


Figura 5-14- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 240°. Alinhamento 60/240.

Analisando os valores de ΔC_p no alinhamento 60/240 (Figura 5-14), para os casos 0F, 1F e 2F é possível observar que o andamento dos valores de ΔC_p é idêntico. Nos casos 1F e 2F os valores são sempre próximos e mais baixos relativamente aos valores para o caso 0F, apresentando uma diferença constante de aproximadamente 1 valor.

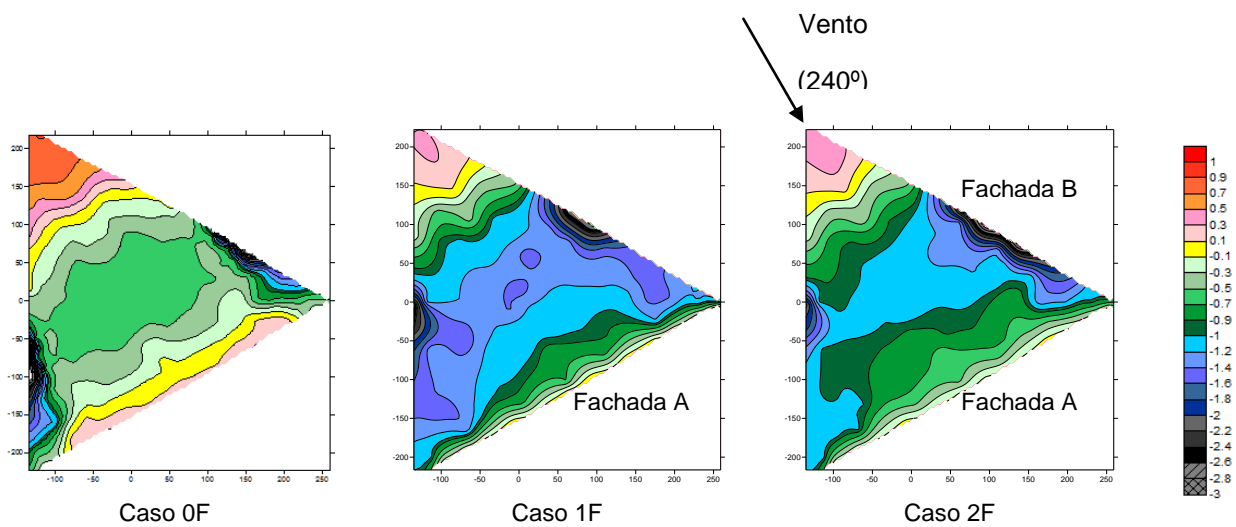


Figura 5-15- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 240°.

Da observação dos resultados, quer dos valores de ΔC_p sobre o alinhamento quer das distribuições de ΔC_p na superfície da casca, verifica-se que:

- As três distribuições (Figura 5-15) têm padrões de semelhantes, o que está de acordo com o andamento dos valores sobre o alinhamento (Figura 5-14) que é também semelhante nos três casos. Em termos de valores existe uma clara diferença entre o caso 0F e os casos 1F e 2F que apresentam valores significativamente inferiores;
- Comparando os casos 1F e 2F com o caso 0F, verifica-se que i) os valores de ΔC_p na zona do apoio 3 (zona para a qual o escoamento incide diretamente) são mais reduzidos, ii) a faixa de valores nulos recua para montante, e iii) as suções são mais acentuadas em toda a superfície. A explicação para o ponto iii) prende-se com a existência das fachadas que condicionam a pressão no interior da casca;
- O caso 1F é o caso para o qual os valores de sucção são mais acentuados, até ($\Delta C_p = -1,6$) no centro da superfície,
- O caso 2F apresenta valores de sucção na superfície intermédios, entre os casos 0F e 2F. A existência da fachada B impõe no interior a pressão de base a barlavento da estrutura;
- Nos casos 1F e 2F os valores nas últimas tomadas analisadas sobre o alinhamento 60/240 ($x=L$) são positivos. O mesmo não acontece para o ângulo de incidência já analisada 120° (Figura 5-10), no caso 2F – caso semelhante mas em que a fachada correspondente é a fachada B e que não apresente saliência. Assim sendo, este facto explica-se precisamente pela existência da pala.

Ao analisar especificamente os valores de $C_{p_{int}}$ no interior da casca, para o caso 1F, verificaram-se valores positivos ($C_{p_{int}} > 0$) na superfície interior do apoio, quando à partida seria de esperar valores de $C_{p_{int}}$ negativos. Este fenómeno foi explicado através da colocação de alguns fios de lã (Figura 5-16), que elucidaram o trajeto das linhas de corrente e a formação de “bolhas” de recirculação nas arestas que provocam a convergência do escoamento sob o apoio. O valor ΔC_p resultante é (+0,3) (Figura 5-15), assim, inferior ao expectável.

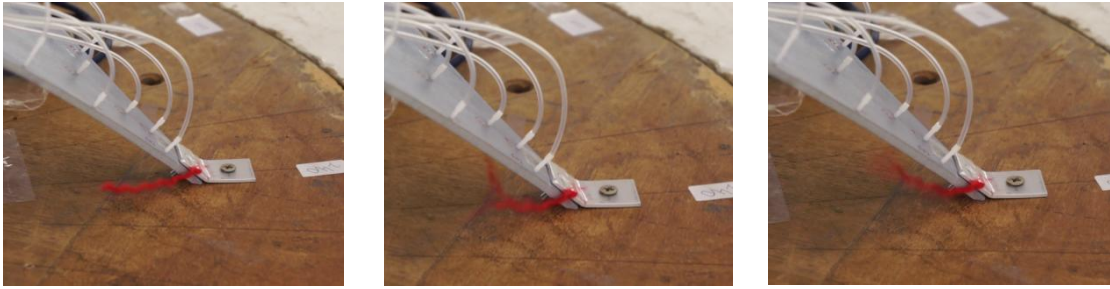


Figura 5-16- Sequência de imagens correspondentes ao escoamento sob a zona do apoio no caso 1F, para um ângulo de incidência de 240°

(Cook N. , 1985) descreve o trajeto das linhas de corrente na zona de esteira quando o escoamento encontra obstáculo (Figura 3-11). Na região de recirculação do fluxo imediatamente atrás do corpo (*near-wake circulation*), forma-se um par de vórtices verticais, um em cada lado do obstáculo. Parte do fluxo, gerado pela camada de corte por cima da cobertura, tende a circular naquela zona e puxar os vórtices para cima (Cook N. , 1985). O fluxo sob a zona do apoio no modelo de casca pode ser descrito de igual forma, com formação de vórtices de determinada inclinação, dependendo da inclinação da superfície, sendo que neste caso tem alguma inclinação. Este fenômeno, identificado para neste caso específico para um ângulo de 240°, é também característico de outros ângulos de incidência, sempre que o vento incida na direção do apoio, e não existam fachadas colocadas lateralmente.

5.2.6. ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 300°

A Figura 5-17 ilustra o andamento de coeficientes de pressão resultantes sobre o alinhamento 120/300.

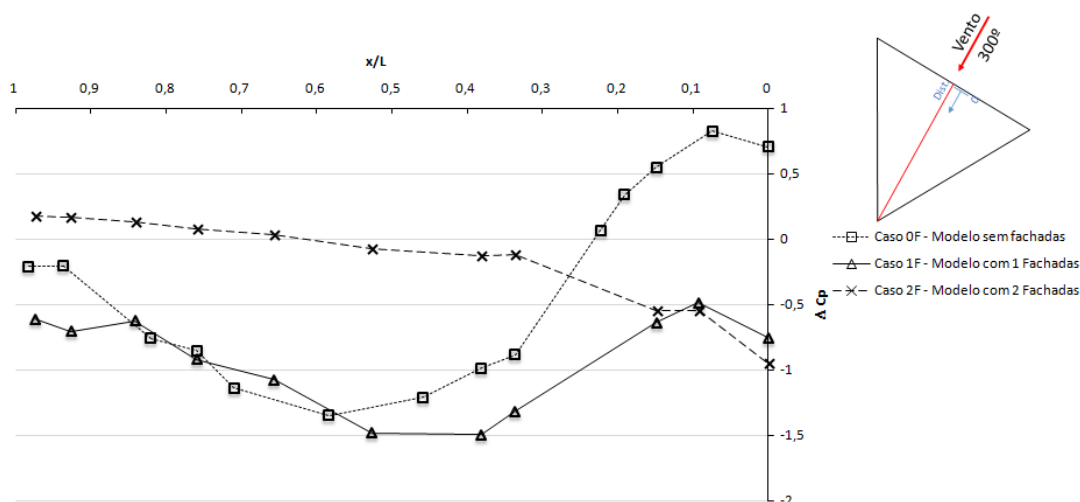


Figura 5-17- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 300°. Alinhamento 120/300.

Como seria de expectável, o andamento dos valores de ΔC_p (Figura 5-17) para o caso 0F, segundo 300° , é idêntico ao obtido para os ângulos de incidência de 60° (Figura 5-5) e de 180° (Figura 5-12). O caso 1F apresenta, sobre este alinhamento, valores significativamente mais baixos do que o caso 0F, mas com um andamento algo semelhante. Para o caso 2F, os valores de ΔC_p são claramente crescentes desde a origem do alinhamento até ($x=L$), variando entre ($\Delta C_p = -1,0$) e ($\Delta C_p = +0,2$), de forma aproximadamente linear e com um gradiente reduzido.

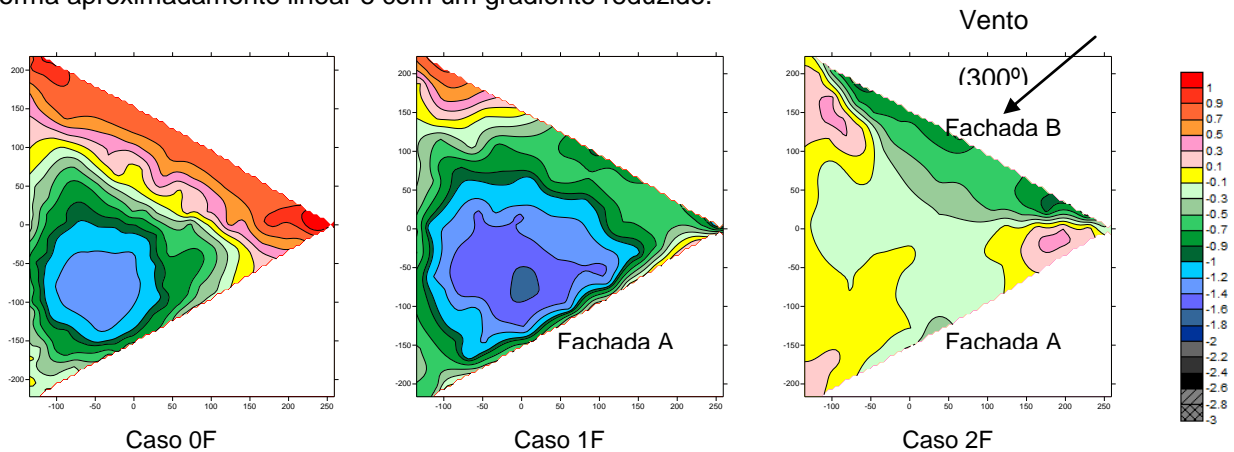


Figura 5-18- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F 1F e 2F, para ângulo de incidência 300° .

Da análise dos resultados verifica-se que:

- No caso 0F a distribuição de ΔC_p é idêntica, naturalmente, à distribuição obtida para 60° e 180° ;
- No caso 1F, a distribuição de pressões (Figura 5-18) é simétrica à distribuição segundo o ângulo de incidência de 180° (Figura 5-13), em relação ao alinhamento 60/240;
- No caso 2F, a distribuição de ΔC_p não é simétrica à distribuição para o ângulo 60° (Figura 5-6), como poderia ser expectável à primeira vista. Para 60° o vento incide na direção da fachada A, com a particularidade da saliência (pala). Enquanto que no caso do ângulo 300° o escoamento incide na direção da fachada B, a qual não contempla este pormenor estrutural;
- No caso 2F, a zona inicial da superfície da casca regista as suções mais acentuadas. Comparando com a incidência segundo 60° , que apresenta junto da fachada A ($\Delta C_p = -2,0$) (Figura 5-6), neste caso os valores junto da fachada B são ligeiramente superiores ($\Delta C_p = -1,0$), o que pode ser explicado pela existência da pala na fachada A;
- No caso 2F, a existência da pala na fachada A, a jusante do escoamento, não tem qualquer influência na distribuição de pressão;
- No caso 2F, a distribuição de ΔC_p na fachada A para este caso é uniforme e de valor nulo, à semelhança do que acontece com a fachada B para o ângulo de 60° (Figura 5-9).

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho incide maioritariamente sobre a determinação experimental de coeficientes de pressão numa estrutura em forma de casca curvilínea de três apoios. Esta análise, pela especificidade da forma, é algo que não consta na bibliografia regulamentar. A necessidade da realização de campanhas experimentais neste caso é evidente, de forma a caracterizar a estrutura e aprofundar o conhecimento sobre a sua interação com o vento.

A introdução de novas formas arquitetónicas e de novos sistemas construtivos, potencia um trabalho conjunto entre arquitetos e engenheiros no sentido de desenvolver formas cada vez mais esbeltas, garantindo uma solução equilibrada, viável e segura. O recurso a novos materiais, como a fibra de vidro, tem contribuído bastante para esta evolução.

A definição da ação do vento bem como a sua interação com estruturas é o foco do texto regulamentar (Eurocode 1 : Actions on Structures - Part 1-4: Wind Action). A regulamentação faz uma classificação de estruturas por tipologias, separando fachadas de coberturas e sugerindo valores de coeficientes de pressão para “estruturas-tipo”. As cascas, superfícies curvas com formas livres, não se encontram naturalmente abrangidas pela regulamentação.

Como objetivo da presente dissertação definiu-se a caracterização aerodinâmica de cascas de forma livre triangular, através da determinação dos coeficientes de pressão em túnel de vento. Para este efeito foi construído um modelo de casca com três apoios, à escala 1/50, e de duas fachadas, como peças separadas. A combinação das peças resultou em 3 configurações distintas, ensaiadas em regime de escoamento uniforme no túnel de vento de circuito fechado do LNEC. O primeiro modelo, sem qualquer fachada, foi ensaiado com uma elevada densidade de tomadas de pressão (cerca de 119 tomadas) colocadas apenas em parte da casca, e para um elevado número de ângulos de incidência do vento bastante alargado (19 incidências). O ensaio deste modelo constituiu o 1º teste ao comportamento da estrutura e às hipóteses conservativas inicialmente colocadas, sobre a densidade de tomadas e ângulos de incidência do vento. O segundo e terceiro modelos, com uma e duas fachadas respetivamente, foram ensaiados com tomadas de pressão colocadas em toda a superfície da casca, e numa das fachadas, para vários ângulos de ataque.

Relativamente às técnicas experimentais e hipóteses descritas, foi possível retirar algumas conclusões principais:

- para a determinação e análise dos coeficientes de pressão na superfície do modelo em casca triangular com estas características, não é necessária uma densidade de pontos tão elevada como inicialmente considerado – 119 tomadas em 1/6 da superfície de casca);

- a densidade de pontos, repensada para a 2ª e 3ª fases de ensaio – 124 tomadas colocadas na totalidade da superfície da casca, cobre de forma eficaz a área que se pretende analisar. Este número de tomadas para a área e forma da casca permite uma distribuição uniforme, coerente e contínua para todos os ângulos de ataque analisados;
- as tomadas devem estar distribuídas de forma regular sobre a superfície de casca para que se consiga obter uma distribuição aceitável que constitua uma base sólida para análise de resultados;
- durante a 1ª fase de ensaios, através da observação da distribuição de ΔC_p para ângulos de incidência próximos, verificou-se que não existe uma diferença significativa nos valores obtidos. Para as incidências de 10°, 20° e 30° as distribuições obtidas são idênticas, não acrescentando valor à análise de forma independente;
- os ângulos de ataque analisados na 2ª e 3ª fases de ensaio – 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° – relevaram-se suficientes para uma análise sólida dos valores de ΔC_p no modelo estudado;
- o número de tomadas colocadas na fachada, 30 tomadas de pressão, revelou-se suficiente para a obtenção de uma distribuição consistente.

Da análise dos resultados elaborada no capítulo 5 foi possível retirar algumas conclusões principais sobre o escoamento em torno da casca para os três casos analisados (caso 0F, 1F e 2F) e em particular sobre a influência das fachadas na distribuição de coeficientes de pressão resultantes. As conclusões encontram-se divididas por temas/objetivos definidos anteriormente:

- **Situação que produz suções mais acentuadas na superfície da casca** – identificam-se duas situações:
 - No caso 2F, para o ângulo de incidência de 180°, a distribuição de ΔC_p é totalmente caracterizada por suções, mais acentuadas no centro da superfície, com valores médios de ($\Delta C_p = -1,4$) devido ao fluido quase estagnado no interior, apresentando valores mais uniformes de pressão elevada (positiva) no interior. Existe uma faixa de valores menos acentuados na zona da pala, com valores médios de ($\Delta C_p = -0,5$). Esta é a única situação analisada para a qual não se verificam valores de ΔC_p positivos;
 - No caso 0F, para os ângulos de incidência do vento 0°, 120° e 240°, existem duas zonas simétricas de sucção muito acentuada junto aos bordos. Devido à forma da casca e à ausência de fachadas, o escoamento separa junto das arestas do modelo;
- **Influência da saliência/ “pala”** – a existência da “pala” na zona superior da fachada A é mais evidente em determinadas situações:
 - Nos casos 1F e 2F, segundo um ângulo de incidência de 60°, forma-se uma estreita faixa de suções ($\Delta C_p = -2,0$) precisamente na zona da “pala”, com valores mais acentuados comparativamente à restante superfície da casca ($\Delta C_{p_{med}} = -0,15$);

- No caso 2F, segundo um ângulo de incidência de 180° , a existência da “pala” forma uma faixa de suções menos acentuada, que varia entre ($\Delta C_p = -0,9$) e ($\Delta C_p = -0,1$), contrastando com a restante superfície ($\Delta C_{p_{med}} = -1,5$);
- **Ângulo de ataque do vento para o qual as fachadas têm menor influência sobre a distribuição de ΔC_p** – para o ângulo de incidência 0° (casos 0F, 1F e 2F) as fachadas não produzem efeito significativo sobre os valores de ΔC_p . O padrão de distribuições de ΔC_p mantém-se semelhante nos três casos analisados, e os valores de ΔC_p não variam de forma significativa;
- **Ângulo de ataque do vento para o qual as fachadas têm maior influência sobre a distribuição de ΔC_p** – para os ângulos 60° (caso 1F e 2F) e 300° (caso 1F), as distribuições de coeficientes de pressão diferenciam-se muito do caso 0F, sem fachadas. Esta distinção acentuada entre modelos com e sem fachadas ilustra o papel das fachadas no escoamento e na configuração das linhas de corrente para as situações específicas em que o vento incide perpendicularmente a uma fachada do modelo.
- **Distribuições de ΔC_p nas fachadas** – de forma geral, as distribuições de ΔC_p nas fachadas revelaram-se bastante uniformes, sem grandes variações, ou alterações bruscas de valores. Destacam-se algumas situações:
 - No caso 2F, para os ângulos de incidência do vento 60° e 300° , a fachada que fica do lado oposto do escoamento, fachada B e fachada A respectivamente, tem uma interação com o escoamento muito reduzida, dado que os valores de C_{int} e $C_{p_{ext}}$ são ambos muito próximos de zero. Para além disso, estes valores são praticamente iguais, em valor e sinal, para cada ponto da fachada, o que resulta num valor resultante $\Delta C_p \approx 0$ em toda a fachada;
 - Nos casos 1F para o ângulo 60° e no caso 2F para os ângulos 60° e 300° , a fachada que recebe diretamente o escoamento apresenta valores unitários de ΔC_p em praticamente toda a área da fachada A e B, respectivamente;
 - O caso 2F apresenta os valores de sucção mais acentuados em fachadas ($\Delta C_p = -2,2$), verificados para o ângulo de incidência 160° , na zona da fachada A junto ao apoio 2.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dada a falta de informação bibliográfica sobre coeficientes de pressão em cascas de forma livre, nomeadamente casca com três apoios, não é possível comparar os resultados experimentais obtidos com os de outros autores. Apesar da escassez de elementos que permitam a validação e/ou comparação dos resultados, as distribuições de coeficientes de pressão obtidas para os diferentes modelos e ângulos de incidência do vento são coerentes entre eles, e relacionam-se de forma lógica com os fenómenos da aerodinâmica estudados no subcapítulo 3.4.

Na sequência do estudo experimental realizado neste trabalho sugere-se como desenvolvimento futuro a modelação numérica em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Esta modelação numérica

permitiria testar outras variações à forma base da casca, podendo os resultados experimentais obtidos na presente dissertação servirem para a calibração do modelo numérico. Este estudo é um dos trabalhos propostos para desenvolvimento futuro, o qual acrescentaria valor à análise experimental aqui apresentada.

É naturalmente de grande interesse estender o presente estudo experimental ao modelo da casca com 3 fachadas. A utilização dos resultados experimentais obtidos no presente estudo para uma análise do comportamento estrutural da casca (para todas as configurações) e de ventilação natural do edifício (no modelo com 3 fachadas) são também temas de investigação futura que podem decorrer do presente estudo. Outro tema que surge de forma natural no seguimento deste trabalho, e muito relacionado com as características do modelo de casca triangular, é a possibilidade de desenvolver e estudar novas configurações de cascas, que resultem da fusão de n cascas-módulo – casca triangular estudada. O objetivo será acrescentar complexidade e valor à estrutura, de forma a cobrir outros requisitos que possam surgir no âmbito deste ou de outros projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, F. H. (2008). Coberturas em betão armado e pré-esforçado: Solução estrutural tipo casca. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.

Castanho, A. F. (2012). Avaliação experimental do conforto pedestre em meio urbano. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.

Cheng, C. (2009). Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98 (6–7), (2010), 328-344

Cheung, J., & Melbourne, W. (1983). Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 14 (1983), 399-410.

Chilton, J. (2012). Form-finding and fabric forming in the work of Heinz Isler. *ICFF, International Society of Fabric formwork (2012)*, 84-91.

Chilton, J. (2009). Heinz Isler's infinite spectrum of new shapes for shells. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia

Eurocódigo 1 (2005) : Acções em estruturas - Parte 1-4: Acções do vento. Comité Europeu de Normalização.

Cook, N. (1985a). *The designer's guide to wind loading of building structures Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification*. London: Butterworths.

Cook, N. J. (1985b). *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures*. London: Butterworths.

Davenport, A. G. (1962). The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Paper No.6480. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 19, 449–71.

Faghih, A., & Bahadori, M. (2009). Experimental Investigation of Air Flow over Domed Roofs. *Iranian Journal of Science & Technology*. Iranian Journal of science and technology 33 (B3), 1, 2009.

Ferreira, M. A. (2013). Análise de estruturas em cascas de formas livres sob ação do vento. *Tese de doutoramento em Engenharia Civil*. UniCamp, Campinas.

Ganguli, U., Newman, B., & Shrivastava, S. (1984). Flow over spherical inflated buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 17 (3), (1984), 305-327

Golden Software, Inc. (February de 2002). Tutorial. *Surfer User's Guide*.

- Gomes, M. Glória. (2003). Acção do vento em edifícios: Determinação de coeficientes de pressão em edifícios em L e U. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Kolousek, V., Pirner, M., Fischer, O., & Naprstek, J. (1984). *Wind Effects on Civil Engineering Structures*. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design* 109 (2) (1987), 217-218
- Landim, P. M. (2000). *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. UNESP/ campus de Rio Claro, Departamento de Geologia Aplicada- IGCE. Laboratório de Geomatemática.
- Lopes, M. F. (2008). Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limte atmosférica para o estudo da acção do vento sobre edifícios. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Matos, J. F., Labaki, L. C., Matsumoto, E., & Camargo, R. M. (2010). Confecção de maquetes para analisar a eficiencia de sheds através de testes de ventilação natural em túnel de vento. *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Fapesp* .
- May, R. (2015). Shell Sellers. The international dissimination of the Zeiss-Dywidag System, 1923-1939. *5th International Congress on Construction History* .
- Melaragno, M. (1991). *An Introduction to Shell Structures: The Art and Science of Vaulting* . New York: Van Nostrand Reinhold.
- Mendes, P. A. (1995). Notas sobre a análise experimental de estruturas em túnel de vento. *Departamento de Engenharia Civil Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*.
- Meroney, R., Letchford, C., & Sarkar, P. (2002). Comparison of numerical and wind tunnel simulation of wind loads on smooth, rough and dual domes immersed in a boundary layer. *Wind and Structures*, (2002) 347-358.
- Neto, C. B. (2011). *Mecânica de Fluídos. Volume II - Dinâmica de Fluídos*. Santa Catarina: Instituto Federral Santa Catarina.
- Peerdeman, B. (2008). Analysis of Thin Concrete Shells Revisited: Opportunities due to Innovations in Materials and Analysis methods. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*. Delft University of Technology.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, Inc.
- Taylor, T. (1991). Wind pressures on a hemispherical dome. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40 (2), (1992), 199-213

Tome, A. P., Vizotto, I., & Julio, E. N. (2014). Guidelines de apoio à produção de modelos reduzidos de cascas em betão para análise aerodinâmica em túnel de vento. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas* .

Vizotto, I., & Ferreira, M. A. (2014). Wind force coefficients on hexagonal free form shell. *Elsevier . Engineering Structures*, 83 (2015), 17-29

SITES CONSULTADOS

- w1 – www.struturae.com, acedido em Março de 2016
- w2 - www.engineering-timelines.com, acedido em Março de 2016
- w3 – www.wikipedia.com, acedido em Abril de 2016
- w4 – www.archicentral.com, acedido em Março de 2016
- w5 – <https://lebbeuswoods.wordpress.com>, acedido em Fevereiro de 2016
- w6 – www.future-is-now.info, acedido em Fevereiro de 2016
- w7 – <http://blog.buildllc.com/2009/04/heinz-isler-a-few-important-things/>, acedido em Dezembro de 2015
- w8 – <http://n0310093.weebly.com/>, acedido em Janeiro de 2016
- w9 – www.scielo.br, acedido em Janeiro de 2016
- w10 – <http://www.lnec.pt/pt/investigacao/infraestruturas-de-investigacao/tuneis-de-vento/>, acedido em Maio de 2016

ANEXOS

ANEXO I COORDENADAS DAS TOMADAS DE PRESSÃO EM CADA FASE DE ENSAIOS

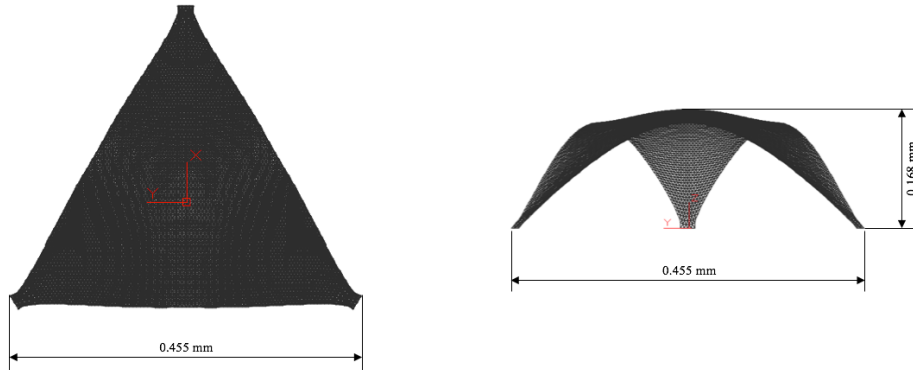


Figura 0-1- Forma do modelo e casca e identificação dos eixos coordenados X, Y, Z.

1ª Fase de ensaios (modelo sem fachadas) – tomadas na superfície da casca:

Nº Tomada	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Nº Tomada	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	64,6	-118,5	142,4	61	106,7	-26,7	132,1
2	78,3	-110,6	141,8	62	94,1	-14,8	138,3
3	96,3	-100,0	138,3	63	98,5	2,0	136,3
4	118,1	-86,9	130,3	64	27,3	-38,2	155,8
5	139,1	-74,1	118,9	65	58,4	-44,8	149,8
6	163,3	-59,0	101,7	66	63,2	-32,4	149,4
7	175,2	-51,5	92,0	67	68,0	-15,1	148,6
8	187,0	-44,0	81,6	68	81,3	2,0	143,9
9	198,9	-36,6	70,5	69	45,3	-37,7	153,2
10	215,2	-26,7	54,7	70	18,6	-28,4	157,6
11	228,0	-19,4	41,8	71	36,7	-18,0	156,2
12	241,8	-12,2	27,7	72	72,5	2,0	147,2
13	252,1	-7,8	17,3	73	14,2	-26,0	158,1
14	259,1	2,0	10,1	74	27,8	-13,1	157,8
15	60,4	-111,3	143,1	75	45,9	2,0	154,9
16	69,5	-106,0	142,9	76	14,4	-5,7	159,4
17	83,1	-98,0	141,1	77	14,3	-15,8	158,9
18	105,3	-84,9	134,7	78	27,9	2,0	158,1
19	126,7	-72,0	124,6	79	5,5	-5,7	159,8
20	151,3	-61,7	109,7	80	9,9	2,0	159,7
21	167,3	-51,7	97,4	81	1,0	2,0	160,0
22	179,2	-44,3	87,4	82	50,8	-126,4	141,2
23	191,1	-36,9	76,7	83	37,2	-134,1	138,3
24	207,3	-27,0	61,4	84	23,8	-141,6	134,0
25	216,0	-17,6	52,2	85	29,9	-90,2	146,7
26	248,0	-5,9	21,2	86	11,8	-100,6	142,8

27	249,0	2,0	20,0	87	4,0	-71,4	150,1
28	60,7	-101,4	144,0	88	13,7	-46,1	155,5
29	195,6	-25,1	70,9	89	0,1	-54,1	154,0
30	233,9	-8,3	34,7	90	5,1	-31,2	157,8
31	230,2	2,0	37,7	91	-3,9	-36,5	157,0
32	171,4	-39,7	92,1	92	-12,4	-11,0	159,4
33	175,8	-23,3	86,5	93	-16,7	2,0	159,6
34	188,3	-7,1	75,3	94	-7,9	7,1	159,9
35	196,5	2,0	68,1	95	-16,8	22,7	158,6
36	180,4	2,0	81,7	96	-8,0	22,6	159,1
37	52,2	-91,8	145,7	97	5,5	9,6	159,8
38	70,1	-91,1	143,7	98	9,8	22,3	159,0
39	88,1	-80,6	140,0	99	23,2	24,7	157,8
40	110,0	-67,6	131,7	100	41,2	24,4	155,3
41	135,2	-52,4	117,7	101	63,5	26,5	149,8
42	151,7	-33,1	105,2	102	89,8	16,4	140,2
43	163,9	-25,8	95,9	103	102,5	28,2	134,2
44	164,3	-7,3	94,6	104	115,3	16,2	127,4
45	164,4	2,0	94,4	105	139,8	30,1	112,7
46	48,4	-74,7	148,4	106	152,1	18,2	103,8
47	61,7	-76,6	146,2	107	159,8	32,1	99,0
48	118,8	-48,0	126,3	108	176,0	22,6	86,0
49	140,1	2,0	111,9	109	187,5	33,9	78,2
50	39,8	-65,2	150,7	110	192,1	17,7	72,5
51	75,7	-58,9	144,2	111	199,1	35,9	69,2
52	97,7	-46,1	136,4	112	203,8	24,2	63,2
53	131,5	-31,0	118,2	113	211,4	28,5	57,4
54	144,1	-14,4	109,4	114	219,9	23,6	49,1
55	123,7	2,0	122,5	115	225,2	12,5	42,8
56	31,4	-50,6	153,7	116	242,8	11,9	26,3
57	53,4	-62,2	149,2	117	253,3	7,8	15,9
58	17,6	-63,5	152,3	118	212,5	-11,1	54,5
59	115,4	2,0	127,3	119	123,6	-12,2	122,6
60	80,7	-36,8	143,4				

2ª e 3ª fases de ensaio (modelo com uma e duas fachadas) – tomadas na superfície da casca:

Nº Tomada	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Nº Tomada	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	64,6	-118,5	142,4	116	-63,5	106,2	122,5
3	96,3	-100,0	138,3	117	-8,4	88,3	143,4
5	139,1	-74,1	118,9	118	-30,2	105,7	132,1
7	175,2	-51,5	92,0	119	10,1	58,1	153,2
9	198,9	-36,6	70,5	120	-2,7	40,8	156,2
11	228,0	-19,4	41,8	121	-37,9	61,8	147,2
13	252,1	-7,8	17,3	122	-2,3	15,3	159,4
14	259,1	2,0	10,1	123	-134,9	-3,4	142,4

27	249,0	2,0	20,0	124	-134,7	33,3	138,3
28	60,7	-101,4	144,0	125	-133,7	83,3	118,9
31	230,2	2,0	37,7	126	-132,2	125,9	92,0
33	175,8	-23,3	86,5	127	-131,2	153,9	70,5
35	196,5	2,0	68,1	128	-130,8	187,7	41,8
40	110,0	-67,6	131,7	129	-118,1	1,9	144,0
42	151,7	-33,1	105,2	130	-108,1	140,6	86,5
45	164,4	2,0	94,4	131	-113,5	61,4	131,7
47	61,7	-76,6	146,2	132	-104,5	114,8	105,2
48	118,8	-48,0	126,3	133	-97,2	15,1	146,2
50	39,8	-65,2	150,7	134	-101,0	78,8	126,3
54	144,1	-14,4	109,4	135	-76,3	1,9	150,7
55	123,7	2,0	122,5	136	-84,5	117,5	109,4
60	80,7	-36,8	143,4	137	-72,2	51,5	143,4
61	106,7	-26,7	132,1	138	-76,4	79,0	132,1
69	45,3	-37,7	153,2	139	-55,3	20,3	153,2
71	36,7	-18,0	156,2	140	-34,0	22,8	156,2
72	72,5	2,0	147,2	141	-134,7	-33,3	138,3
76	14,4	-5,7	159,4	142	-133,7	-83,3	118,9
81	1,0	2,0	160,0	144	-131,2	-153,9	70,5
82	64,6	118,5	142,4	145	-130,8	-187,7	41,8
83	96,3	100,0	138,3	147	-122,9	-216,5	20,0
84	139,1	74,1	118,9	148	-113,5	-200,3	37,7
85	175,2	51,5	92,0	149	-108,1	-140,6	86,5
86	198,9	36,6	70,5	150	-96,6	-171,1	68,1
87	228,0	19,4	41,8	151	-113,5	-61,4	131,7
88	60,7	101,4	144,0	152	-104,5	-114,8	105,2
89	175,8	23,3	86,5	153	-80,5	-143,3	94,4
90	110,0	67,6	131,7	154	-97,2	-15,1	146,2
91	151,7	33,1	105,2	155	-101,0	-78,8	126,3
92	61,7	76,6	146,2	156	-84,5	-117,5	109,4
93	118,8	48,0	126,3	157	-60,2	-108,1	122,5
94	39,8	65,2	150,7	158	-72,2	-51,5	143,4
95	144,1	14,4	109,4	159	-76,4	-79,0	132,1
96	80,7	36,8	143,4	160	-55,3	-20,3	153,2
97	106,7	26,7	132,1	161	-34,0	-22,8	156,2
98	45,3	37,7	153,2	162	-34,6	-63,8	147,2
99	36,7	18,0	156,2	163	-12,1	-9,6	159,4
101	-5,3	157,5	118,9	164	38,6	-133,3	138,3
102	-42,9	177,5	92,0	165	-5,3	-157,5	118,9
103	-67,6	190,6	70,5	166	-42,9	-177,5	92,0
104	-97,0	207,2	41,8	167	-67,6	-190,6	70,5
105	-119,1	222,3	17,3	168	-97,0	-207,2	41,8
106	-126,0	214,7	20,0	169	-67,6	-164,0	86,5
107	-116,6	198,5	37,7	170	3,7	-129,0	131,7
108	-67,6	164,0	86,5	171	-47,1	-148,0	105,2
109	-99,8	169,3	68,1	172	35,6	-91,7	146,2

110	3,7	129,0	131,7	173	-17,7	-126,9	126,3
111	-47,1	148,0	105,2	174	-59,5	-132,0	109,4
112	-83,8	141,4	94,4	175	-8,4	-88,3	143,4
113	35,6	91,7	146,2	176	-30,2	-105,7	132,1
114	-17,7	126,9	126,3	177	10,1	-58,1	153,2
115	-59,5	132,0	109,4	178	-2,7	-40,8	156,2

2ª e 3ª fases de ensaio (modelo com uma e duas fachadas) – tomadas na fachada A:

Nº tomada	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	3,3	21,5	15,0
2	5,4	20,3	35,0
3	7,6	19,0	55,0
4	9,8	17,8	75,0
5	12,8	16,0	95,0
6	15,1	14,7	110,0
7	18,0	13,0	120,0
8	20,6	11,5	123,0
9	23,2	10,0	120,0
10	26,0	8,4	110,0
11	28,4	7,0	95,0
12	31,4	5,3	75,0
13	33,6	4,0	55,0
14	35,7	2,8	35,0
15	37,9	1,5	15,0
16	7,6	19,0	15,0
17	11,1	17,0	15,0
18	15,6	14,4	15,0
19	20,6	11,5	15,0
20	25,5	8,7	15,0
21	30,1	6,0	15,0
22	33,6	4,0	15,0
23	11,1	17,0	55,0
24	15,6	14,4	55,0
25	20,6	11,5	55,0
26	25,5	8,7	55,0
27	30,1	6,0	55,0
28	15,6	14,4	95,0
29	20,6	11,5	95,0
30	25,5	8,7	95,0

Anexo II CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS VALORES DA ZONA Z1 (ZONA ENSAIADA) E OS VALORES DAS RESTANTES ZONAS (ZONAS NÃO ENSAIADAS)

Tabela II-1 Correspondência entre os valores da zona ensaiada e das zonas não ensaiadas

Z1	Z1	Z6	Z5	Z4	Z3	Z2
E	0	E	N	R	R	N
F	10	W	n.a	n.a	n.a	n.a
G	20	n.a	n.a	n.a	n.a	M
H	30	U	n.a	Q	S	L
I	45	V	O	n.a	n.a	K
J	60	T	P	P	T	J
K	75	n.a	n.a	O	V	I
L	90	S	Q	n.a	U	H
M	105	n.a	n.a	n.a	W	F
N	120	R	R	N	E	E
O	160	Q	S	K	G	U
P	180	P	T	J	J	T
Q	205	O	U	G	K	S
R	240	N	E	E	N	R
S	270	K	G	U	O	Q
T	300	J	J	T	P	P
U	330	H	K	S	n.a	O
V	340	G	M	n.a	Q	n.a
W	350	F	n.a	n.a	n.a	n.a

Anexo III PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Material:

- Filamentos de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*);
- Tubos de PVC rígido brancos opacos com diâmetro 0,7 mm;
- Tubos de silicone transparentes, com diâmetro 0,7 mm;
- Tubos de cobre e PVC rígido para elementos de derivação entre tubos de silicone;
- Parafusos e chapas metálicas;

Equipamentos:

- Túnel de vento de circuito fechado com câmara de ensaios retangular de 1.25x1.00 m² e 3 m de comprimento (LNEC);
- Termómetro LAMBRECH, exterior ao túnel de vento, com manómetro de mercúrio de Torricelli incorporado (600-830 mmHg, escala 1mm com nóio) (LNEC);
- Termómetro ROTRONIC, no interior do túnel de vento, com sonda PT100 ligada a um sistema de leitura (gama entre -20°C e 60°C, precisão de 0.3°C) (LNEC);
- Tubo de Pitot-Prandtl ligado a micromanómetro de precisão Van Essen, tipo BETZ (50 a +2500 Pa, com precisão de 0.5 Pa) (LNEC);
- Dois sistemas transdutores de pressão/ *PSI's DTC miniature ESP pressure scanners (miniature pressure scanner)* com 32 canais para tomada de pressão (LNEC);
- Um sistemas transdutores de pressão/ *PSI's DTC miniature ESP pressure scanners (miniature pressure scanner)* com 64 canais para tomada de pressão (LNEC);
- Sistema de aquisição de dados – DTC Initium ® que faz a interface entre as PSI e o software de aquisição - *PSI_Utility_ShortCut* - via ligação Ethernet (LNEC);
- Computador portátil (LNEC);
- Máquina fotográfica digital.

Características dos ensaios:

- Perfil uniforme de velocidades ≈ 20 m/s;
- $Re \approx 2,8 \times 10^5$;
- Frequência de aquisição de dados = 16,5 Hz (332,5 rpm);
- Duração das medições em cada ensaio $\approx 1,5$ minutos.

Procedimentos experimental (2ª e 3ª fases da campanha experimental):

1. Montagem do modelo reduzido sobre o disco de madeira;
2. Levantamento da correspondência entre as tomadas de pressão e os canais de medição das PSIS;

3. Ligação das tomadas de pressão pelo exterior da superfície aos aparelhos de medição utilizados;
4. Colocação do modelo no interior do túnel;
5. Efetuar ligações ao sistema/ aparelho de aquisição de dados e ao computador portátil;
6. Leitura da temperatura no interior do túnel de vento, da temperatura no exterior e da pressão atmosférica;
7. Efetuar um “re-zero” do programa *PSI_Utility_ShortCut*;
8. Medição e registo de todas as tomadas de pressão monitorizadas ainda com o túnel sem estar em funcionamento ($v=0$ m/s) (duração 1,5 min.);
9. Entrada em funcionamento do túnel de vento com velocidade estabilizada para ≈ 20 m/s;
10. Medição e registo de todas as tomadas de pressão monitorizadas para o ângulo do ensaio em causa;
11. Rodar o modelo no sentido anti-horário, para medição de nova incidência;
12. Voltar a repetir etapa 10);
13. Repetir sucessivamente o procedimento até se realizarem os ensaios para todos os ângulos de incidência do vento pretendidos;
14. Quando finalizados todos os ensaios de medição da pressão exterior para o modelo com uma fachada, repetir procedimento para o modelo com duas fachadas;
15. Quando finalizados todos os ensaios de medição da pressão exterior para o modelo com duas fachadas:
16. Repetir procedimento 3 – 13 ligando as tomadas ao interior da superfície da casca para obtenção das pressões internas, no modelo com uma fachada;
17. Repetir procedimento 3 – 13 ligando as tomadas ao interior da superfície da casca para obtenção das pressões internas, no modelo com duas fachadas.

Anexo IV PEÇA DESENHADA DO TÚNEL DE VENDO DE CIRCUITO FECHADO (LNEC)

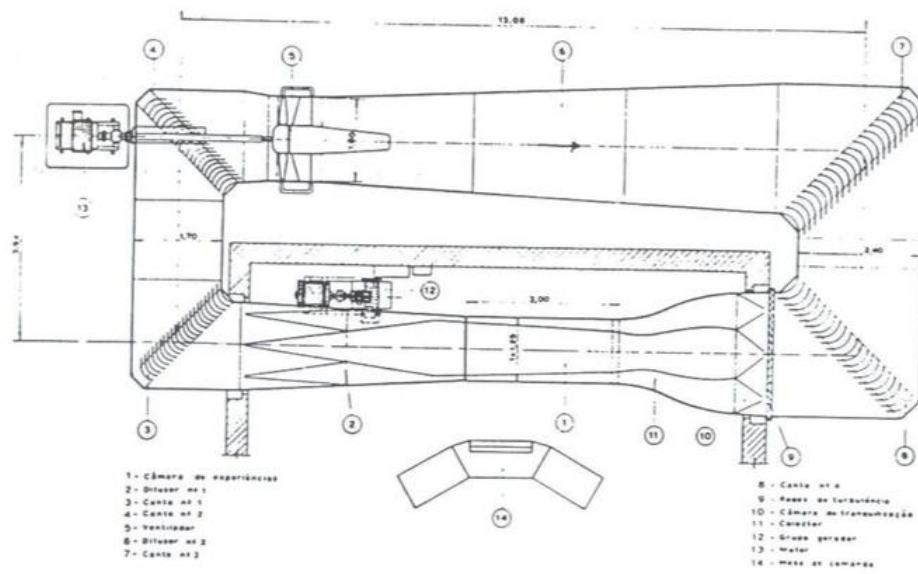


Figura 0-2- Planta do túnel de vento de circuito fechado do LNEC (Borges, 1968, citado em Mendes, 1995)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS DOS ANEXOS

Mendes, P. A. (1995). Notas sobre a análise experimental de estruturas em túnel de vento.
Departamento de Engenharia Civil Instituto Superior Técnico .