

## CARGA AERODINÂMICA EM SOMBREAMENTOS EM CASCATA

### WIND LOADS ON CASCADE SHADING DEVICES

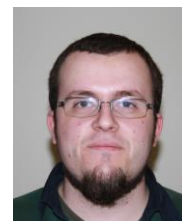
*Fernando Marques da Silva*  
*Departamento de Estruturas, LNEC*

*Paulo Morais*  
*Centro de Instrumentação Científica, LNEC*

*Iara Pereira*  
*Departamento de Estruturas, LNEC*

*Rogério Bairrão*  
*Departamento de Estruturas, LNEC*

*João Morais*  
*Centro de Instrumentação Científica, LNEC*



## RESUMO

A arquitetura recorre, por vezes, a dispositivos de sombreamento de grandes dimensões, com formas e configurações de montagem cuja resposta à ação do vento carece de caracterização. Os sombreamentos em cascata, instalados no exterior de fachadas e constituídos por uma série de lamelas paralelas entre si, colocam desafios particulares do ponto de vista da avaliação aerodinâmica que condicionam a carga imposta pelo vento sobre as lamelas e, portanto, o correto dimensionamento dos apoios e da solução a adoptar. O presente trabalho pretende caracterizar experimentalmente o desempenho aerodinâmico das lamelas de um protótipo destes sombreamentos, através de ensaios em túnel de vento com um modelo “seccional” do dispositivo à escala real. Os requisitos específicos do ensaio ditaram o desenvolvimento de uma solução particular para a medição das forças aerodinâmicas. Mediram-se as cargas induzidas pelo escoamento sobre uma lamela do sombreamento para vários ângulos de incidência, fazendo variar a inclinação do modelo relativamente ao escoamento de aproximação. Com base nas medições, foi estimada a carga máxima a que as lamelas estão sujeitas por ação do vento.

Palavras-chave: Sombreamentos em cascata / Ensaios em túnel de vento / Instrumentação

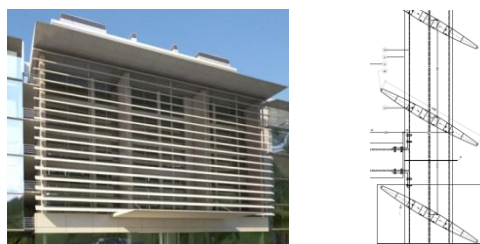
## ABSTRACT

Shading devices of large span are sometimes adopted in modern architecture as shading solutions mounted on the exterior of façades, with shapes and assembling configurations whose wind response lacks a proper characterization. Cascade shadings, consisting in a vertical series of parallel blades, are one of such examples, posing particular challenges in terms of wind loads evaluation that influence the design of these devices and their respective support structures. In this work, wind tunnel tests were conducted on a “sectional” model of a prototype of a cascade shading device, to evaluate the aerodynamic performance of the blades. The specific characteristics of this test required the development of a particular system to measure the aerodynamic forces. The loads induced by the flow on the blade were measured for several angles of attack by varying the model's orientation relative to the incoming flow. These results allowed an estimate of the maximum load on the blades due to wind exposure.

Keywords: Cascade shadings / Action of the wind / Instrumentation

## 1. INTRODUÇÃO

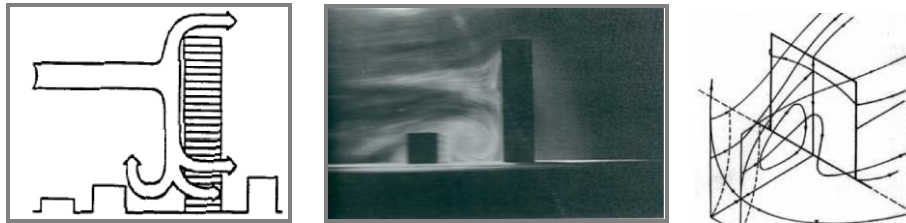
Os dispositivos de sombreamento instalados no exterior de fachadas podem atingir grandes dimensões e estão naturalmente sujeitos a cargas impostas pela ação do vento. Esses dispositivos são, em muitos casos, constituídos por lamelas de forma dita aerodinâmica (Figura 1) mas sem que correspondam a algum perfil específico de características aerodinâmicas conhecidas.



**Figura 1 – Dispositivo de sombreamento e esquema de montagem.**

Acresce o facto do escoamento que atravessa as lamelas ser condicionado pela própria fachada, não muito afastada do dispositivo, o que afeta o ângulo de incidência do escoamento sobre os elementos. Como ilustrado na Figura 2, um escoamento do tipo camada limite (como é o caso do vento atmosférico), ao incidir sobre um obstáculo plano vertical, forma um ponto de estagnação aproximadamente a  $2/3$  da altura, tomando uma orientação descendente dali até ao solo e ascendente no terço superior [Simiu e Scanlan (1996), Cochran (2004)]. Deste modo, consoante o seu posicionamento em altura, as

lamelas ficarão sujeitas a diferentes orientações locais do escoamento, cuja gama de variação importa considerar para efeitos de caracterização aerodinâmica. Note-se que o ângulo efectivo de incidência do escoamento sobre as lamelas depende ainda da inclinação que estas tiverem relativamente à fachada (veja-se o esquema da Figura 1).



**Figura 2 – Ilustração da interação de um escoamento de camada limite com a fachada de um edifício (Cochran, 2004; Simiu e Scanlan, 1996).**

Por outro lado, dado que o escoamento em torno da fachada desenvolve também componentes laterais acentuadas, é expectável que o ângulo de incidência sobre cada lamela varie ao longo da envergadura. Esta situação representa um afastamento em relação ao caso de um escoamento essencialmente bidimensional, muito para além dos efeitos associados às extremidades. Dependendo das próprias dimensões e condições de fronteira da caixa-de-ar formada entre a fachada e o sombreamento, outros efeitos locais deverão surgir contribuindo para a complexidade do escoamento.

Outro aspeto relevante do ponto de vista aerodinâmico prende-se com a configuração em cascata do sombreamento, ou seja, a disposição vertical das lamelas, paralelas entre si e espaçadas de uma distância fixa. A distribuição de pressões a que cada elemento está sujeito é então influenciada pela presença dos elementos adjacentes e pela respetiva distância de espaçamento.

No seu conjunto, as particularidades descritas dificultam a modelação do escoamento sobre sombreamentos em cascata e explicam que este não seja diretamente comparável a outro tipo de aplicações mais amplamente estudadas (como as cacatas de pás, por exemplo). Com efeito, os autores desconhecem a existência de qualquer estudo aerodinâmico deste tipo de soluções de sombreamento.

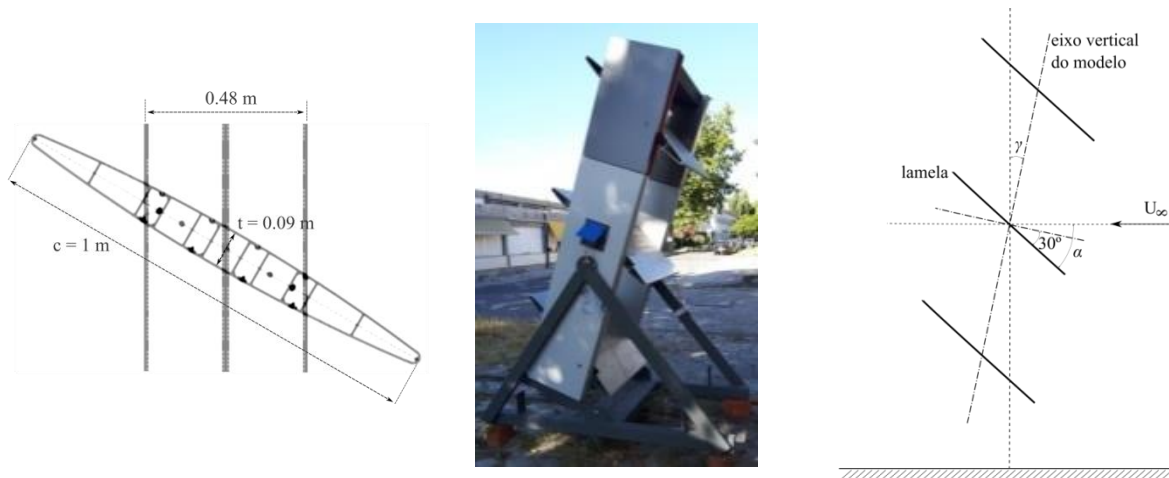
O presente trabalho pretende contribuir para a caracterização aerodinâmica dos sombreamentos em cascata, partindo de uma abordagem simplificada ao problema. O trabalho consistiu na realização de ensaios em túnel aerodinâmico para medição das cargas

impostas pelo vento sobre as lamelas, utilizando um modelo seccional de um protótipo disponibilizado pelo respectivo fabricante.

## 2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

### 2.1. Modelo seccional e túnel de vento

O modelo ensaiado é constituído por um conjunto de três lamelas de forma a simular o efeito de cascata sobre a lamela central. Na Figura 3, à esquerda, encontra-se representado o perfil das lamelas. Trata-se de um perfil simétrico, com bordos boleados, com corda ( $c$ ) de 1 m e espessura máxima ( $t$ ) de 0,090 m. As lamelas têm um espaçamento ( $s$ ) entre si de 0,875 m e estão fixas nas extremidades laterais a um perfil com 0,480 m de largura. A solidez da cascata, dada por  $\sigma = c/s$ , é 1,14. O ângulo de inclinação das lamelas em relação ao eixo vertical do perfil é de  $60^\circ$ , mantendo-se fixo. Devido a requisitos da instalação experimental, a envergadura ( $b$ ) das lamelas foi limitada a 1 m.



**Figura 3 – À esquerda, esquema de perfil das lamelas e do perfil vertical de suporte; ao centro, vista global do modelo seccional montado no suporte articulado; e à direita, esquema de perfil do modelo com as 3 lamelas, inclinado de um ângulo  $\gamma$  relativamente ao referencial terrestre.**

A influência da fachada foi parcialmente modelada fazendo variar o ângulo de incidência do escoamento sobre as lamelas de forma a reproduzir uma direção ascendente ou descendente do escoamento ao longo da fachada. Para tal, o modelo seccional foi montado num suporte articulado (Figura 3, ao centro), permitindo que todo o conjunto fosse inclinado de um ângulo  $\gamma$  relativamente ao referencial terrestre, estando este alinhado com o

escoamento de aproximação com velocidade  $U_\infty$  (Figura 3, à direita). Um escoamento descendente ao longo da fachada corresponde assim a valores  $\gamma > 0^\circ$  e um escoamento ascendente corresponde a  $\gamma < 0^\circ$ . O ângulo efectivo de incidência do escoamento sobre as lamelas,  $\alpha$ , também designado por ângulo de ataque, é dado simplesmente por  $\alpha = \gamma + 30^\circ$ .

Dada a escala do modelo, os ensaios foram realizados no túnel de vento de jato livre do LNEC, com descarga direta para o ambiente exterior (Figura 4). Este túnel é caracterizado por uma secção de saída do jato com 1,6 m de diâmetro e uma velocidade do escoamento que pode atingir um valor máximo de 16 m/s. A velocidade do jato é controlada por um variador eletrónico de frequência, tendo sido medida durante os ensaios com um anemómetro de ultra-sons 2D, do tipo Gill Windsonic, colocado à saída do túnel. Obtiveram-se variações de direcção lateral do escoamento inferiores a  $3^\circ$  que se atribuem à influência do vento atmosférico.



**Figura 4 – Pormenor do modelo seccional, saída do túnel de vento de jato livre do LNEC e anemómetro de ultra-sons 2D.**

O facto de se utilizar um modelo seccional construído a partir do protótipo, e não um modelo de escala reduzida, impôs alguns constrangimentos aos ensaios. Em particular, não foi possível garantir uma velocidade do escoamento de aproximação uniforme ao longo de toda a altura do modelo. Este foi colocado suficientemente perto da saída do jato para que a lamela central estivesse totalmente imersa na região potencial do escoamento, de velocidade longitudinal constante, mas o mesmo não se verificou para as lamelas superior e inferior, especialmente à medida que  $\alpha$  aumentava. Para valores elevados do ângulo de ataque constatou-se, através de visualização com fio de lã, uma redução significativa da velocidade ao longo do extradorso da lamela inferior e do intradorso da lamela superior, o que afecta as condições de periodicidade do escoamento na cascata.

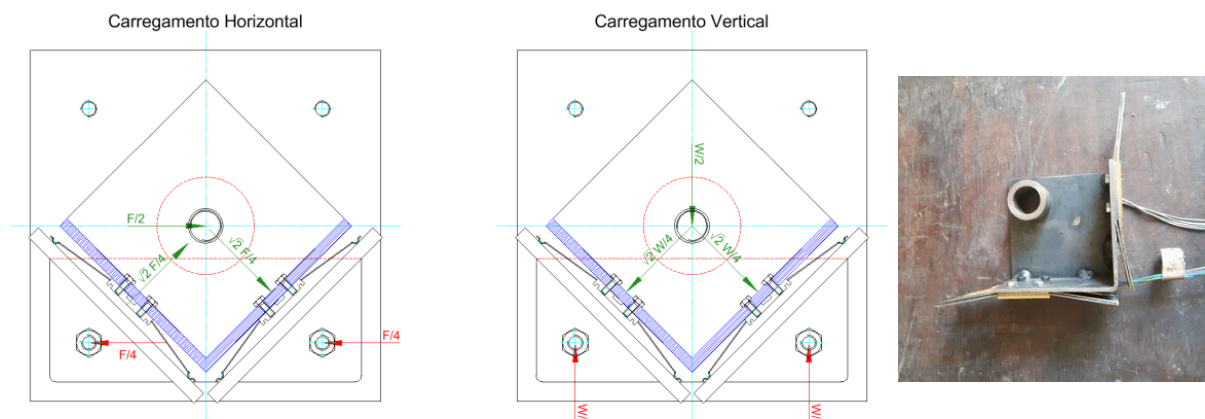
Por outro lado, a dimensão do jato ditou a largura do modelo seccional, sendo inevitável que o escoamento sobre as lamelas adquira componentes laterais, especialmente perto das extremidades, ainda que a presença dos perfis verticais de suporte contribua para a atenuação deste efeito. Do ponto de vista aerodinâmico, cada lamela ensaiada aproximar-se-á então de uma superfície sustentadora de pequeno alongamento (*aspect ratio*) definido como  $AR = b/c$ , que toma neste caso o valor de 1. Num sombreamento real o alongamento poderá ascender a valores 4 vezes superiores mas ter-se-ão outros efeitos de deflexão lateral do escoamento ao longo da envergadura consoante as proporções da fachada e localização da lamela. As condições de pressão e velocidade a jusante do sombreamento dependem ainda do caso particular, não sendo possível reproduzi-las em situação de ensaio com um modelo seccional. A influência conjunta de todos estes fatores nas cargas aerodinâmicas a que as lamelas estão sujeitas não é evidente nem facilmente quantificável. Por este motivo, optou-se, numa primeira abordagem ao problema, pelo modelo simplificado anteriormente descrito.

## 2.2. Balança aerodinâmica

Para medir as forças aerodinâmicas sobre a lamela central, a única sujeita ao efeito de cascata, foi necessário desenvolver uma balança aerodinâmica pouco convencional, que pudesse estar ligada à lamela interferindo o menos possível com o escoamento. Esta solução teria de garantir que o sistema permanecesse estável durante os ensaios, incluindo as situações em que se variou a inclinação da estrutura de suporte, apoiar a lamela central e permitir obter a ação do escoamento sobre a lamela nas direções vertical e horizontal.

A solução encontrada consistiu em instalar dois ortodinamómetros nos apoios de ligação da lamela à estrutura. Cada ortodinamómetro é constituído por dois defómetros [Oliveira *et al.*, 2011] e duas molas de rigidez, associados aos pares de modo a medir as forças aerodinâmicas presentes e compatibilizar a rigidez do dinamómetro com a gama de forças a medir. Os dois pares foram instalados ortogonalmente entre si para que se conseguisse obter as forças aerodinâmicas nas duas direcções (Figura 5), minimizando as perdas de informação.





**Figura 5 – Esquema de medição das forças nos apoios do perfil de sombreamento na posição vertical da estrutura de suporte e um dos ortodinamômetros.**

Os defórmetros são constituídos por um corpo em aço e duas molas de lâmina instrumentadas com uma ponte completa de extensómetros eléctricos de resistência, dois em cada lâmina em faces opostas. Os defórmetros foram utilizados para medir a força imposta pelo escoamento através da deformação aplicada ao conjunto de molas, conceito utilizado com sucesso noutros contextos [Oliveira *et al.*, 2011].

Com a estrutura na posição vertical, os dois ortodinamómetros fazem um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo vertical (Figura 5). Este arranjo permitiu aproveitar o peso próprio da lamela para introduzir uma pré-carga no sistema compatível com a gama de medição dos ortodinamómetros, ajudando a impedir a separação dos defórmetros da respetiva superfície de apoio. Variações de carga no sentido horizontal, devido às forças de arrastamento na lamela, produzem variações de sinal simétricas nos defórmetros de cada ortodinamómetro, enquanto variações de carga no sentido vertical, devido a forças de sustentação na lamela, produzem variações de sinal igual nos dois defórmetros.

Os defórmetros que resistem ao arrastamento medem componentes de força designadas por  $F_1$  e  $F_2$  e os defórmetros que são aliviados pelo arrastamento medem componentes de força designadas por  $F_3$  e  $F_4$ . Deste modo, no referencial do ortodinamómetro, rodado de  $45^\circ$  em relação ao eixo vertical do modelo, são medidas as componentes  $F_{12} = F_1 + F_2$  e  $F_{34} = F_3 + F_4$ , ortogonais entre si. A força resultante  $F_R$  é dada pela composição vectorial de  $F_{12}$  e  $F_{34}$ . O valor das cargas aerodinâmicas de sustentação,  $L$ , e de arrastamento,  $D$ , na lamela, é dado pela projecção de  $F_R$  nas direcções vertical e horizontal, respetivamente. As componentes de força na direcção normal,  $N$ , e tangencial,  $T$ , à lamela obtêm-se pela projecção de  $F_R$  num referencial rodado de um ângulo  $\alpha$  em relação ao referencial terrestre.

O sistema formado pelos dois ortodinamómetros foi calibrado por aplicação de cargas verticais em ambiente controlado. Posteriormente foi aferido o seu funcionamento aplicando cargas verticais e horizontais, tendo-se mantido neste último uma carga vertical igual ao peso da lamela a ser ensaiada. As curvas de calibração correspondentes a cada defórmetro encontram-se expressas na Figura 6.

Os sinais recolhidos dos defórmetros foram adquiridos por um DAQ PXI-1052 da National Instruments associado a um módulo SXI-1321.

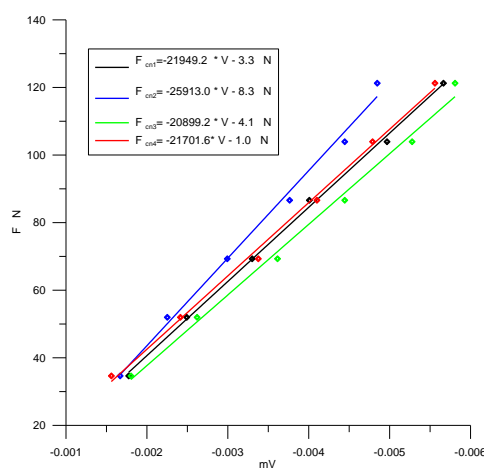


Figura 6 – Curvas de calibração dos defórmetros.

### 3. ENSAIOS

Os ensaios consistiram na medição das forças actuantes na lamela central para vários ângulos de incidência do escoamento. O modelo seccional foi basculado até  $20^\circ$  em ambos os sentidos ( $-20^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$ ), em intervalos de  $5^\circ$ , partindo da posição nominal (estrutura na vertical,  $\gamma = 0^\circ$ ). Deste modo, o ângulo de ataque variou no intervalo  $10^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ , simulando as situações de escoamento ascendente e descendente sobre a fachada, respetivamente.

Cada ângulo de incidência foi ensaiado com 5 patamares de velocidade média do escoamento: 3,8 m/s, 5,8 m/s, 7,5 m/s, 9,3 m/s e 11,0 m/s.

Complementarmente, foram efetuadas visualizações do escoamento com injeção de fumo com o modelo na posição nominal ( $\gamma = 0^\circ$ ) e na posição correspondente a  $\gamma = 20^\circ$ , com vista à deteção local da direção do escoamento em algumas regiões de interesse.



## 4. RESULTADOS

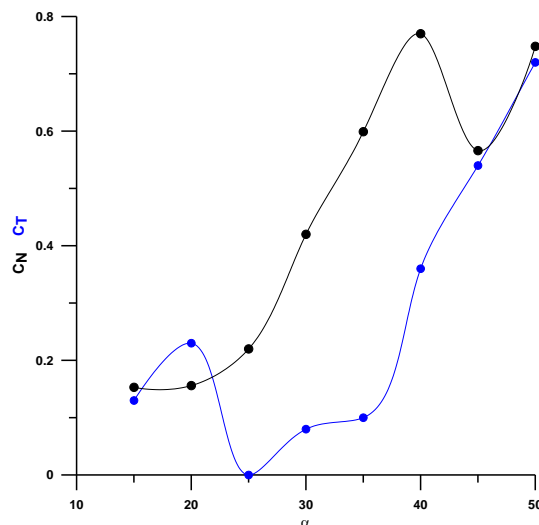
### 4.1. Coeficientes aerodinâmicos

Para cada velocidade e inclinação, calcularam-se os coeficientes de força aerodinâmica ( $C_F$ ) a partir da definição geral,

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho AU_\infty^2} \quad (1)$$

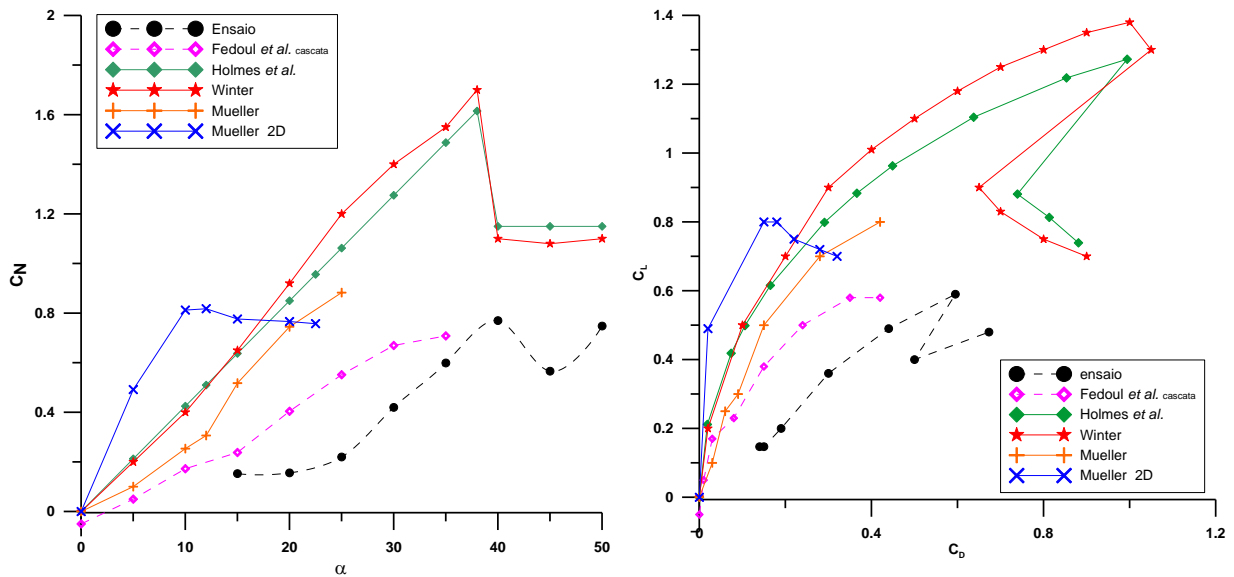
onde  $F$  é a intensidade de uma força aerodinâmica,  $\rho$  é a massa volúmica do ar,  $A$  é a área de referência e  $U_\infty$  é a velocidade do escoamento de aproximação. Obtiveram-se os valores dos coeficientes de força normal, de força tangencial, de sustentação e de arrastamento,  $C_N$ ,  $C_T$ ,  $C_L$  e  $C_D$ , respetivamente, em função do ângulo de ataque, a partir da regressão linear dos pares ( $F$ ,  $q$ ), onde  $q = 1/2 \rho AU_\infty^2$  é a pressão dinâmica do escoamento, obtidos para cada velocidade, após verificação da independência face ao número de Reynolds, na gama de variação considerada nos ensaios.

A Figura 7 apresenta a variação dos coeficientes de força normal e tangencial em função de  $\alpha$ . Do ponto de vista aerodinâmico, previa-se que a componente tangencial mantivesse um valor residual face à componente normal, o que claramente não acontece para  $\alpha < 25^\circ$  e  $\alpha > 35^\circ$ . Na origem desta irregularidade poderá estar um deficiente apoio dos defómetros devido ao desalinhamento entre o peso da lamela e o eixo da balança, com implicações na fiabilidade das medidas. Deste modo, nas configurações em que o desvio relativamente à posição inicial é significativo (valores mais elevados de  $|\gamma|$ ) ou em que as forças a medir são comparativamente pequenas relativamente ao peso da lamela, os valores de  $C_N$  obtidos deverão estar afetados de um erro não desprezável. Este motivo poderá explicar porque não se obteve uma evolução linear de  $C_N$  com  $\alpha$  na gama dos baixos ângulos de ataque, como seria de esperar. Tendo presentes as limitações do sistema de medição, optou-se por determinar  $C_L$  e  $C_D$  desprezando a componente tangencial da força, ou seja, assumindo  $C_T \approx 0$ , por forma a garantir uma maior consistência na análise dos resultados.



**Figura 7 – Gráfico dos coeficientes de força normal e tangencial em função do ângulo de ataque, obtidos experimentalmente.**

Para facilitar a interpretação dos resultados, é útil comparar os coeficientes aerodinâmicos obtidos para a lamela na cascata com os de placas planas em diversas condições. Na Figura 8 estão representados os valores de  $C_N$ , no gráfico da esquerda, e os valores de  $C_L$  e de  $C_D$  sob a forma de curvas polares, no gráfico da direita, para os diferentes casos considerados, reproduzidos a partir de dados publicados na literatura. Nenhum dos casos corresponde exatamente às condições do presente ensaio mas a sua análise permite identificar a influência da configuração em cascata e da envergadura das lamelas nas cargas aerodinâmicas. Estão representados os casos de placas finitas e isoladas [Holmes *et al.*(2006), Mueller (1999), Winter (1936)], placa infinita isolada (2D) [Mueller (1999)] e placa finita central numa cascata de três placas [Fedoul *et al.*(2014)], para além dos resultados do presente ensaio. Em todas as placas finitas o valor do alongamento é igual ao da lamela ensaiada, ou seja, 1. Na cascata de placas estudada por Fedoul *et al.* a solidez é 1, valor ligeiramente inferior ao da cascata do modelo ensaiado (1,14). Refira-se ainda que nos ensaios realizados por Mueller e por Fedoul *et al.* foi utilizado um plano de simetria para simular a placa finita com o alongamento referido, o que poderá introduzir algumas diferenças no escoamento relativamente aos ensaios realizados com o modelo completo.



**Figura 8 – Gráficos dos coeficientes aerodinâmicos e comparação dos resultados experimentais com dados publicados na literatura (ver texto): à esquerda,  $C_N$  em função de  $\alpha$ , e à direita, a curva polar  $C_L$  em função de  $C_D$ .**

Analisando a Figura 8, verifica-se que os resultados do presente ensaio estão mais próximos dos resultados obtidos por Fedoul *et al.* do que de quaisquer outros. Em ambos os casos se trata de uma configuração em cascata, o que é consistente com os menores valores de  $C_N$  face aos restantes casos. Tal deve-se ao efeito de ‘guiamento’ do escoamento promovido pela cascata, que favorece um equilíbrio de pressões entre as superfícies superior e inferior dos elementos centrais. Este efeito pode ser observado na Figura 9 onde a visualização com injeção de fumo torna clara a deflexão vertical produzida sobre o escoamento incidente quando este atravessa a cascata.



**Figura 9 – Visualização do escoamento com injeção de fumo para  $\alpha = 30^\circ$ . As setas assinalam a direcção do fumo a montante e a jusante da cascata.**

Não é claro, no entanto, porque não se obteve uma maior concordância entre os coeficientes do presente ensaio e os de Fedoul *et al.*. As diferenças observadas poderão dever-se quer às limitações experimentais deste trabalho, quer às diferenças nas condições de ensaio de Fedoul *et al.* previamente referidas (utilização de um plano de simetria).

Analisando os três casos relativos a placas finitas isoladas (Holmes, Winter e Mueller, na Figura 8), verifica-se que os resultados de Holmes e Winter revelam uma boa concordância entre si, sendo válidas as mesmas observações para Mueller que foram feitas para Fedoul *et al.*, a respeito das condições de ensaio. O interessante nestes dados é a ocorrência de uma redução abrupta em  $C_N$  quando o ângulo de ataque atinge um valor próximo dos  $37^\circ$ .

Esta situação corresponde à separação massiva do escoamento do lado do extradorso da placa, originando uma redução da sustentação que se designa habitualmente por entrada em perda (*stall*). Para ângulos superiores ao de perda  $C_N \approx 1,17$ , e  $C_L$  diminui progressivamente à medida que  $C_D$  aumenta e a placa se torna mais perpendicular ao escoamento (veja-se as curvas polares da Figura 8).

No caso da configuração em cascata, os dados de Fedoul *et al.* são insuficientes para avaliar a ocorrência de perda, que se prevê não ter um efeito de redução súbita em  $C_N$ . Pelo contrário, com a lamela ensaiada registou-se uma queda de  $C_N$  próximo de  $\alpha = 40^\circ$ , embora, como já se referiu, os resultados nesta gama de ângulos de ataque estejam afetados de um erro de medição não desprezável. É de esperar que o efeito da cascata atrase a entrada em perda da lamela mas os ensaios não podem ser considerados conclusivos a este respeito. Para além da incerteza nas medições, a presença dos perfis verticais nas extremidades das lamelas introduz uma perturbação que não está presente nas restantes placas de pequeno alongamento da Figura 8, o que dificulta ainda mais a comparação. Em todo o caso, as visualizações com injeção de fumo corroboram a hipótese de que a separação massiva na região do extradorso ocorre perto de um ângulo de ataque de  $40^\circ$ . Na Figura 10, do lado esquerdo, pode ver-se que o escoamento incidente sobre a lamela com  $\alpha = 30^\circ$  permanece substancialmente colado ao extradorso, situação que contrasta claramente com a visualização do lado direito, com  $\alpha = 50^\circ$ , onde o escoamento separa logo no bordo de ataque.



**Figura 10 – Visualização do escoamento com injeção de fumo para  $\alpha = 30^\circ$ , à direita, e  $\alpha = 50^\circ$ , à esquerda.**

Por fim, importa ainda discutir a influência do alongamento nos coeficientes aerodinâmicos das placas em geral. Este aspeto é particularmente relevante quando se considera um dispositivo de sombreamento que terá certamente uma envergadura superior à das lamelas ensaiadas. Quanto maior for o alongamento das placas, maior será o declive  $dC_N/d\alpha$  na gama linear de variação que ocorre até à entrada em perda, mas menor será também o ângulo de ataque de perda. Este comportamento está bem patente nos resultados de Mueller (2D) para uma placa infinita, tomado aqui como caso extremo. Neste caso, a perda ocorre para ângulos de ataque  $\alpha \approx 10^\circ$ , o que é ilustrativo das diferenças entre condições bidimensionais e tridimensionais do escoamento sobre placas planas.

Em placas de pequeno alongamento, o escoamento com origem nas extremidades tem uma grande influência sobre a distribuição de pressão global, promovendo o recolamento do escoamento no extradorso da placa [Winter (1936)] para ângulos de ataque que em condições bidimensionais conduziriam a uma separação de larga escala. Deste modo, a ocorrência de perda é atrasada, motivo pelo qual o coeficiente de força normal de uma placa finita isolada pode atingir valores superiores aos que ocorrem numa placa infinita isolada, na gama intermédia de ângulos de ataque representada na Figura 8.

Considerando todos os fatores de influência descritos, espera-se que numa cascata de lamelas de envergadura superior à que foi ensaiada, o declive  $dC_N/d\alpha$  seja também maior e o ângulo de perda menor relativamente aos resultados do ensaio, mas devido ao efeito de cascata o valor máximo de  $C_N$  não deverá atingir os valores reportados para as placas planas isoladas. Por este motivo, para efeitos de dimensionamento das cargas aerodinâmicas no sombreamento, é útil considerar um majorante de  $C_N$  baseado em

resultados obtidos para cascatas de placas de maior alongamento. Como tal, e face aos dados disponíveis na literatura, tomou-se como majorante neste estudo o valor  $C_N = 0.9$ , medido por Fedoul *et al.* [Fedoul *et al.*(2014)], a  $\alpha = 25^\circ$ , para um alongamento de 6.

#### 4.2. Estimativa das cargas aerodinâmicas

No cálculo da carga máxima aplicada pelo vento sobre as lamelas consideraram-se as condições regulamentares de velocidade do vento [RSA (1986)], ou seja, 25 m/s e 39 m/s, correspondentes ao valor médio ( $U_{10}$ ) e ao valor de rajada ( $U_{10}^{raj}$ ) a 10 m do solo, respetivamente. A força máxima a que as lamelas no interior da cascata estão sujeitas, em cada uma das condições, foi determinada com base no valor máximo de  $C_N$  na gama de ângulos de ataque de interesse. Obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 1 para a força máxima por unidade de área das lamelas, nos casos de alongamento ( $AR$ ) igual a 1 (modelo ensaiado) e alongamento igual a 6 (retirado de [Fedoul *et al.* (2014)]).

**Quadro 1 – Força máxima por unidade de área para as velocidades regulamentares do vento.**

	$U_{10} = 25$ m/s	$U_{10}^{raj} = 39$ m/s
Ensaio (cascata de lamelas $AR = 1$ )	300 N/m <sup>2</sup>	700 N/m <sup>2</sup>
Fedoul <i>et al.</i> (cascata de placas $AR = 6$ )	340 N/m <sup>2</sup>	800 N/m <sup>2</sup>

Note-se que na análise anterior se considerou que o escoamento sobre as lamelas poderia, em primeira aproximação, ser comparável ao escoamento sobre placas planas. As diferenças entre as duas geometrias deverão acentuar-se na gama dos menores ângulos de ataque e prevê-se que sejam pouco relevantes face às restantes incertezas dos resultados.

## 5. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados permitiram estudar algumas características marcantes do escoamento através de cascatas de placas planas com importância para a avaliação das cargas impostas pelo vento em sombreamentos em cascata.

A impossibilidade de modelar fisicamente a complexidade do escoamento que se desenvolve ao longo de uma fachada obrigou à simplificação do problema, tendo-se considerado apenas uma cascata de lamelas de envergadura limitada, sujeita a um escoamento incidente de ângulo de ataque variável. A necessidade de utilizar um modelo

“seccional” à escala real impôs algumas limitações aos ensaios, nomeadamente no que diz respeito à qualidade do escoamento de aproximação.

Foi desenvolvida uma balança aerodinâmica especificamente desenhada para a medição das cargas aplicadas na lamela central do modelo, tendo em conta os requisitos da instalação. Verificou-se que o conceito adoptado não garante totalmente a independência das medidas face ao peso da lamela quando se varia a inclinação do modelo. Por este motivo, os resultados dos ensaios são afectados de uma incerteza não desprezável que depende do ângulo de ataque.

Ainda assim, foi possível comparar os resultados dos ensaios com o desempenho aerodinâmico de placas planas isoladas ou inseridas numa configuração em cascata, tendo-se obtido uma consistência razoável entre os comportamentos esperados face a cada caso, avaliados em termos dos coeficientes aerodinâmicos  $C_N$ ,  $C_L$  e  $C_D$ .

Com base na análise comparativa efectuada, estimou-se um valor para a carga máxima imposta pelo vento sobre as lamelas do sombreamento de  $340 \text{ N/m}^2$  para uma velocidade do vento incidente de  $25 \text{ m/s}$  e de  $800 \text{ N/m}^2$  para uma velocidade do vento incidente de  $29 \text{ m/s}$ , seguindo especificações regulamentares. Esta estimativa utilizou os coeficientes de força normal medidos para uma cascata de placas planas de alongamento superior ao das lamelas ensaiadas [Fedoul *et al.* (2014)], situação que se considera mais aproximada do caso de um sombreamento real. Contudo, há aspectos construtivos dos dispositivos de sombreamento em questão cuja influência importa clarificar. Destaca-se, em particular, a presença dos perfis verticais de suporte das lamelas que ocupam 48% da extensão da corda, inibindo em certa medida os efeitos tridimensionais das extremidades responsáveis pelo atraso da perda.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abbott I, von Doenhoff A., 1959. Theory of wing sections, Dover Pub.
- Cochran, L.S. 2004. Design Features to Change and/or Ameliorate Pedestrian Wind Conditions, Proceedings of the ASCE Structures Congress, Nashville, Tennessee.
- Fedoul F., Parras L., del Pino C., Fenandez-Feria R. 2014. Experimental study of the aerodynamic characteristics of a low-aspect-ratio flat plate array in a configuration of interest for a tidal energy converter, Journal of Fluids and Structures, 48, 487-496.
- Holmes J. D., Letchford C. W., Lin N. 2006. Investigations of plate-type windborne debris – Part II: Computed trajectories, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94, 21-39.
- Mueller T. J. 1999. Aerodynamic measurements at low Reynolds numbers for mixed wing micro-air vehicles, RTO EN-9, Development and operation of UAVs for military and civil applications Course.



Oliveira F., Morais P., Ribeiro A., Martins L. and Freitas A., 2011. Analytical and experimental analysis of large flat jack deformeters, 6TH International Conference on Dam Engineering, Lisbon, Portugal, February 15-17.

RSA 1986 – “Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. D.-L. nº 357/85 de 2 de Setembro”, INCM, Lisboa.

Simiu, E.; Scanlan, R. 1996. Wind effects on structures. An introduction to wind engineering, John Wiley & Sons, 3rd Edition.

Winter H. 1936. Flow phenomena on plates and airfoils of short span. NACA Tech. Memorandum 798.