

AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS EM CASCA COM TRÊS APOIOS

Margarida Teixeira

Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil/CERis), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Maria da Glória Gomes

Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil/CERis), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Fernando Marques da Silva

Departamento de XXXX, Laboratório Nacional de Engenharia Civil



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 confere uma imagem de esbelteza e beleza bastante apreciada. A complexidade das formas arquitetónicas destas estruturas em casca exige uma descrição mais exacta da ação do vento e da interação com estas estruturas.

No presente trabalho analisa-se o comportamento aerodinâmico de cascas finas pré-fabricadas em betão de ultra-elevado desempenho, com 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 num 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 da casca. 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.

Palavras-chave: Estruturas em Casca; Modelo reduzido; Túnel de vento; Coeficientes de Pressão; Forma livre

1 INTRODUÇÃO

O projeto de cascas em betão teve a época áurea durante as décadas de 50 e 60, em particular com as obras do engenheiro suíço Heinz Isler (1926-2009). Duas das características que justificam a popularidade das cascas são a elevada resistência proporcionada, bem como a liberdade de formas

arquitetônicas (Peerdeman, 2008). Podem encontrar-se obras notáveis de estruturas em casca 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 demonstrado por este tipo de estruturas, observou-se nas últimas décadas do século XX, um decréscimo na projeção 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). Atualmente, existe a tendência para projetar estruturas em cascas 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 o vento atmosférico (Ferreira, 2013).

O presente trabalho incide sobre o comportamento aerodinâmico de cascas finas, de um modelo experimental desenvolvido com três apoios e diferentes configurações consoante o número de fachadas. Neste estudo determina-se experimentalmente em ensaios em túnel de vento os coeficientes de pressão devidos à ação do vento, identificando zonas da superfície e ângulos de incidência do vento críticos quando a casca se encontra em interação com o vento.

2 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. Por outro lado, a geração de forma através de métodos não-geométricos está associada a processos ditos naturais, usualmente denominados por *form-finding*, assentes na hipótese de que a forma é determinada pela carga atuante.

Heinz Isler, introduziu e explorou largamente o conceito de *form-finding* associado a estes processos. 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 para cascas e refere que existe ainda um número infinito por descobrir (Chilton, 2009). As primeiras e mais importantes cascas de Isler basearam-se nos métodos *Hanging cloth reversed* e *Membrane under pressure*. 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 (Chilton, 2012).

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. A forma e o tamanho da superfície inicial influenciam as reações nos apoios e o estado de tensões interno da casca (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 é uma das fases mais críticas de todo o processo (Chilton, 2012).

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). O método da membrana suspensa (*Hanging cloth reversed*) é o mais interessante do ponto de vista da relação existente entre a capacidade resistente por tração das fibras dos tecidos, e a capacidade resistente à compressão do betão. A Figura 2-1 ilustra os estudos realizados por Isler em modelos físicos pelo método da membrana suspensa.

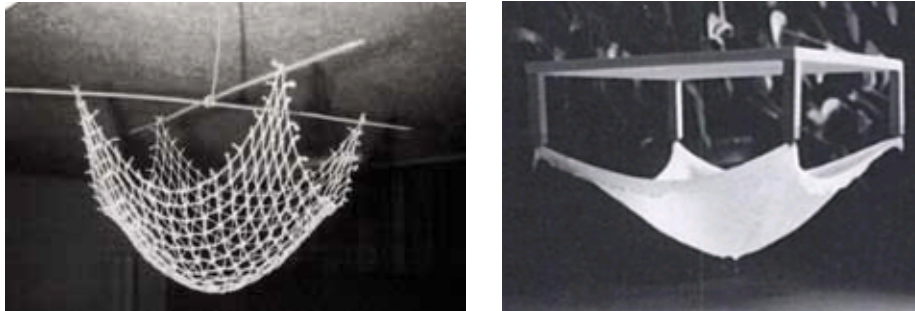


Figura 2-1- Testes em modelos físicos do método da membrana suspensa, Isler (1994)

(<http://n0310093.weebly.com/>)

3 AÇÃO DO VENTO SOBRE ESTRUTURAS EM CASCA

3.1 Parâmetros adimensionais

Na análise de interação entre comportamento do fluxo do vento e estruturas, é de extrema importância a definição de parâmetros capazes de proporcionar uma análise adimensional. Neste sentido, definem-se três parâmetros adimensionais, coeficiente de pressão, número de Strouhal e número de Reynolds (Cook, 1985).

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

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

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 (ambiente); e $\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2$ a pressão dinâmica do vento não perturbado pelo objeto à altura de referência.

Tem-se em consideração um escoamento uniforme em torno de um cilindro infinitamente longo, e o caso ideal de um fluxo invíscido. No ponto em que a linha central de corrente do escoamento encontra a superfície do cilindro o coeficiente de pressão é unitário, assumindo o valor máximo para este caso específico (Cook, 1985). A esse ponto dá-se a designação de ponto de estagnação. Nas zonas de pressão C_p tomará valores positivos e nas zonas de sucção valores negativos.

O número de Reynolds, Re , caracteriza o tipo de escoamento, com influência nos fenômenos que podem ocorrer decorrentes da interação vento-estrutura. Traduz a relação entre as forças de inércia e as forças de natureza viscosa, dada pela expressão,

$$Re = \frac{\rho_a U D}{\mu} = \frac{U \cdot D}{\frac{\mu}{\rho_a}} = \frac{U D}{\nu} \quad (2)$$

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

3.2 Efeitos da interação vento-estrutura

Cook (1985) faz uma distinção clara nas análises do escoamento em torno de obstáculos, considerando um perfil de velocidade do vento uniforme e um perfil de camada limite. Quando o escoamento incide na face frontal de uma estrutura as linhas de corrente percorrem um trajeto de forma a contornarem o objeto pelos lados e pela cobertura. No caso de um perfil incidente uniforme de velocidades, o vento flui para a zona superior da face frontal e a pressão é máxima no solo ao centro da face. Nos bordos a pressão toma valores reduzidos. No caso de um perfil incidente de velocidades crescente a tendência do fluxo é descendente em direção ao solo. As linhas de corrente descendentes (que incidem a menos de $2/3$ da altura da face frontal) formam um vórtice junto ao solo (Cook, 1985).

Cook (1985) descreve ainda o escoamento sobre coberturas planas quando o vento incide perpendicularmente a uma face frontal da estrutura. No caso de um perfil incidente do vento, as linhas de corrente não voltam a recolar na superfície. No caso de um perfil incidente de velocidade do vento não uniforme forma-se um vórtice sobre a cobertura e o segundo ponto de separação é antecipado (Cook, 1985).

3.3 Estudos realizados sobre a ação do vento em cascas

Cheung & Melbourne (1983), Ganguli, Newman, & Shrivastava (1984), Taylor (1991), Meroney, Letchford, & Sarkar (2002), são alguns dos autores de estudos experimentais em estruturas de casca.

Cheung & Melbourne (1983) concluíram que a realização de 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.

Ferreira (2013) estudou o comportamento de duas geometrias diferentes de cascas finas, hexagonal e pentagonal. 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 (Ferreira, 2013). Ferreira (2013) analisou separadamente os valores de coeficientes de pressão interna e externa em condições de regime laminar e de regime turbulento.

4 DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Pode dividir-se a campanha experimental em três fases, 1ª Fase – ensaios da casca sem qualquer fachada lateral, 2ª Fase – ensaios da casca com uma fachada, e 3ª Fase – ensaios da casca com duas fachadas. Os ensaios foram realizados em túnel de vento de circuito fechado, com seção de trabalho de 3,0x1,2x1,0 m³ e velocidade continuamente variável entre 0 e 45 m/s, do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE), Departamento de Estruturas, do LNEC.

O modelo reduzido (Figura 4-1) possui três apoios, que formam um triângulo equilátero em planta, com 500 mm de lado, 160 mm de altura máxima, 20 mm de largura nos apoios (Tomé, Vizotto, & Julio, 2014). Foi impresso (3D) sendo depois reforçado com fibra de vidro na superfície interior. Utiliza-se uma escala 1:50, que reduz com nitidez a geometria da forma livre.

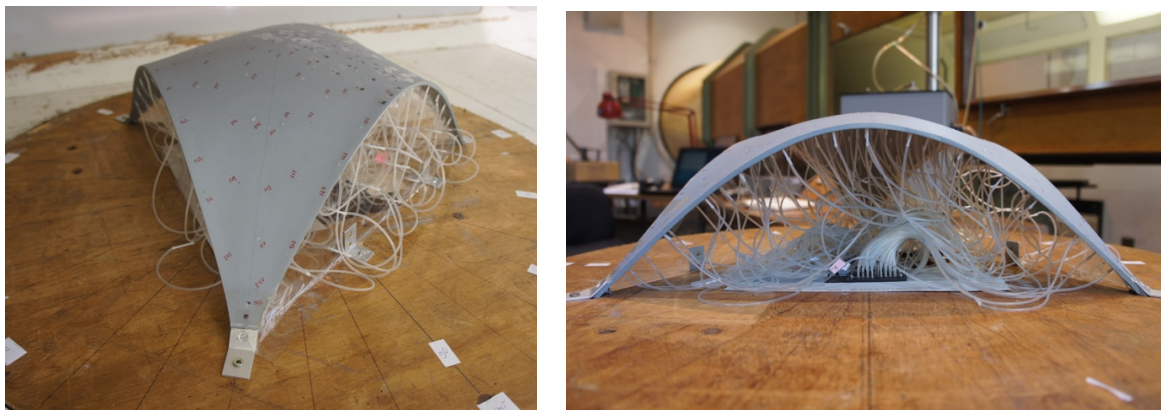


Figura 4-1- Modelo de casca de três apoios e forma livre monitorizado (LNEC)

O posicionamento das fachadas, pode ser “à face” ou permitindo uma saliência, formando uma pequena “pala”. Por forma a estudar o comportamento da casca face às duas soluções estruturais, optou-se por uma solução mista em que apenas um dos lados apresenta uma “pala” (Figura 4-1).

4.1 Plano de ensaios

A Figura 4-2 ilustra os 3 casos estudados, correspondentes às três configurações do modelo de casca.

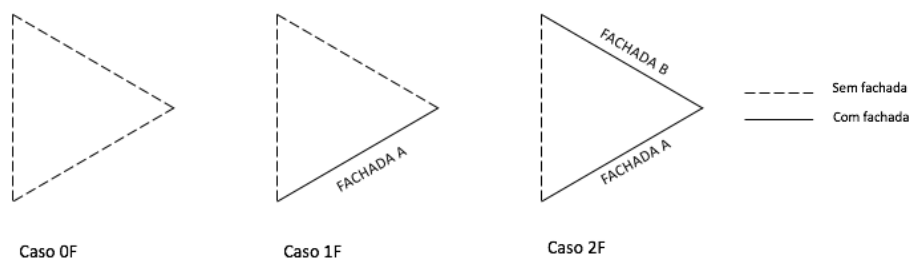


Figura 4-2- Esquema ilustrativo dos três casos estudados. Caso 0F – modelo sem fachadas; Caso 1F – modelo com uma fachada; Caso 2F – modelo com duas fachadas

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 4-3.

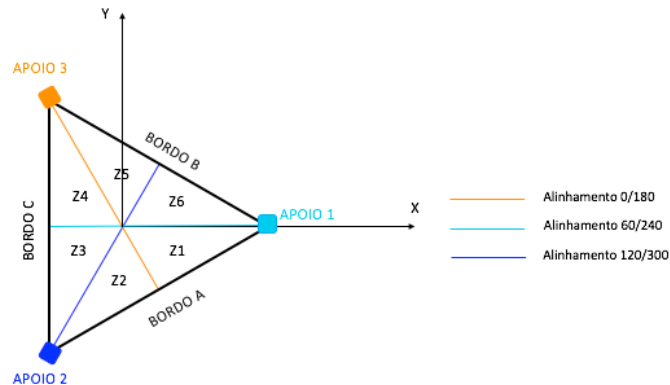


Figura 4-3 Casca triangular de forma livre. Esquema ilustrativo de apoios, bordos e alinhamentos do modelo em planta.

Para o Caso 0F (Figura 4-2) os ensaios foram realizados em regime uniforme de velocidade a 20 m/s, para um total de 119 tomadas de pressão (TP) colocadas na zona Z1 (Figura 4-3) da superfície da casca. A partir deste conjunto de tomadas foi possível obter uma distribuição fina da pressão e avaliar a dependência de Re , e concluir sobre a velocidade de ensaio. A análise à sensibilidade ao número de TP permitiu reduzir substancialmente o seu número nos ensaios subsequentes. O modelo foi ensaiado para 19 incidências entre 0° e 350° , com passo variável entre 10° e 30° , obtendo-se resultados nas superfícies interna e externa, separadamente.

Nos casos 1F e 2F os ensaios foram realizados na totalidade da superfície da casca, com 124 tomadas de pressão uniformemente distribuídas pela superfície. A Fachada A (Figura 4-2) foi também alvo de ensaio, colocando-se 30 tomadas de pressão distribuídas pela totalidade da área da fachada.

As condições do ensaio, velocidade do vento $V = 20 \text{ m/s}$, viscosidade cinemática $\nu \cong 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, resultam num parametro de Reynolds $Re \cong 2,16 \times 10^5$.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

São apresentados os resultados da distribuição de coeficientes de pressão resultante (ΔC_p), a diferença entre o valor dos coeficientes de pressão internos (C_{p_i}) e externos (C_{p_e}) na superfície. A análise é realizada apenas para determinados ângulos de incidência do vento que se consideram mais relevantes: 0° , 60° e 180° .

5.1 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 5-1.

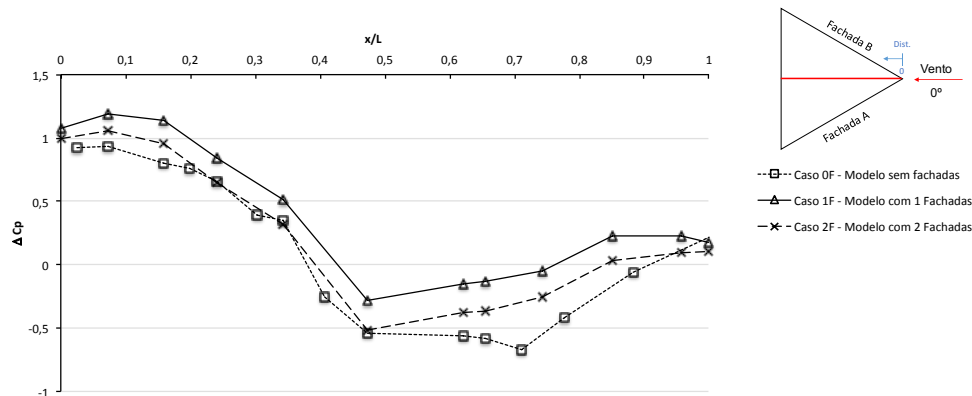


Figura 5-1- Coeficientes de pressão resultantes na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0°. Alinhamento 0/180.

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 fenômeno verifica-se precisamente sobre o apoio 1 para o Caso 1F ($\Delta C_p = +1,19$), e pode ser explicado por pressões positivas do lado exterior ($C_{p_{ext}} = +0,71$) e suções do lado interior ($C_{p_{int}} = -0,48$).

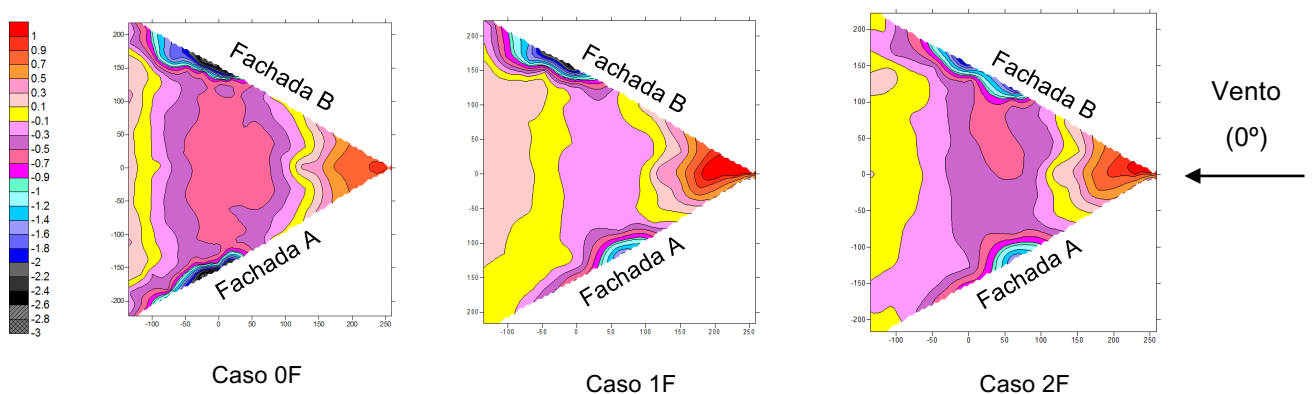


Figura 5-2- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 0°.

Pela observação das distribuições distintas de ΔC_p (Figura 5-2) 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 conseqüentemente na

distribuição de ΔC_p pode justificar a assimetria verificada. Os valores de ΔC_p na zona central estão, como esperado, entre os registados nas outras configurações.

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.

5.2 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.

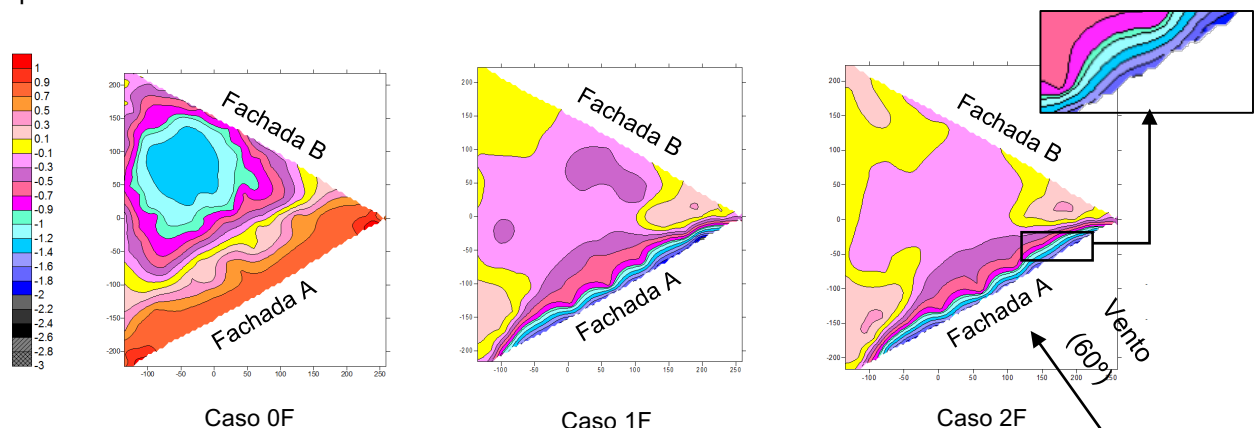


Figura 5-3- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 60°.

Pela observação das distribuições distintas de ΔC_p (Figura 5-3) nos três casos é possível concluir:

- A diferença na configuração dos modelos para um ângulo de incidência 60° produz um efeito muito acentuado relativamente à 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 com forma arredondada e bem definida, com valores até ($\Delta C_p = -1,4$);
- A zona inicial da superfície (no sentido do escoamento), encontra-se sob pressões no caso 0F e sob suções nos casos 1F e 2F. Nos últimos dois casos, as linhas de corrente ao encontrarem a fachada A provocam suções na grande maioria da 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;

5.3 Ângulo de incidência 180°

A Figura 5-4 ilustra as distribuições de ΔC_p para as três configurações quando o ângulo de incidência do vento é 180°.

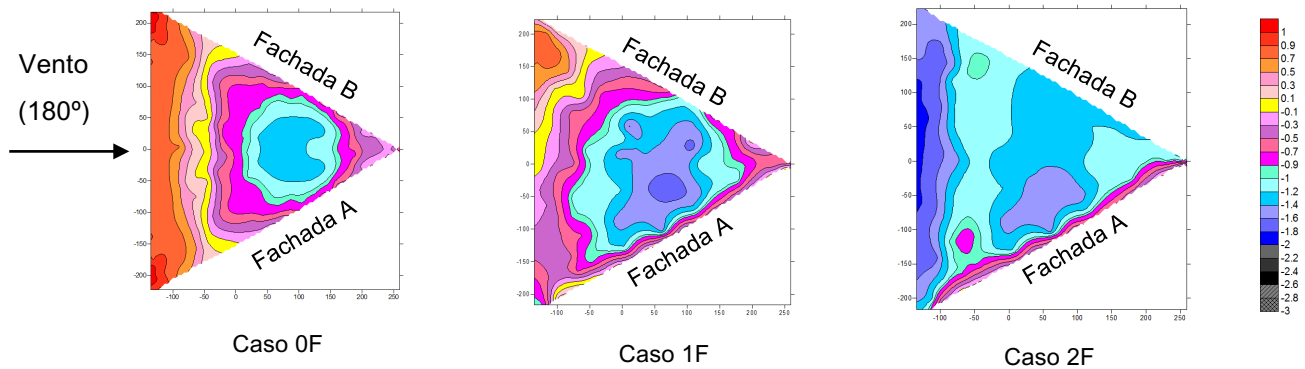


Figura 5-4- Distribuições de coeficientes de pressão na superfície da casca para os casos 0F, 1F e 2F, para ângulo de incidência 180°.

Das distribuições de ΔC_p para este ângulo de incidência destaca-se:

- Uma macha de suções mais acentuada até ($\Delta C_p = -1,4$) e com forma arredondada 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 suções (ΔC_p) que se generaliza a toda a superfície (correspondente a pressões positivas na superfície interna, $C_{p_{int}}$). 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.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho analisou-se experimentalmente o comportamento aerodinâmico de uma estrutura em casca com três apoios. Para isso, realizaram-se ensaios em túnel de vento de determinação de coeficientes de pressão em modelos de escala reduzida da casca, analisando-se a sua variação para diversos ângulos de incidência do vento e para três configurações da estrutura em casca (sem fachadas, com uma fachada e com duas fachadas).

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 1F e 2F quando o vento incide segundo a direção 60°, e para o caso 1F segundo 300°. Já o caso em que menos se fazem sentir as fachadas diz respeito à direção do vento 0°. As distribuições de ΔC_p nas fachadas revelaram-se bastante uniformes, sem grandes variações, ou alterações bruscas de valores. Em geral, verificou-se que a presença das fachadas laterais altera substancialmente a distribuição de pressões, e que a incidência do vento influencia particularmente as configurações com fachadas.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos Professores Ana Tomé, Isaías Vizotto e Eduardo Júlio a concepção e elaboração do modelo reduzido da casca.

REFERÊNCIAS

- Cardoso, F. H. (2008). *Coberturas em betão armado e pré-esforçado: Solução estrutural tipo casca. Tese de mestrado*.
- Chilton, J. (2012). *Form-finding and fabric forming in the work of Heinz Isler. ICFF*.
- Chilton, J. (2009). *Heinz Isler's infinite spectrum of new shapes for shells. Proceedings of International Association for Shell and Spacial Structures (IASS) Symposium*.
- Cook, N. (1985). *The designer's guide to wind loading of building structures Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification. London: Butterworths*.
- Ferreira, M. A. (2013). *Análise de estruturas em cascas de formas livres sob ação do vento. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas*.
- Peerdeman, Bart. (2008). *Analysis of Thin Concrete Shells Revisited: Opportunities due to Innovations in Materials and Analysis Methods. Tese de Mestrado. Faculty of Civil Engineering and Geosciences – Delft University of Technology, Delft*.
- 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*.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures. John Wiley & Sons, Inc.*