DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURA, SISTEMAS
AEROESPACIALES Y AEROPUERTOS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS

USO DE PARAPETOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA
SUCCIÓN PRODUCIDA POR EL VIENTO EN CUBIERTAS
DE EDIFICIOS

por

SANTIAGO PINDADO CARRIÓN

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

JOSÉ MESEGUER RUIZ

Dr. Ingeniero Aeronáutico

Madrid, Marzo de 2003

Tribunal nombrado por el Mgfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de
Madrid, el día.....de.....de 2003.

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....
de 2003, en

Calificación.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

ÍNDICE.

ÍNDICE	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Efecto del viento en edificios. Fenómenos aerodinámicos estáticos	4
1.3. Los torbellinos cónicos en tejados (o cubiertas) de edificios.....	9
1.4. Estimación del efecto de los torbellinos cónicos formados sobre cubiertas planas en el Eurocódigo 1	20
1.5. Uso de parapetos en los tejados	23
1.6. Objetivos de la tesis doctoral	26
2. TÉCNICAS EMPLEADAS	29
2.1. Experimentación en los túneles aerodinámicos A9 y S1	30
2.2. Análisis semi-empírico de los torbellinos cónicos. Modelo de Cook.....	51
3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS VERTICALES (SÓLIDOS Y POROSOS), Y PARAPETOS EN VOLADIZO, SOBRE LA CARGA AERODINÁMICA EN LA CUBIERTA PLANA DE UN EDIFICIO	57
3.1. Estudio de la influencia del ángulo de incidencia del viento en la carga aerodinámica en la cubierta del modelo de ensayos M3D1	58
3.2. Estudio de la influencia de parapetos verticales sólidos y porosos en la carga aerodinámica en la cubierta del modelo de ensayos M3D1	68

3.3. Estudio de la influencia de parapetos en voladizo en la carga aerodinámica en la cubierta de los modelos de ensayos M2D y M3D1.....	102
3.4. Análisis mediante visualización por termografía infrarroja del efecto de los parapetos, verticales y en voladizo, en el flujo de aire sobre la cubierta del modelo M3D2	120
4. CONCLUSIONES	135
5. REFERENCIAS	141
ANEXO 1. Ajuste del modelo de Cook al campo de medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1	149
ANEXO 2. Estudio experimental del coeficiente de presión en las fachadas de un edificio de forma cúbica.....	161
ANEXO 3. Estudio experimental del coeficiente de presión en una cubierta curva	187
POSTFACIO (AGRADECIMIENTOS).....	207
CURRICULUM VITAE	209

RESUMEN.

En esta tesis doctoral se analiza la eficacia de parapetos verticales porosos y parapetos en voladizo para reducir la carga aerodinámica que el viento produce en la cubierta de edificios de baja altura. Para ello se estudian los parámetros dependientes de los parapetos que afectan a la carga aerodinámica (porosidad, altura, longitud de los voladizos). Se ha encontrado que, dependiendo del valor de esos parámetros, ambos tipos de parapetos, verticales porosos y en voladizo, pueden reducir de forma significativa la carga del viento sobre las mencionadas cubiertas.

Mediante la medida experimental, en túnel aerodinámico, del coeficiente de presión en la cubierta de modelos de ensayos se analiza cómo los mencionados parapetos afectan al fenómeno de los torbellinos cónicos, responsable de la succión más alta que puede darse en cubiertas de edificios. Además de la medida directa del coeficiente de presión se ha analizado el fenómeno de los torbellinos cónicos mediante el modelo semi-empírico de Cook, con el que se discrimina este fenómeno según su intensidad, posición y ángulo de apertura.

Por último, se ha puesto a punto un método relativamente simple para visualizar mediante termografía infrarroja el flujo de aire sobre la cubierta de modelos de edificios. Mediante este método se han visualizado los torbellinos cónicos y, de forma cualitativa, la influencia de los parapetos ensayados en los mismos.

ABSTRACT.

The efficiency of porous and cantilever parapets is analyzed as a way to reduce the wind loads on low-flat roofs. Porosity, height and length of the parapets are studied. It has been found that for certain values of these parameters an important reduction of the load on the roofs can be reached with both kinds of parapets.

The effect of the parapets on the conical vortices established over the roofs has been investigated using wind tunnel testing. Both, the direct analysis of the pressure coefficients and Cook's equation have been used to describe the effects of the parapets on the conical vortices.

Infrared thermography visualization method has been used to analyze the influence of the parapets on the flow (i.e., the conical vortices), over the testing model roof.

1. INTRODUCCIÓN.

En este primer capítulo se exponen las razones que han conducido a la realización de esta tesis doctoral y, además, se presentan los fenómenos aerodinámicos a los cuales se hace referencia a lo largo del texto.

Esta introducción ha sido dividida en seis partes. La primera de ellas es una pequeña reflexión sobre los antecedentes históricos que han conducido al desarrollo de la Aerodinámica Civil, entendida como la disciplina dedicada al estudio de los fenómenos aerodinámicos que se producen en la interacción entre el viento y los edificios. En la segunda parte se indican algunos de esos fenómenos aerodinámicos. La tercera parte está dedicada a explicar las características de los torbellinos cónicos, que son el fenómeno aerodinámico potencialmente más dañino para las cubiertas de edificios. En la cuarta parte se expone de forma somera la normativa de uso recomendado en España para el cálculo de las acciones del viento en cubiertas planas de edificios. En la quinta parte se hace una revisión de los trabajos encontrados en la literatura disponible dedicados al estudio del efecto de parapetos en los bordes de cubiertas de edificios. Por último, en la sexta parte se exponen los objetivos de esta tesis.

1.1. Antecedentes.

Los efectos del viento sobre construcciones civiles se empezaron a tener en cuenta a partir de mediados del siglo XIX, debido a una serie de accidentes en puentes entre los que destacan los puentes de Tay y de Tacoma Narrows (Stansby y Wootton, 1975). El

primer suceso, ocurrido en 1879 y donde hubo pérdida de vidas humanas, marca el comienzo de los estudios experimentales destinados a dimensionar la carga producida por el viento en puentes. Con el segundo suceso, el colapso por flameo a torsión del puente de Tacoma Narrows ocurrido en 1940, se inician los estudios de la interacción no estacionaria entre el viento y un puente, cuyo hito quizás más significativo se produce en 1949 con el modelo de Farquharson y Vincent para el estudio de la estabilidad de puentes colgantes (Cook, 1985).

El sentido común siempre ha avisado de las consecuencias de un viento fuerte, como lo atestigua que desde tiempo inmemorial haya habido tejas de barro sujetas por piedras en casas rurales (figura 1.1). No obstante, este conocimiento basado en la experiencia estaba circunscrito a aquellas zonas geográficas donde el viento es intenso, o a actividades donde este viento puede convertirse en un azote como, por ejemplo, la agricultura. La inclusión de nuevos materiales y técnicas de construcción (acero, hormigón armado, vidrio, materiales compuestos...) permitieron en su día a arquitectos e ingenieros un despegue de los conceptos y formas tradicionales en la construcción, con el efecto añadido de que estas nuevas formas de construcción, al tener una menor relación peso/tamaño, han demostrado ser más sensibles a la acción del viento.

Figura 1.1. Protección de las tejas frente al viento mediante la colocación de piedras en el tejado de una construcción rural en Pradosegar (Ávila). Foto cortesía de Olalla Hernández.

Una vez constatada la importancia de estudiar el efecto del viento en las construcciones civiles, se comenzó una labor sistemática para establecer códigos de cálculo (Eurocódigo 1, 1998; ASCE 7-98, 2000) que ayudaran a arquitectos e ingenieros a prever los efectos aerodinámicos en sus proyectos. Estos códigos, que son en realidad normas relativamente sencillas a través de las cuales es posible calcular la acción del viento (o la presión en determinadas superficies) sobre una colección amplia de formas básicas, han ido evolucionando con los años debido tanto a las nuevas técnicas de

análisis como a la inclusión de nuevas formas básicas.

A pesar de esta evolución y mejora de los códigos con el tiempo, éstos generalmente dan lugar a una cierta sobrestimación de las cargas del viento (Meseguer y otros, 2001), lo cual repercute directamente en el coste de un proyecto, aunque puede darse el caso de que un estudio específico para estimar con más precisión la carga aerodinámica sea económicamente más caro que el sobredimensionamiento de la misma. En cualquier caso, hoy por hoy, para ajustar con precisión la carga aerodinámica a valores más reales que los obtenidos mediante el empleo de los mencionados códigos de cálculo, se ha de recurrir a la experimentación en túnel aerodinámico. Por otra parte, la capacidad creativa de los arquitectos e ingenieros, y el ansia de construcciones emblemáticas por parte de amplios sectores de la sociedad, hace que en muchas ocasiones sea imposible la aplicación de los códigos existentes para el cálculo de las acciones del viento sobre las obras proyectadas. En este otro caso también es aconsejable (cuando no obligado por el sentido común) realizar un estudio en túnel aerodinámico.

1.2. Efecto del viento en los edificios. Fenómenos aerodinámicos estáticos.

Actualmente, debido a la gran experiencia acumulada en ensayos experimentales, se tiene una noción bastante clara de los fenómenos aerodinámicos estáticos que se producen al incidir el viento sobre un edificio. Con fenómeno “estático” se pretende denominar a aquel que excluye el movimiento del edificio (o estructura a considerar), es decir, se supone que éste es infinitamente rígido. Ello no quiere decir que el movimiento del aire sea estacionario ni que se obvien los efectos de la turbulencia del mismo. Una

clasificación de estos efectos aerodinámicos estáticos puede ser la siguiente:

- Aceleración de la corriente. Puede ser provocada por un encajonamiento del flujo de aire o por un cambio de dirección del mismo (por ejemplo, cerca de una esquina). Como consecuencia de esta aceleración se produce una reducción local de la presión estática, o llamado de otro modo, un efecto de succión sobre la superficie que limita el fluido.
- Deceleración de la corriente. Se produce al obstaculizarse el paso de flujo de aire. El resultado es un aumento de la presión local.
- Desprendimiento de la corriente. Este fenómeno se produce generalmente cuando el flujo de aire es forzado, por el contorno que lo limita, a seguir una trayectoria que implica una curvatura excesiva. El desprendimiento de la corriente conlleva la aparición de una burbuja de recirculación o de una estela, siendo característica de estas regiones del flujo una presión baja y, en media, bastante uniforme.
- Readherencia de la corriente. Este fenómeno está marcado por el final de una zona de desprendimiento. Se produce cuando el flujo de aire, tras el desprendimiento, vuelve a adherirse a la frontera de la región fluida. La readherencia de la corriente implica un aumento de la presión local.
- Generación de torbellinos cónicos. Un torbellino cónico se produce cuando la corriente de aire se desprende en una línea o contorno que forma un cierto

ángulo respecto de la dirección del viento. Éste es un fenómeno conocido en aeronáutica pues se presenta en los aviones de alas en delta cuando el ángulo de ataque pasa de un cierto valor crítico. El torbellino que se crea en las alas genera una succión extra que aumenta la sustentación global de la aeronave. De la misma forma, un torbellino cónico actuando sobre la superficie de un edificio genera una fuerte succión debajo de su eje.

De estos fenómenos aerodinámicos, los más preocupantes para la ingeniería civil son aquellos que producen un efecto de succión local sobre el contorno de la estructura sometida al viento, esto es, aceleraciones de la corriente, desprendimientos y torbellinos cónicos, siendo de poca relevancia el caso contrario (sobrepresión). Ello es debido a que, como es sabido, un aumento de presión local tiene un límite máximo dado por el valor que alcanza la presión estática al decelerarse isoentrópicamente la corriente de aire hasta la velocidad nula (punto de remanso). Sin embargo, este límite no existe para el efecto contrario, es decir, para una disminución de presión.

Sea el coeficiente de presión definido como:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}, \quad (1)$$

donde p es la presión estática en el punto donde se evalúa el coeficiente de presión, p_∞ es la presión estática corriente arriba de ese punto, donde la corriente no está perturbada por la presencia de ningún obstáculo, y, finalmente, $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ es la presión dinámica de la corriente incidente (ρ es la densidad del aire y U_∞ su velocidad corriente arriba del obstáculo). De acuerdo con lo dicho, el coeficiente de presión máximo que el aire ejerce

sobre un edificio es $c_p = 1$, no existiendo límite teórico alguno para la succión máxima que puede producir una corriente sobre las paredes de un obstáculo. Aún a riesgo de pecar de descender hasta cotas muy elementales en las explicaciones conviene hacer hincapié en el criterio general de signos de uso común en la aerodinámica, “succión” quiere decir una depresión producida por una aceleración del aire en movimiento y, como tal, se caracteriza por producir un coeficiente de presión local negativo, $c_p < 0$. Por el contrario “remanso”, además de indicar una zona donde la velocidad del aire se ha reducido considerablemente respecto a la de la corriente libre, caracteriza una región del flujo donde el coeficiente de presión es positivo, $c_p > 0$.

Como se ha mencionado anteriormente, el viento es un fenómeno no estacionario y como tal puede producir cargas no estacionarias sobre una estructura por más que ésta sea rígida. Estas cargas no estacionarias no suelen ser preocupantes, a no ser que produzcan la excitación de modos propios de la estructura a considerar, pero sin embargo sí deben tenerse en cuenta a la hora de dimensionar los recubrimientos de la misma. La razón para ello es que las mencionadas cargas no estacionarias pueden producir un aumento de succión instantáneo en un área pequeña del recubrimiento (en comparación con el tamaño de la estructura). Como, además, algunos edificios (sobre todo los grandes) tienen recubrimientos formados por innumerables piezas de forma más o menos plana, puede ocurrir que, en un cierto instante, se produzca sobre alguna de esas piezas una carga mayor que la estimada suponiendo que la corriente de aire es estacionaria. En este caso esa pieza sería arrancada por el viento si no se han adoptado medidas al respecto.

Para cuantificar de alguna forma la contribución de la turbulencia atmosférica a la carga aerodinámica sobre una superficie cuyo área es ΔA , se ha modificado la ya consabida expresión de la carga aerodinámica, $L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 c_p \Delta A$, mediante la introducción de dos coeficientes (la intensidad de la turbulencia del viento, I_u , y el factor de pico, k_p), de modo que esta expresión queda de la siguiente forma:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 c_p \Delta A (1 + 2k_p I_u). \quad (2)$$

La intensidad de la turbulencia del viento incidente es un factor que depende de la altura sobre el terreno y de los obstáculos que existan a barlovento del punto en donde se estima la carga aerodinámica (Dyrbye y Hansen, 1995). El factor de pico no es un valor absoluto, depende tanto del tamaño de la estructura que sufre la carga aerodinámica (Plate y Kiefer, 2001), como de las características locales del flujo de aire. En aquellas zonas donde la corriente está adherida el factor de pico tiene un valor comprendido entre $k_p = 3$ y $k_p = 5$, mientras que en las zonas donde la corriente está desprendida el valor del factor de pico es mayor, $k_p \approx 6-7$, llegándose a medir factores de pico del orden de $k_p \approx 10$ (Dyrbye y Hansen, 1995). Esta diferencia se debe a que la distribución de probabilidad de la presión en regiones en donde la corriente está adherida y en donde está desprendida difiere. En las zonas donde la corriente está adherida la distribución de probabilidad se ajusta a un modelo gaussiano, mientras que en las zonas de flujo desprendido la distribución de probabilidad se asemeja más a un modelo exponencial (Cook, 1982; Kumar y Stathopoulos, 1998).

Tal y como se ha descrito en los párrafos anteriores, es posible tener en cuenta los efectos no estacionarios del viento al estimar la carga aerodinámica estática en el

recubrimiento exterior de una estructura. En esta tesis, sin embargo, sólo se consideran cargas aerodinámicas estáticas y estacionarias, es decir, las medidas experimentales realizadas representan la media de un conjunto de muestras suficientemente amplio para asegurar la medida de la carga estática sin incluir los efectos no estacionarios. Se ha adoptado este criterio ya que, siendo el objetivo principal de esta tesis la comparación entre la efectividad de distintos dispositivos destinados a reducir la carga aerodinámica sobre una cubierta, esta comparación será más fiable en primera aproximación cuanto más independiente sea de factores aleatorios como son los efectos no estacionarios del flujo. Se ha de recalcar, además, que este mismo criterio ha sido seguido por otros autores en trabajos similares (Stathopoulos y otros, 1999; Kind, 1986).

1.3. Los torbellinos cónicos en los tejados (o cubiertas) de edificios.

De los fenómenos aerodinámicos antes mencionados como potencialmente más peligrosos para una estructura, el más virulento es el torbellino cónico, el cual ha sido ampliamente estudiado en la rama aeronáutica de la aerodinámica, ya que es característico de las alas en delta, véase la figura 1.2. Se ha mencionado anteriormente que este tipo de torbellino, al representar un aumento de succión sobre el extradós, proporciona un aumento de sustentación al ala. Ello justifica el esfuerzo hecho por diversos investigadores ligados a la aeronáutica para estudiar, comprender y controlar los torbellinos cónicos formados en las alas en delta (Johnson y otros, 1980; Smith, 1984; Payne y otros, 1988; Visser y Nelson, 1993; Deng y Gursul, 1996; Mitchell y Déleroy, 2001).

Figura 1.2. Visualización en túnel hidrodinámico de un torbellino cónico formado en un ala delta (Michiels y Pindado, 1994).

En las alas en delta se ha comprobado experimentalmente que este torbellino es inestable. Una vez generado, el torbellino va ganando grosor debido a la mayor velocidad tangencial de la corriente que rebordea el borde de ataque del ala, y una vez que la relación entre las velocidades tangencial, v_θ , y longitudinal, v_z , del torbellino cónico (véase la figura 1.3) supera el valor $v_\theta/v_z = 1,3$, se produce el fenómeno llamado colapso del torbellino (o *vortex breakdown*, Mitchell y Délery, 2001). Este colapso del torbellino consiste en que el eje del torbellino empieza a enrollarse sobre sí mismo, véase la figura 1.3. Una vez iniciado el colapso del torbellino, éste tiende inmediatamente a disiparse. El que se produzca o no este colapso del torbellino preocupa en la aerodinámica aeronáutica por el descenso súbito de la sustentación del ala que produce, y también de la maniobrabilidad de la aeronave (Payne y otros, 1988). No obstante, debido a que el colapso de los torbellinos cónicos en alas en delta es asimétrico (y por lo tanto produce en la aeronave un brusco momento de balance), hoy día se especula con la posibilidad de controlar este fenómeno para aumentar la maniobrabilidad de una aeronave en un momento dado (Mitchell y Délery, 2001).

El fenómeno de los torbellinos cónicos en la aerodinámica civil guarda una aparente gran similitud con los torbellinos generados en los aviones de alas en delta. Kawai y Nishimura (1996), han estudiado mediante ensayos en túnel aerodinámico los torbellinos cónicos generados en el tejado de un paralelepípedo de base cuadrada cuyas fachadas forman 45° con la corriente incidente, y han descrito una estructura similar a la antes mencionada tras el colapso del torbellino. Estos autores, han hallado el espectro de frecuencias de las señales de presión en determinados puntos del tejado del modelo, llegando a la conclusión de que existen dos frecuencias características. Una primera, baja, debida a la oscilación lateral de los torbellinos, y otra, alta, debida a un proceso de

giro del eje del torbellino sobre otro eje tal y como se representa en la figura 1.4. Este efecto de giro del eje del torbellino sobre otro eje es, a primera vista, semejante a la primera configuración del torbellino en un ala delta una vez que se ha producido el colapso del mismo.

Figura 1.3. Dibujos esquemáticos de la formación de torbellinos cónicos en alas en delta, (a) torbellino antes de su colapso, (b) torbellino colapsado. Se indican las velocidades tangencial, v_θ , y longitudinal, v_z , del flujo correspondiente al torbellino cuya relación gobierna el colapso del mismo.

Figura 1.4. Esquema de la estructura de eje del torbellino cónico según Kawai y Nishimura (1996).

La situación descrita anteriormente, esto es, la que posibilita la formación de torbellinos cónicos en la cubierta de un edificio, es la situación más conocida y estudiada entre las que dan lugar a la aparición de torbellinos cónicos en la superficie exterior de edificios. Tal y como se ha mencionado, cuando el viento incide sobre un edificio de baja altura con un cierto ángulo respecto de las fachadas, se propicia la aparición de uno o dos torbellinos cónicos en las proximidades de la esquina del tejado más adelantado respecto al viento. Sin embargo, se ha de tener presente que existen otras situaciones dentro de la aerodinámica civil que pueden dar lugar a este tipo de fenómeno. Por ejemplo, dos tipos de torbellinos cónicos ligados al flujo de aire en las fachadas de edificios altos han sido descritos por Okuda y otros (1997). El primero es de tipo estacionario y muy similar al que aparece en los tejados de edificios bajos (Kawai, 2002), este torbellino se produce en la parte más alta de las fachadas del edificio cuando éste se sitúa con un determinado ángulo de incidencia respecto al viento. El otro tipo de torbellino está ligado a la aparición de una calle de torbellinos de Kármán: al haber más desplazamiento de aire en la parte intermedia de las fachadas que en la parte inferior, en los primeros estados de formación de cada torbellino de la calle éste tiene forma cónica (véase en la figura 1.5 una representación de los tres tipos de torbellinos cónicos

mencionados en este párrafo). En los trabajos de Okuda y otros, y Kawai, no se aclara para qué altura de un edificio (o la relación entre su altura y su dimensión horizontal) se producen los torbellinos cónicos en las fachadas. Sin embargo, experimentos realizados en IDR/UPM demuestran que este tipo de torbellinos no aparecen en las fachadas de edificios cuya altura sea del mismo orden que la dimensión horizontal (véase el anexo 2).

Como ya se ha avanzado, una vez establecido el torbellino sobre un tejado éste genera una depresión muy intensa, siendo obviamente máxima en la proyección del eje del torbellino sobre el tejado (Banks y otros, 2000). En cubiertas de edificios reales se han medido coeficientes de presión muy bajos, desde $c_p \approx -2$ (Hoxey y otros, 1998) o $c_p \approx -4$ (Stathopoulos y otros, 1990) hasta valores inferiores a $c_p = -20$ (Hoxey y otros, 1998, Wu y otros, 2001). Las diferencias entre las medidas de presión hechas en edificios reales por distintos investigadores pueden ser atribuidas a distintos factores, como los distintos tamaños y posiciones de las tomas de presión instaladas, diferencias en el filo de las aristas que delimitan las cubiertas, o la dificultad consistente en medir las características del viento incidente (velocidad media, características estadísticas, dirección) empleadas en la adimensionalización de la presión medida.

Figura 1.5. Dibujos esquemáticos de las configuraciones de flujo que dan lugar a torbellinos cónicos en la superficie de edificios. (a) Tejados de edificios bajos cuando el viento incide con un cierto ángulo respecto de las fachadas (torbellino estacionario), (b) tejados y parte superior de las fachadas de edificios altos cuando el viento incide con un cierto ángulo respecto de las mismas (torbellinos estacionarios), (c) parte baja de las fachadas de edificios altos (torbellinos no estacionarios, ligados al fenómeno de la calle de torbellinos de Kármán). Los dibujos (b) y (c) son de Kawai (2002).

Valores muy negativos, es decir, bajos del coeficiente de presión, c_p , han sido también medidos en numerosos estudios en túnel aerodinámico (Kind, 1986; Kind, 1988; Lin y otros, 1995; Tieleman, 1996; Tieleman y otros, 1996). Los valores medios del coeficiente de presión medidos en un ensayo a escala son semejantes a los valores medidos en un edificio real (Meseguer y otros, 2001; Peterka y otros, 1998), si bien hasta la fecha no se ha llegado a reproducir en un ensayo a escala en túnel aerodinámico los valores extremos del coeficiente de presión que pueden medirse en un edificio real. Cook (2002) explica esta disparidad de los coeficientes por dos razones, la primera consiste en la dificultad de escalar debidamente una toma de presión desde el tamaño del edificio real al modelo de ensayos. La segunda razón estriba en la dependencia del tamaño del núcleo del torbellino cónico con el filo del borde del tejado en donde este torbellino se genera. Un borde más afilado produce un torbellino de núcleo más fino el cual produce mayor succión.

En la actualidad, gracias a los resultados obtenidos en túnel aerodinámico, se sabe que los torbellinos cónicos formados en la cubierta de un edificio son más intensos cuando la corriente incide con un ángulo cercano a 45° , medido respecto a las fachadas que forman la esquina de la cubierta donde los mencionados torbellinos se desarrollan (Kind, 1988). Además, la succión que estos torbellinos crean sobre la cubierta crece de forma inversa a la distancia a la esquina en donde se generan los torbellinos. Algunos autores (Lin y otros, 1995; Letchford y Marwood, 1997) han establecido una relación entre la succión y la distancia a la esquina inversamente proporcional a la raíz cuadrada de ésta última. Otros autores (Cook, 1990; Williams y Baker, 1997) por el contrario, sugieren una relación logarítmica.

En cuanto a cómo afecta la turbulencia a la succión producida por un torbellino cónico formado sobre la cubierta de un edificio, la información publicada en distintos trabajos hasta el día de hoy es, en cierta manera, contradictoria. Algunos autores sugieren que la turbulencia de la corriente incidente afecta a los torbellinos cónicos disminuyendo su intensidad, lo que produce una disminución de la succión sobre la cubierta (Kramer y otros, 1979; Kawai, 1997), mientras que otros indican que el efecto de la turbulencia sobre la distribución de presión media en un tejado es pequeño (Castro y Robins, 1977; Kind, 1986), siendo ello debido a que la readherencia de la corriente está gobernada por el torbellino cónico y no por la turbulencia de la capa de mezcla (como sí ocurre en desprendimientos de flujo bidimensionales).

Sin embargo, a pesar de que en un principio la turbulencia produzca una disminución de la intensidad de los torbellinos cónicos, varios investigadores han relacionado mediante ensayos en túnel aerodinámico la aparición de picos de succión intensos en la cubierta con el nivel de turbulencia de la corriente incidente. Letchford y Marwood (1997) y Wu y otros (2001), en sus respectivos trabajos, han llegado a la conclusión de que existe una correlación entre los mencionados picos de succión y la turbulencia lateral y las variaciones locales del ángulo de ataque de la corriente incidente respecto al plano que forma la cubierta. Para tener en cuenta estos picos de succión en la estimación de las acciones del viento sobre la cubierta de un edificio es para lo que se ha de modificar la expresión de la carga aerodinámica, introduciendo el factor de pico, k_p , y la intensidad de la turbulencia del viento incidente, I_w , tal y como ya se ha descrito.

Ahora bien, el mecanismo por el cual la turbulencia afecta a los torbellinos cónicos sigue sin ser explicado en profundidad en la literatura disponible. Es muy posible que los picos instantáneos de succión producidos en una cubierta dependan del reparto de la energía entre las escalas de la turbulencia presente en la corriente libre, esto es, de la relación entre el tamaño de los torbellinos cónicos establecidos sobre esa cubierta y el tamaño de los torbellinos que constituyen la turbulencia presente en el viento incidente. En este sentido es particularmente interesante el trabajo de Banks y Meroney (2001), quienes han formulado un modelo analítico de un torbellino cónico formado sobre la cubierta de un edificio. Estos autores han llegado a la conclusión de que el aumento de la succión en la cubierta de un edificio producido por un cambio de la velocidad o dirección de la corriente incidente, no sólo es debido a la mayor succión debida a la corriente exterior al torbellino, sino además a un efecto de amplificación de esta succión causado por el propio torbellino cónico. Por ello, y tal y como ya se ha mencionado, en la zona de la cubierta afectada por el torbellino cónico el factor de pico es más elevado que en otras zonas de la cubierta donde la corriente está adherida.

En los últimos párrafos se ha descrito, hasta donde se tiene conocimiento, la relación entre la turbulencia de la corriente libre y los torbellinos cónicos que se forman en los tejados. Ello no pretende ser más que un complemento a la descripción del fenómeno aerodinámico que constituyen los torbellinos cónicos formados sobre un tejado ya que, en sí, la mencionada relación entre la turbulencia de la corriente libre y los torbellinos cónicos constituye todo un campo de investigación que, por descontado, queda fuera del alcance de la presente tesis doctoral.

Para realizar los estudios experimentales objeto de esta tesis se ha optado por trabajar con modelos de edificios que pueden ser clasificados como de baja altura. No se ha encontrado en la literatura disponible un criterio claro para distinguir entre edificios altos y bajos. En el Eurocódigo 1 (1998) además de no proporcionarse un criterio de clasificación respecto a la altura de los edificios, tampoco se hace distinción alguna entre la carga aerodinámica en la cubierta correspondiente a edificios altos o bajos. En la norma estadounidense ASCE 7-98 (2000), sin hacerse tampoco una distinción clara entre edificios por medio de su altura, sí se establecen criterios para estimar la carga aerodinámica en cubiertas de edificios en función de la altura de éstos. Se distinguen en esta norma las cargas aerodinámicas en cubiertas de edificios bajos, de altura menor a 33 pies (10 m) y cuya dimensión longitudinal esté entre dos y cinco veces la altura. Los datos correspondientes a la anterior categoría pueden aplicarse también a edificios de hasta 60 pies (18 m) de altura y cuya relación entre las dimensiones vertical y horizontal no exceda la unidad. Sin embargo, para edificios más altos o más esbeltos se ha de recurrir a otros datos, también incluidos en la norma.

La relación entre la carga aerodinámica y las dimensiones relativas de un edificio ha sido estudiada en los trabajos de Lythe y Surry (1983) y Kramer y Gerhardt (1991). Lythe y Surry definen como edificios bajos aquellos cuya altura es menor de 65 pies (20 m) y, además, cuya dimensión longitudinal es superior a dos veces su altura. Estos autores han concluido que las diferencias relativas a la carga aerodinámica entre las regiones de la cubierta más próximas a las esquinas y bordes, y las zonas más “interiores” de la misma, son relevantes en edificios bajos pero se atenúan en edificios altos. El estudio de Kramer y Gerhardt se centra en edificios bajos, y en el mismo se concluye que, para edificios cuya relación entre las dimensiones vertical y horizontal

sea mayor que 0,05, se forman claramente los torbellinos cónicos en las esquinas de la cubierta, cuando el viento incide sobre ellas con el ángulo apropiado. Y, además, que conforme aumenta la altura relativa de los edificios, la succión en la esquina y los bordes de la cubierta también aumenta.

Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se han realizado estudios experimentales con modelos de edificios bajos cuya relación entre su altura y su anchura es 0,5. Se ha adoptado este criterio con el objeto de trabajar con una configuración de flujo en la que sea claramente identificable la acción de los torbellinos cónicos sobre la cubierta de los modelos de ensayos.

1.4. Estimación del efecto de los torbellinos cónicos formados sobre cubiertas planas en el Eurocódigo 1.

Para comprender la importancia de los torbellinos cónicos en las cargas aerodinámicas sobre cubiertas, quizás sea conveniente exponer cuál es la normativa de uso recomendado en España para el cálculo de las acciones del viento en cubiertas de edificios, y examinar en qué medida se ha tenido en cuenta en esta normativa la acción de los torbellinos cónicos. La norma para la estimación de las acciones del viento en estructuras civiles es el llamado Eurocódigo 1 (1998), el cual es de aplicación en numerosos países europeos. Este código contiene una serie de tablas de valores y fórmulas que ayudan a estimar la carga aerodinámica máxima sobre diversos tipos de cubiertas (tejados), bien sean planas o a una, dos y hasta cuatro aguas. En todos los casos se divide la cubierta en varias zonas y se proporcionan dos coeficientes de presión

a aplicar en cada una de ellas según su superficie sea menor que 1 m^2 o mayor que 10 m^2 (para superficies intermedias en el Eurocódigo 1 se establece una interpolación logarítmica). En la figura 1.6 se representa esquemáticamente una cubierta plana tal y como se describe en el Eurocódigo 1. En ella se puede apreciar que la cubierta está dividida en distintas zonas, “F”, “G”, “H” e “I”. En la tabla 1.1 están contenidos los coeficientes de presión a aplicar en cada una de estas zonas. Estos coeficientes de aplicación corresponden a una dirección del viento perpendicular a uno de los bordes de la cubierta. No obstante, se advierte en el Eurocódigo 1 que el coeficiente de presión proporcionado en cada caso representa el valor extremo de la carga cuando el viento barre un ángulo de $\pm 45^\circ$ alrededor de la dirección especificada.

Figura 1.6. Esquema del Eurocódigo 1 (1998) donde se indican las distintas zonas en que se divide una cubierta plana a la hora de estimar la carga aerodinámica sobre ella.

Tabla 1.1. Coeficientes de presión externa para cubiertas planas, con y sin parapetos verticales sólidos, proporcionados en el Eurocódigo 1 (1998). h es la altura del edificio, h_p es la altura de los parapetos (en caso de haberlos). Se ha respetado la notación del Eurocódigo 1 en cuanto a las alturas de los parapetos y del edificio, no coincidiendo con la adoptada en esta tesis, donde h es la altura de los parapetos y H es la altura del modelo de ensayos.

		Zona							
		F		G		H		I	
		$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$	$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$	$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$	$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$
Aleros con bordes cortantes		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
Con parapetos	$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
	$h_p/h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	
	$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	$\pm 0,2$	

El máximo coeficiente de presión indicado en la tabla 1.1 es $c_{pe, 1} = -2,5$, correspondiente a la zona caracterizada como “F” (véase la figura 1.6) cuando ésta tiene una superficie igual o menor que 1 m^2 . La zona “F” corresponde a las esquinas de la cubierta que es donde, de producirse un torbellino cónico, éste generaría la mayor succión. Sin embargo, como se ha mencionado en el apartado 1.3, medidas del coeficiente de presión hechas en un edificio a escala real arrojan valores más altos, $-c_p \approx 4$ (Stathopoulos y otros, 1990). La explicación a esta posible discrepancia es que aunque para el cálculo de la estructura el coeficiente de aplicación del Eurocódigo 1

(1998) es el correcto, ello no excluye que existan zonas de reducida dimensión en la cubierta en las que el coeficiente de presión sea inferior en todo punto a ese límite dado en la norma ($c_{pe1} = -2,5$). Por ello es importante tener alguna forma de caracterizar el fenómeno de los torbellinos cónicos y la succión que producen, y en este sentido es particularmente valiosa la aportación de Cook (1990), un modelo semi-empírico para predecir las cargas generadas por un torbellino cónico sobre un tejado, pues de esta forma es posible relacionar áreas y coeficientes de presión para calcular las cargas máximas sobre el revestimiento de una cubierta y así poder dimensionar correctamente sus anclajes. En el capítulo 2 de esta tesis se exponen las características de este modelo semi-empírico.

1.5. Uso de parapetos en los tejados.

El uso de parapetos verticales en el borde de las cubiertas de edificios para aliviar las cargas aerodinámicas ha sido estudiado con cierta profusión en los dos últimos decenios. En el trabajo publicado por Lythe y Surry (1983) se estudia el efecto de parapetos en el tejado de un modelo de edificio de altura variable. Estos autores concluyen que, en edificios bajos, el uso de parapetos verticales sólidos de baja altura incrementa la máxima succión producida por los torbellinos cónicos. Este aumento de la carga aerodinámica también ha sido registrado por otros investigadores (Kramer y otros, 1979; Baskaran y Stathopoulos, 1988; Stathopoulos y otros, 1999). Sin embargo en el trabajo publicado por Kind (1988) se llega a la conclusión de que la máxima succión en una cubierta es independiente de la altura de los parapetos que se instalen en sus bordes hasta un cierto valor de ésta, a partir de la cual la succión máxima en el tejado

desciende. Kind explica la evidente contradicción entre sus resultados y los de otros investigadores, por el hecho de que es necesario el uso de un gran número de tomas de presión en la cubierta de un modelo a escala para localizar la máxima succión en ella.

En el Eurocódigo 1 también se tiene en cuenta el efecto de parapetos sólidos situados en los bordes de una cubierta, véase la tabla 1.1. Los valores contenidos en esta tabla indican que, según sea la altura adimensional de los parapetos, h/H (h es la altura del parapeto y H la del edificio), las cargas aerodinámicas se reducen hasta un máximo del 33% para parapetos de altura $h/H = 0,1$, siendo esta tendencia coincidente con la tesis de Kind.

Lo anterior se refiere exclusivamente a parapetos sólidos, sin embargo, además de este tipo de parapetos, en esta tesis se estudian los posibles beneficios, en cuanto a la carga aerodinámica en una cubierta, resultantes del uso de parapetos porosos. El efecto de la porosidad es un factor que se tiene en cuenta en barreras cortavientos de uso en multitud de aplicaciones, desde la agricultura hasta el confort de los peatones en áreas urbanas. La porosidad cambia las características de la estela que se forma corriente abajo de la barrera, alargando la huella de la estela y disminuyendo el nivel de turbulencia del flujo a sotavento de la mencionada barrera.

En la figura 1.7 se muestra la velocidad del aire adimensionalizada con la velocidad del viento no perturbado, U/U_∞ , en las estelas existentes corriente abajo de una barrera sólida y otra permeable al viento, cuya porosidad es $\phi = 0.24$. Estos datos han sido medidos mediante velocimetría de hilo caliente en las instalaciones del Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva”, IDR/UPM (Meseguer y otros,

2002). Se observa claramente en la figura que cuando la barrera es porosa se genera una zona de remanso más grande a sotavento de la misma.

Figura 1.7. Velocidad del aire adimensionalizada con la velocidad del viento no perturbado, U/U_∞ , en las estelas de dos barreras bidimensionales, una sólida y otra cuya porosidad es $\phi = 0,24$ (Meseguer y otros, 2002).

Por otro lado, se ha constatado que, bajo ciertas circunstancias, una barrera porosa disminuye la carga aerodinámica en una estructura situada corriente abajo (Crosby y otros, 1990; Park y Lee, 2000). Esta razón ha impulsado estudiar en esta tesis cómo puede afectar la estela generada por un parapeto poroso a los torbellinos cónicos, y concretamente a la succión que estos últimos generan sobre la cubierta.

Además, en esta tesis se ha analizado un nuevo tipo de parapeto, hasta donde se conoce no estudiado en la literatura, con forma de voladizo y situado encima de los bordes de la cubierta. Este dispositivo es similar a una ranura de borde de ataque en un ala delta. Con ello se pretende estudiar cómo y en qué medida afecta la corriente que se genera entre el voladizo y la cubierta al torbellino que se genera en el extradós del tejado. La intuición dice que esta corriente que pasa por debajo del parapeto en voladizo barrerá la superficie de la cubierta atenuando la succión generada por el torbellino. También se ha estudiado la aplicación de este tipo de dispositivos ranurados para la reducción de la succión en las esquinas de fachadas de edificios bajos, aunque los resultados obtenidos han sido poco satisfactorios para esta configuración (véase el anexo 2).

1.6. Objetivos de la tesis doctoral.

En esta tesis doctoral se pretende estudiar la efectividad de parapetos verticales porosos y de parapetos en voladizo destinados a reducir las cargas aerodinámicas en los tejados de edificios. Ambos tipos de parapetos son propuestas originales en el sentido de que, como se ha apuntado, tras una intensa búsqueda bibliográfica no se tiene noticia de que hayan sido previamente estudiados por otros investigadores.

Para analizar la efectividad de ambos tipos de parapetos se ha usado el modelo semi-empírico de Cook (Cook, 1990), que requiere el ajuste de los parámetros que lo caracterizan a las medidas experimentales discretas del coeficiente de presión en una cubierta. Para efectuar el ajuste de la expresión matemática que define el modelo de Cook se ha desarrollado un método simplificado a partir del método utilizado en el trabajo publicado por Williams y Baker (1997).

Además, se ha puesto a punto un procedimiento de visualización mediante termografía infrarroja para el análisis de las cargas aerodinámicas en las cubiertas de edificios. La visualización de calor radiado por una superficie mediante termografía infrarroja es una técnica que es utilizada hoy día en distintas aplicaciones, desde el diagnóstico de la efectividad de aislamientos térmicos en edificios (Balaras y Argiriou, 2002), hasta el estudio de la refrigeración de componentes electrónicos (Meinders y Hanjalic, 2002). Esta técnica ha sido también utilizada para describir flujos complejos como los torbellinos propios de un ala en delta (De Luca y otros, 1995) o, ya dentro del ámbito de la aerodinámica civil, para el análisis de la incomodidad inducida por el viento en zonas peatonales de un entorno urbano (Yamada y otros, 1996; Sasaki y otros, 1997).

La posibilidad de visualización mediante termografía infrarroja del flujo de aire en la cubierta de un modelo de ensayos de forma cúbica ha sido recogida en el trabajo de Cook y otros (2002), quienes llegan a especular con la posibilidad de captar con suficiente resolución fenómenos transitorios dependiendo de los materiales empleados en la construcción de los modelos (propiedades térmicas, esto es, conducción del material, y espesor del mismo). En la aplicación desarrollada en esta tesis se hace uso de esta técnica para visualizar el efecto de los torbellinos cónicos en la cubierta de un

modelo de ensayos, en la idea de estudiar, por un lado, la efectividad de esta técnica en la detección de las zonas de una cubierta susceptibles de sufrir la mayor carga aerodinámica, y, por otro lado, hasta dónde es posible correlacionar los mapas de calor visualizados con la succión producida por los torbellinos cónicos.

2. TÉCNICAS EMPLEADAS.

Tal y como se ha mencionado en la introducción, en esta tesis doctoral se pretende evaluar la efectividad de distintos parapetos en la disminución de la carga aerodinámica producida por los torbellinos cónicos en tejados planos. En el presente capítulo se describen los medios y las técnicas experimentales que han sido empleados.

Como medio experimental se ha empleado la experimentación en túnel aerodinámico, llevándose a cabo los distintos ensayos en los túneles aerodinámicos A9 y S1 del Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid, IDR/UPM. En cuanto a las técnicas experimentales, se ha utilizado por una parte la medida directa de los coeficientes de presión en las cubiertas de dos modelos de ensayos, y por otra parte la visualización mediante termografía infrarroja de los torbellinos cónicos formados sobre la cubierta de un tercer modelo de ensayos.

Junto al estudio directo de las medidas experimentales del coeficiente de presión, se ha aplicado como método de análisis de los torbellinos cónicos el modelo semi-empírico propuesto por Cook en 1990. Este modelo proporciona una expresión analítica que describe la succión producida por un torbellino cónico en una cubierta plana. La aplicación de este modelo consiste básicamente en dos fases, la primera es el ajuste de la mencionada expresión analítica a una serie de medidas discretas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo de ensayos, y la segunda fase es la interpretación de las características del torbellino cónico a través de los parámetros ajustados de la expresión analítica.

Este segundo capítulo se divide pues en dos partes. En la primera se describen los túneles aerodinámicos, los modelos de ensayos utilizados en los mismos, y las técnicas e instrumentos de medida empleados tanto para medir el coeficiente de presión como para realizar las visualizaciones de flujo mediante termografía infrarroja. En la segunda parte de este capítulo se describe el modelo semi-empírico de Cook.

2.1. Experimentación en los túneles aerodinámicos A9 y S1.

El túnel aerodinámico A9 es un túnel de tipo Eiffel o de circuito abierto de 14,25 m de longitud, véase la figura 2.1. Este túnel aerodinámico está constituido por: 1º) una contracción bidimensional de longitud 5,25 m que acelera la corriente desde la sección de entrada, de 4,8 m por 1,8 m, hasta la cámara de ensayos, 2º) una cámara de ensayos de longitud 3 m y cuya sección tiene 1,5 m de ancho por 1,8 m de alto, y 3º) un difusor de 6 m de longitud que expande la corriente hasta la sección de ventiladores, la cual está formada por nueve ventiladores SODECA HTC90 de potencia nominal de 10 kW y diámetro nominal de 0,9 m (Meseguer y otros, 2002). La cámara de ensayos está equipada con dos plataformas giratorias, una en cada pared, que permiten controlar desde fuera del túnel el ángulo de incidencia de la corriente respecto al modelo de ensayos, véanse las figuras 2.2 y 2.7 (y también la figura A2.3 del anexo 2). Los ensayos se han realizado con una velocidad uniforme de la corriente de aire en la cámara de ensayos cuyo valor ha sido fijado en torno a $U_{\infty} = 22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La intensidad de la turbulencia de la corriente de aire en la cámara de ensayos está en torno al 2,5%; no obstante, para los ensayos que lo han requerido se ha aumentado el nivel de turbulencia

situando una barra de sección circular corriente arriba del modelo de ensayos (véase la figura 2.7).

Figura 2.1. Planta y alzado del túnel aerodinámico A9 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM): (a) contracción, (b) cámara de ensayos, (c) difusor y (d) sección de ventiladores. Las cotas de este dibujo esquemático están expresadas en metros.

Figura 2.2. Vistas, desde fuera y desde dentro del túnel aerodinámico A9, de una de las dos plataformas giratorias en donde se posicionan los modelos para su ensayo. Estas plataformas están situadas en las paredes de la cámara de ensayos.

En la figura 2.3 se incluyen dos gráficas, en la primera se muestra el perfil de velocidad del aire en la cámara de ensayos, adimensionalizado con la velocidad del aire fuera de la capa límite. Este perfil de velocidad ha sido medido en la zona donde se sitúan los modelos para su ensayo, e indica que el grosor de la capa límite en esta zona de la cámara de ensayos está en torno a los 6 cm. Suponiendo que los modelos de ensayos utilizados tienen una escala 1:100, se puede decir que este perfil de velocidad es similar, aunque más uniforme, al perfil de velocidad del viento correspondiente a un terreno de Tipo I tal y como está especificado en el Eurocódigo 1 (1998). El perfil de velocidad del viento correspondiente a un terreno de Tipo I incluido en la gráfica ha sido adimensionalizado con la velocidad del viento a una altura de 16 m (que corresponde a la altura de un edificio real equivalente al modelo de ensayos M3D1 si se supone que éste tiene una escala igual a 1:100). En la segunda gráfica incluida en la figura 2.3 se muestra la variación de la intensidad de la turbulencia de la corriente, I_u , con la distancia a la superficie de la cámara de ensayos, z , en el lugar donde se sitúan los modelos de ensayos. De igual forma que se ha hecho con la velocidad, se ha comparado este perfil de la intensidad de la turbulencia con el correspondiente al viento estándar sobre un terreno de Tipo I. Como se puede apreciar, el nivel de turbulencia en el túnel aerodinámico A9 es menor que el del viento atmosférico. Este hecho de tener una corriente que puede calificarse como de baja turbulencia redunda, tal y como ya se ha mencionado en la introducción, en una mayor intensidad de los torbellinos cónicos que aparezcan en las cubiertas de los modelos de ensayos, y ello, como es obvio, facilita el análisis de los posibles efectos de los parapetos objeto de este estudio sobre los torbellinos cónicos.

Figura 2.3. Perfil de la velocidad, adimensionalizado con la velocidad de la corriente fuera de la capa límite, U/U_∞ , e intensidad de la turbulencia, I_u , en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9 en función de la distancia a la superficie de la misma, z . Los resultados se han comparado con el perfil de velocidad del viento correspondiente a un terreno de Tipo I tal y como se indica en el Eurocódigo 1 (1998). Los círculos indican las medidas realizadas en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico y la línea continua los valores del viento en un terreno de Tipo I.

Los modelos ensayados en el túnel aerodinámico A9 han sido dos, denominados M3D1 y M3D2. El modelo M3D1 ha sido diseñado y construido para medir el coeficiente de presión en un conjunto de puntos de su cubierta, por el contrario, el modelo M3D2 se ha construido con la intención de captar mediante termografía infrarroja diferencias de temperatura en su cubierta. Esta diferencia de criterio en cuanto al tipo de ensayo para el cual han sido concebidos los modelos M3D1 y M3D2 ha quedado reflejada en ciertas

diferencias en la construcción, siendo quizá la más apreciable los materiales empleados en las cubiertas de los modelos. Mientras que en el modelo M3D1 la cubierta se ha fabricado empleando aglomerado de madera prensado (MDF – *Medium Density Fiberboard*), en el modelo M3D2 se ha empleado una chapa de acero de 0,4 mm de espesor para favorecer la transmisión de calor a través suyo y, además, se ha forrado el exterior de esta chapa de acero con una capa de cinta adhesiva blanca para mejorar la captación de las imágenes por la cámara termográfica.

En la figura 2.4 se incluye un dibujo esquemático del modelo M3D1. Este modelo de ensayos es un prisma de base cuadrada de lado $L = 0,32$ m y altura $H = 0,16$ m. Está, además, rodeado por unas chapas auxiliares de 2,5 mm de espesor y de igual altura que el prisma, destinadas a sujetar los distintos parapetos que son objeto de estudio. Ello hace que, en realidad, la longitud de los lados de la base del modelo M3D1 varíe entre 0,327 m y 0,330 m si se cuenta con el espesor tanto de las mencionadas chapas como de los parapetos. Más adelante, en el capítulo 3, se describen detalladamente los parapetos empleados en la experimentación con este modelo de ensayo. Este modelo de ensayos está construido en su totalidad con aglomerado de pasta de madera prensado (MDF). En la figura 2.5 se muestra un esquema acotado y numerado de la situación de las 92 tomas de presión instaladas en la cubierta del modelo M3D1. Se puede observar que estas tomas de presión se han dispuesto formando un damero cuyas celdas tienen 40 mm de lado, más otras tomas de presión adicionales situadas en las cercanías de los bordes de la cubierta situados a barlovento en los ensayos.

Figura 2.4. Esquema acotado del modelo M3D1.

Figura 2.5. Esquema acotado de la cubierta del modelo M3D1. En el dibujo se indica la numeración adoptada de las tomas de presión. Las cotas están expresadas en milímetros.

Las tomas de presión instaladas en el modelo de ensayos M3D1 consisten en un agujero que aloja un tubo de latón de 1 mm de diámetro interior, este tubo metálico se conecta mediante otro tubo, esta vez de plástico, con el instrumento de medida. Teniendo en cuenta que el objetivo de las medidas es evaluar la presión media local y no las fluctuaciones de la misma, no se ha necesitado corregir los efectos de la resonancia de las señales a las frecuencias propias los tubos de transmisión. La longitud aproximada de los tubos de transmisión entre toma de presión e instrumento de medida es aproximadamente 0,8 m, ello quiere decir que la primera frecuencia de resonancia de estos tubos está en torno a 53 Hz (Irwin y otros, 1979), la cual es filtrada de las medidas gracias al filtro pasa-bajos incluido en la cadena de medida del túnel aerodinámico A9, cuya frecuencia de corte de 10 Hz.

Los tubos de plástico de las tomas de presión correspondientes al modelo M3D1 se han conectado a lectores secuenciales de 48 posiciones Scanivalve 48J7-1, estos lectores son controlados por un actuador Scanivalve JS4-48 y un decodificador Scanivalve JOPOETM-48, todos ellos fabricados por Scanivalve Corp. El conjunto de los tres anteriores dispositivos se denomina coloquialmente "scanivalve". Cada "scanivalve" está equipada con una cápsula de presión Druck PDCR22. Las señales eléctricas generadas en las cápsulas de presión pasan a acondicionadores de señal Druck DPI260 y de estos al filtro de 10 Hz antes mencionado. Una vez filtradas, las señales analógicas se conducen hasta un sistema de adquisición de datos IOtech ADC488/16A conectado a una tarjeta controladora IEEE 488 que es a su vez controlada por un ordenador personal. Toda la rutina de medida es controlada en este ordenador haciendo uso de un programa desarrollado con el lenguaje gráfico de programación LabVIEW 5.1 de National Instruments. Los ensayos se han realizado tomando 250 muestras a una frecuencia de

20 Hz en cada medida. Las presiones estática y de remanso se han medido con un tubo Pitot instalado en el techo de la cámara de ensayos del túnel A9. En los ensayos realizados se han tomado las precauciones lógicas de conducción de la señal en las conducciones neumáticas, como es evitar codos de radio comparable al diámetro del tubo que sirve de conducción, o enrasar perfectamente el tubo que se aloja en la toma de presión con la superficie del modelo de ensayos (Gumley, 1983). En la figura 2.6 se muestra un esquema de toda la cadena de medida de presión en el túnel aerodinámico A9.

El modelo M3D1 ha sido ensayado en dos condiciones de flujo: en la nominal del túnel, representada por una intensidad de la turbulencia $I_u = 2,5\%$, y en condición de flujo turbulento, esto es, con una turbulencia $I_u = 10\%$. Este aumento del nivel de turbulencia del flujo se ha logrado situando una barra horizontal de sección circular, de 9,5 mm de diámetro, a una distancia de 0,3 m corriente arriba del modelo y a una altura de 0,127 m del suelo, véase la figura 2.7.

Figura 2.6. Esquema de la cadena de medida de presión del túnel aerodinámico A9 del Instituto IDR/UPM.

Sección A-A'

Figura 2.7. Esquema del montaje del modelo M3D1 con una barra situada corriente arriba para incrementar el nivel de turbulencia en la cubierta del modelo. Las cotas están expresadas en metros.

En la figura 2.8 se muestra un esquema del modelo de ensayos M3D2, el cual, como ya se ha mencionado, está destinado a la visualización de flujo en la cubierta mediante termografía infrarroja. Este modelo es muy similar en la forma al modelo M3D1, se trata pues de un prisma de base cuadrada, de lado $L = 0,300$ m y altura $H = 0,150$ m. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 2.8, sólo se ha previsto la inclusión de parapetos en los dos lados más adelantados con respecto al viento. Estos parapetos están sujetos por sendas chapas de aglomerado MDF de 2,5 mm de espesor. El modelo M3D2 está construido con aglomerado MDF salvo la cubierta, la cual, como ya se ha mencionado, está hecha con una chapa de acero de 0,4 mm de espesor. Se ha escogido este espesor reducido frente a otros más comunes (1 mm, 2 mm,...) para aumentar en lo posible la transmisión de calor en sentido normal al plano de la chapa, lo cual implica una mayor resolución de la visualización de los gradientes de temperatura en la superficie de la cubierta del modelo (Cook, 1999). En el interior del modelo M3D2 se ha situado una matriz de bombillas con el objeto de calentar la chapa metálica que constituye la cubierta del modelo, véase la figura 2.9. Sobre la matriz de bombillas se ha dispuesto una pantalla blanca para que sea ésta la fuente de calor radiado sobre la chapa metálica, intentando así que la distribución de calor que llega a la chapa sea lo más uniforme posible ya que, de hecho, se comprobó durante los ensayos que sin esta pantalla blanca la cubierta adquiría una temperatura mayor justo encima de las bombillas, con la consiguiente distorsión en las visualizaciones. Además, la chapa de 0,4 mm que hace de cubierta del modelo ha sido pintada de negro en su cara interior para mayorar la absorción del calor radiado desde la pantalla blanca. Por último, se ha incluido un pequeño ventilador dentro del modelo para disminuir en lo posible los gradientes de temperatura de este montaje interior del modelo.

Figura 2.8. Esquema acotado del modelo de ensayos M3D2.

Figura 2.9. Carcasa e interior del modelo de ensayos M3D2.

La elección de la fuente de calor contrasta con la seleccionada por otros autores en sus trabajos (Yamada y otros, 1996, Cook y otros, 2002). Éstos han utilizado como fuente de calor la recirculación dentro de los respectivos modelos de ensayos de agua caliente. En el caso de Yamada y otros se ha empleado una placa de metacrilato de 12 mm de espesor sobre un tanque de agua caliente para conducir el calor, y poder así captar con la termografía los gradientes térmicos en la placa creados por el paso del aire alrededor de un modelo de edificio posicionado sobre la mencionada placa. Por el contrario, Cook y otros han hecho circular agua caliente por el interior de un modelo de edificio, en el que se han empleado placas de neopreno y PVC de espesor 1,25 mm y 0,23 mm respectivamente para construir la cubierta (dos cubiertas distintas, cada una con uno de los materiales). Es a través de estas placas por las que se conduce el calor,

visualizándose entonces con una cámara termográfica los gradientes térmicos que crea el flujo de aire al pasar sobre las mencionadas placas (cubierta del modelo).

La fuente de calor escogida para calentar la cubierta del modelo M3D2 es más simple que las descritas anteriormente, ya que el objetivo de los ensayos no es una correlación entre velocidad local y temperatura tal y como realizan en sus trabajos Yamada y otros, y Cook y otros, sino la visualización del efecto de los parapetos en el flujo de aire sobre la cubierta del modelo M3D2, y una descripción cualitativa del flujo adicional a la obtenida mediante las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1. Téngase en cuenta que los modelos M3D1 y M3D2 son proporcionales y prácticamente iguales.

El modelo M3D2 ha sido montado en el suelo de la cámara de ensayos del túnel A9, y no en una de las plataformas giratorias de las paredes de la mencionada cámara. En la figura 2.10 puede observarse la disposición experimental que se ha adoptado en los ensayos. Sobre el modelo M3D2 y fijada al techo de la cámara de ensayos se ha situado una cámara termográfica 80 Series Thermal Imager de Insight Vision Systems Ltd para la captación de imágenes en el espectro infrarrojo. La señal de vídeo de la cámara es recogida por un ordenador personal equipado con una tarjeta de vídeo y software comercial de captación de imágenes. El análisis de imágenes ha sido realizado con el programa Matlab 6.1 de The MathWorks, Inc.

El procedimiento seguido para visualizar el flujo ha sido el siguiente, primero se han encendido las bombillas y se ha calentado la cubierta del modelo M3D2 sin poner en marcha el túnel aerodinámico A9. Transcurridos 20 minutos, tiempo necesario para

llegar a una temperatura estable en la cubierta, se han capturado con la cámara termográfica 4 imágenes en el espectro infrarrojo de la misma. Después, se ha puesto en marcha el túnel y se ha esperado otra vez a que se llegara a una temperatura estable en la cubierta, tras lo cual se han capturado 10 imágenes en el espectro infrarrojo de la cubierta. Finalmente, se ha restado a la imagen promediada de la primera serie la imagen promediada de la segunda, con lo cual se obtiene una imagen que ofrece un mapa de colores de la cubierta proporcional al calor evacuado a través de ella por el fluido.

Figura 2.10. Esquema de la disposición experimental empleada en los ensayos de visualización mediante termografía infrarroja con el modelo M3D2.

En el transcurso de la campaña de ensayos correspondiente a esta tesis, tanto para medir los perfiles de velocidad de los túneles A9 y S1 como para medir la velocidad sobre la cubierta del modelo M3D2, se ha utilizado un sistema de velocimetría por hilo caliente DANTEC. Este sistema consta de los siguientes elementos: sondas DANTEC 55A22,

porta-sondas DANTEC 55A20, cable coaxial DANTEC A1866, módulo DANTEC CTA 90C10 (el cual contiene el puente de Wheatstone en el sub-módulo DANTEC CTA 90N10), conversor analógico-digital National Instruments AT/PCI-MIO-16E-10 y ordenador que controla la cadena de medida mediante el programa StreamWare 1.17 de DANTEC. Se han tomado en cada punto de medida 2^{13} muestras a 1 kHz.

El túnel aerodinámico S1 es, al igual que el túnel A9, un túnel de circuito abierto, véase la figura 2.11. La longitud de este túnel es de 6,5 m aproximadamente y la sección de la cámara de ensayos de 0,15 m de ancho por 0,8 m de alto. Esta sección está especialmente diseñada para estudiar flujos bidimensionales. El túnel aerodinámico S1 está constituido por: 1º) un ventilador centrífugo VCHSOT 25/13 impulsado por un motor WEG 132MY0699 de 7,5 kW, 2º) una cámara de tranquilización de 1,2 m de longitud en la cual hay una serie de rejillas para uniformizar la corriente, 3º) una contracción bidimensional de 1 m de longitud, y cuya anchura es de 1 m en la entrada y 0,15 m en la salida, 4º) la cámara de ensayos de 1,2 m de longitud cuya sección es, como ya se ha mencionado, de 0,8 m de alto por 0,15 m de ancho, y 5º) un difusor de 2,3 m de longitud que expande la corriente hasta una sección de 1,2 m por 1,14 m. El difusor tiene placas interiores para expandir la corriente con un ángulo inferior a 7°.

Además de la sección de la cámara de ensayos, una de las diferencias más acusadas del túnel S1 con respecto al túnel A9 es la colocación de los ventiladores respecto del sentido del flujo de aire. El túnel A9 es de aspiración, esto es, los ventiladores se encuentran detrás del difusor sacando el aire desde el interior del túnel hacia el exterior del mismo. Por el contrario, el túnel S1 es de soplado, es decir el ventilador introduce el aire en el túnel, por eso es necesaria una cámara de tranquilización para uniformizar el

flujo y reducir el nivel de turbulencia antes de que el flujo de aire se introduzca en la cámara de contracción.

Figura 2.11. Planta y alzado del túnel aerodinámico S1 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM): (a) difusor, (b) cámara de ensayos, (c) contracción, (d) cámara de tranquilización, y (e) ventilador. Las cotas de este dibujo esquemático están expresadas en metros.

En la figura 2.12 se muestran los perfiles de velocidad adimensional, U/U_∞ , e intensidad de turbulencia, I_u , del túnel aerodinámico S1 en la zona en la que se sitúan los modelos de ensayos. El perfil de velocidad adimensional es comparado en la gráfica correspondiente con un perfil de velocidad del viento sobre un terreno de tipo 1. Este perfil de velocidad del viento ha sido adimensionalizado con la velocidad a 10 m de

altura, la cual corresponde con la del modelo M2D si la escala de éste fuese igual a 1:100 con respecto a un edificio real.

Figura 2.12. Perfil de la velocidad, adimensionalizada con la velocidad de la corriente fuera de la capa límite, U/U_∞ , e intensidad de la turbulencia, I_u , en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico S1 en función de la distancia a la superficie de la misma, z . Los resultados se han comparado con el perfil de velocidad del viento correspondiente a un terreno de Tipo I tal y como se indica en el Eurocódigo 1 (1998). Los círculos indican las medidas realizadas en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico y la línea continua los valores del viento en un terreno de Tipo I.

En la figura 2.13 se muestra un dibujo acotado del modelo M2D, destinado a los ensayos en el túnel aerodinámico S1. En este dibujo se muestra, además, la posición de las tomas de presión en la cubierta del mismo. Este modelo se fijó en el suelo de la cámara de ensayos del túnel S1 situándose sobre el borde anterior de su cubierta los distintos parapetos en voladizo. El voladizo está indicado a trazo discontinuo en la figura 2.13, además se indica también en el dibujo la situación de las 24 tomas de

presión instaladas en la cubierta del modelo. El modelo M2D está construido, salvo las tomas de presión, con aglomerado de madera prensado (MDF). Las tomas de presión instaladas en este modelo (indicadas en la figura 2.13), son iguales a las mencionadas en la descripción del modelo M3D1. Estas tomas están conectadas a un sistema mecánico que las conecta secuencialmente con una cápsula de presión Schaewitz Lucas P3061-2 WG, cuya presión de referencia es la presión de remanso captada por un tubo Pitot situado en el techo de la cámara de ensayos. Este tubo Pitot mide también, como es evidente, la presión estática.

Figura 2.13. Dibujo esquemático del modelo de ensayos M2D. Las tomas de presión dispuestas en la cubierta del modelo se indican mediante puntos negros en el dibujo. Se indica también, a trazo cortado, el voladizo sobre el borde anterior de la cubierta en una posición genérica. Las cotas están expresadas en milímetros.

La relación entre la altura del modelo M2D y la altura de la cámara de ensayos es 0,125, valor que está en el límite que tradicionalmente marca la frontera entre la aplicación o no de correcciones en las medidas de presión por bloqueo de la corriente en la cámara de ensayos. En el trabajo experimental de Templin y Raimondo (1986) en el cual se miden los coeficientes de presión en la superficie de modelos de automóviles, se establece una corrección del 14% en la presión dinámica para un experimento en el que el bloqueo de la cámara de ensayos es 0,13. Es razonable suponer que en el caso de los experimentos llevados a cabo con el modelo M2D, en los que el bloqueo es muy similar al del caso registrado por Templin y Raimondo, las correcciones en los coeficientes de presión que habrían de aplicarse estén por debajo de un 15%. De cualquier forma no se han corregido las medidas por bloqueo de la corriente en la cámara de ensayos, debido a que las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M2D se han realizado para establecer una intercomparación entre los efectos de diferentes parapetos en voladizo, sin ánimo de proporcionar valores con respecto a un edificio a escala real.

2.2. Análisis semi-empírico de los torbellinos cónicos. Modelo de Cook.

A comienzos de los años 90 Cook propuso un modelo semi-empírico para describir la succión producida por los torbellinos cónicos sobre un tejado (Cook, 1990). En este modelo semi-empírico de Cook el área de influencia del torbellino se divide en dos zonas, asignando a cada una de ellas una expresión matemática distinta. La primera es la zona de crecimiento (*growth region*), la cual corresponde con la zona en donde el torbellino se forma y va engrosando según se aleja de la esquina en donde se crea. En esta zona de crecimiento el torbellino tiene forma cónica, forma que no se mantiene

indefinidamente. Si la cubierta es suficientemente grande el torbellino acaba adoptando la forma de un cilindro anclado a cierta distancia del borde de la misma. Esta segunda zona, en donde el torbellino tiene forma cilíndrica, es la denominada zona de estabilidad (*mature region*).

La expresión propuesta por Cook para describir el comportamiento del coeficiente de presión en la zona de crecimiento es:

$$c_p = c_{p0} + (c_{p1} - c_{p0}) \frac{1 - S \ln(r/b)}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right)^2}, \quad (3)$$

donde (r, α) son las coordenadas polares del punto donde se pretende evaluar el coeficiente de presión (véase la figura 2.14), y b , c_{p0} , c_{p1} , S , α_0 y α_c son parámetros a determinar experimentalmente.

De igual modo Cook formula para la zona de estabilidad la siguiente expresión para describir el comportamiento del coeficiente de presión:

$$c_p = c_{p0} + (c_{p1} - c_{p0}) \frac{1 - S \ln(r_m/b)}{1 + \left(\frac{y - y_0}{y_c} \right)^2}, \quad (4)$$

donde y es la distancia al borde del tejado (véase la figura 2.14), y c_{p0} , c_{p1} , b , S , y_0 , y_c , r_m son parámetros a determinar experimentalmente. Como es lógico, según se esté en una zona u otra (crecimiento o estabilidad), los valores de los parámetros c_{p0} , c_{p1} , b y S serán distintos.

La aplicación del modelo semi-empírico de Cook requiere el ajuste de las expresiones matemáticas anteriores a la distribución de coeficiente de presión medida cerca del

torbellino cónico. Es decir, una vez que se ha medido el coeficiente de presión en puntos distribuidos sobre la cubierta objeto de estudio, se pueden utilizar estas medidas para ajustar las expresiones matemáticas propuestas por Cook, y así lograr una descripción continua, y no discreta, del coeficiente de presión en la superficie de la mencionada cubierta afectada por el torbellino cónico.

Figura 2.14. Dibujos esquemáticos de las zonas de crecimiento y estabilidad de un torbellino cónico según el modelo de Cook.

En los ensayos realizados con los modelos M3D1 y M3D2 no se ha observado en ningún caso la formación de torbellinos que presenten la forma cilíndrica característica de la zona de estabilidad. Ello coincide con el resultado obtenido por Williams y Baker (1997). Estos autores han estudiado la distribución de presión en la superficie superior de un prisma de base cuadrada, y concluyen que la división del área de influencia del torbellino en dos zonas no es adecuada, aunque sí reconocen que existe un cambio en la forma del flujo para distancias grandes al origen del torbellino cónico. Por otro lado el cambio de forma, de cónica a cilíndrica, del torbellino ha sido descrito por Kramer y Gerhardt (1991), quienes han estudiado mediante técnicas de visualización el flujo sobre tejados planos de edificios grandes pero de baja altura, similares a centros comerciales, cuando el ángulo de incidencia del viento respecto de las fachadas de estos edificios es igual a 45°. Kramer y Gerhardt han observado que si la relación entre la altura del edificio y su dimensión horizontal, H/L es menor que un determinado valor, $H/L < 0,05$, la forma cónica de los torbellinos formados en los aleros del tejado desaparece. La relación entre la altura y la dimensión horizontal de los modelos M3D1 y M3D2 es aproximadamente igual a $H/L = 0,5$, por lo que es lógico que no se observen sino torbellinos de forma cónica en los ensayos realizados con los modelos situados a ángulos de guiñada que permitan su aparición.

La expresión de la fórmula de Cook que se pretende ajustar a las medidas experimentales está basada en la modificación propuesta por Williams y Baker:

$$c_p = c_{p0} + \frac{\Delta c_p + G \ln(r/H)}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right)^2}, \quad (5)$$

en donde c_{p0} , Δc_p , G , α_0 y α_c son constantes a ajustar y H es la altura del modelo de ensayos. Puede observarse que la expresión que se ha escogido es la que, según Cook,

corresponde a la zona de crecimiento del torbellino cónico. Las constantes G , α_0 y α_c de esta expresión son utilizadas en esta tesis como forma de comparación entre las distintas configuraciones de parapetos ensayadas ya que definen respectivamente la intensidad, la posición y el ángulo de apertura del torbellino cónico al que se ha ajustado la anterior expresión.

En la figura 2.15 está señalada el área de una cubierta en la cual un torbellino cónico produce, en el caso de formarse, una succión particularmente intensa (sector angular rayado). En ella se identifican las constantes α_0 y α_c con la bisectriz y el semi-ángulo de apertura del sector angular rayado. Como es obvio, la mencionada bisectriz coincide con la proyección sobre la cubierta del eje del torbellino cónico. En la figura 2.15 también se indica, a trazo grueso, el valor de la succión, $-c_p$, a lo largo de la mencionada bisectriz. Atendiendo a la expresión (5), queda claro que la constante G es el parámetro que gobierna el comportamiento de la succión en el entorno próximo a la esquina, y por ello esta constante G puede ser identificada con la intensidad del torbellino cónico al que se ha ajustado el modelo de Cook.

En el anexo 1 de esta tesis se muestra un ejemplo de la forma en que se han ajustado las constantes del modelo semi-empírico de Cook a la distribución de medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1. Finalmente, se ha de añadir que, aunque el modelo semi-empírico de Cook demuestra ser una valiosa herramienta para la interpretación de los resultados medido, su aplicación no es posible en cubiertas curvas (véase el anexo 3). Ello se debe a que en una cubierta curva el eje del torbellino cónico es, a su vez, curvo y no recto, siendo esta última condición indispensable para poder aplicar el modelo semi-empírico de Cook.

3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS VERTICALES (SÓLIDOS Y POROSOS), Y PARAPETOS EN VOLADIZO, SOBRE LA CARGA AERODINÁMICA EN LA CUBIERTA PLANA DE UN EDIFICIO.

En este capítulo se analiza la influencia de distintos parapetos en la carga aerodinámica sobre la cubierta de un edificio. Para ello se ha recurrido a la medida experimental del coeficiente de presión en los modelos de ensayos M3D1 y M2D, y a la captación de mapas de transferencia de calor en la cubierta del modelo M3D2 mediante termografía infrarroja (véase el capítulo 2 correspondiente a la descripción de los elementos de ensayo utilizados).

Este estudio experimental se divide en cuatro partes. En la primera parte se investiga a qué ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto del modelo M3D1 se producen las mayores cargas aerodinámicas en la cubierta del mismo. El propósito de esta primera serie de medidas es fijar un ángulo de incidencia de la corriente, β , al cual se pueda estudiar la influencia de los parapetos en el peor caso posible de carga aerodinámica en la cubierta del modelo de ensayos.

En la segunda parte de este estudio experimental se analiza el efecto de parapetos verticales situados en el borde de la cubierta del modelo M3D1. Este análisis comprende el estudio de la acción de los parapetos verticales en función de su altura, h , y de su porosidad, ϕ .

En la tercera parte se aborda el estudio de la efectividad de los denominados en esta tesis parapetos en voladizo. La influencia de estos parapetos en la carga aerodinámica

sobre la cubierta de un edificio se analiza en dos condiciones de flujo, una bidimensional haciendo uso del modelo M2D, y la otra utilizando el modelo M3D1.

En la cuarta parte de este capítulo se analiza mediante termografía infrarroja el efecto de los parapetos, tanto verticales como en voladizo, en la configuración del flujo de aire sobre la cubierta del modelo de ensayos M3D2, estando éste con una orientación igual a 45° respecto de la corriente incidente.

3.1. Estudio de la influencia del ángulo de incidencia del viento en la carga aerodinámica en la cubierta del modelo de ensayos M3D1.

Tal y como se ha avanzado en la introducción de este capítulo, se ha realizado una primera serie de ensayos con el modelo M3D1 para determinar a qué ángulo de incidencia de la corriente, β , se produce la mayor carga aerodinámica en la cubierta del modelo cuando en éste no hay instalado parapeto alguno. Evidentemente, este ángulo crítico es aquel para el que la succión provocada por los torbellinos cónicos en la cubierta del modelo es más intensa. El ángulo β está definido en las figuras 2.14 y 2.15 del capítulo 2 (véase también la figura A1.1 del anexo 1).

Para la realización de los ensayos se ha situado el modelo M3D1 en una de las plataformas giratorias existentes en las paredes de la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9. Se ha llevado a cabo un conjunto de siete ensayos con el modelo situado a otros tantos ángulos de incidencia respecto de la corriente. En la tabla 3.1 se incluyen las succiones más altas, $-c_p$, medidas en la cubierta del modelo. Se especifican

también en la tabla el ángulo de incidencia de la corriente a la que esa succión se ha medido, β , y el número de la toma de presión en la que se ha efectuado la medida (véase la figura 2.5 del capítulo 2). Como era de esperar, la mayor succión se ha localizado en las tomas de presión más cercanas tanto a la esquina de la cubierta que queda situada más a barlovento, como a los bordes de la cubierta que forman la mencionada esquina.

Tabla 3.1. Succiones máximas medidas en la cubierta del modelo M3D1, $-c_p$. Se indica el ángulo de incidencia de la corriente del aire respecto al modelo, β , y el número de la toma de presión en la que se ha medido la succión máxima (véase la figura 2.5).

β	$-c_p$	Toma de presión
0°	1,13	6B
10°	1,50	14A y 10B
20°	1,85	10B y 29B
30°	2,75	37B
35°	2,83	10B
40°	3,17	45B
45°	3,45	18B

Los valores de la succión que se recogen en la tabla 3.1 se han representado en la figura 3.1. En esta figura se observa un comportamiento claramente lineal de la succión máxima medida en la cubierta del modelo, siendo el mayor valor de esta succión máxima el correspondiente a una incidencia del viento $\beta = 45^\circ$, como es lógico. Este resultado concuerda con las conclusiones obtenidas por Kind (1988), quien estableció

que en las esquinas de un tejado la succión más alta se produce cuando el viento tiene un ángulo de incidencia respecto al modelo cercano a 45° .

Figura 3.1. Variación de la succión máxima medida en la cubierta (tejado) del modelo M3D1 en función del ángulo de inclinación de la corriente incidente, β .

En la figura 3.2. se incluye una serie de imágenes que representan la variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo de ensayos, en función del ángulo de la corriente incidente, β . Para ángulos cercanos a $\beta = 0^\circ$ la estructura del flujo es prácticamente bidimensional, es decir, la corriente se desprende en el borde anterior de la cubierta y luego se readhiere formando una burbuja de recirculación en la que se mantiene un coeficiente de presión ligeramente más negativo que $c_p = -1$. A partir de un ángulo relativamente pequeño, $\beta = 10^\circ$, ya se puede observar

la formación de un torbellino cónico grueso en el borde de la cubierta situado más a barlovento. Un segundo torbellino cónico, más fino que el primero, aparece en el otro de los bordes de la cubierta situados más a barlovento para ángulos próximos a $\beta = 30^\circ$. La intensidad de ambos torbellinos cónicos aumenta en función del ángulo de incidencia de la corriente, como puede apreciarse por la coloración cada vez más azul (coeficiente de presión más negativo) de las zonas influidas por los mencionados torbellinos cónicos. Además, puede observarse cómo el primer torbellino se hace cada vez más fino y se aproxima más al borde de la cubierta según aumenta el ángulo de incidencia de la corriente de aire. Por el contrario, el segundo torbellino aumenta en grosor y se separa del borde de la cubierta en donde se genera al aumentar el ángulo de incidencia de la corriente de aire. Estas distribuciones del coeficiente de presión se han obtenido, en cada caso, mediante el procesado de las medidas realizadas en el conjunto de tomas de presión dispuestas en la cubierta del modelo (véase la figura 2.5), con el programa Matlab 6.1. A partir de cada distribución discreta de valores del coeficiente de presión, se interpola con subrutinas propias del programa Matlab 6.1 para hallar el valor del coeficiente en el área interior al mencionado conjunto de tomas, tras lo cual, mediante otra subrutina del programa se colorea la mencionada área. Obsérvese que, debido a que la interpolación se realiza en el área interior al conjunto de tomas de presión, las distribuciones del coeficiente de presión no llegan a los bordes de la cubierta del modelo. En un principio se ha desechado la posibilidad de extrapolar los valores del coeficiente de presión hasta los bordes de la cubierta porque ello no es necesario para la comparación cualitativa entre las distintas distribuciones. Por otra parte, se ha de recalcar que con la aplicación del modelo de Cook, al ser éste un modelo basado en una expresión analítica (véase el anexo 1), se logra esta extrapolación hasta los bordes.

En la tabla 3.2 se incluyen los valores de los parámetros del modelo semi-empírico de torbellino de Cook (1990) aplicados a las medidas experimentales de la distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1. Obsérvese que la aplicación de este modelo matemático está condicionada por la formación de un torbellino cónico lo suficientemente intenso. En esta serie de medidas no ha sido posible aplicar el modelo de Cook para ángulos de incidencia de la corriente menores que $\beta = 30^\circ$. La distinción entre ambos torbellinos, es decir, su denominación como “Torbellino 1” y “Torbellino 2”, la cual se adoptará a partir de este punto, se indica en la figura A1.1 del anexo 1, en donde se describe el procedimiento seguido para el ajuste del modelo de Cook a las medidas del coeficiente de presión hechas en la cubierta del modelo M3D1.

Figura 3.2. Variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3D1, en función del ángulo de incidencia de la corriente, β .

Figura 3.2 (continuación). Variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3D1, en función del ángulo de incidencia de la corriente, β .

Tabla 3.2. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función del ángulo de incidencia de la corriente, β .

	Torbellino 1					Torbellino 2				
β	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0°-20°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30°	0,82	-0,63	-0,93	20°	15,4°	0,87	-0,43	-1,12	7°	5,6°
35°	0,95	-0,45	-1,02	17°	14,8°	1,17	-0,51	-1,42	9°	4,7°
40°	1,00	-0,53	-1,07	17°	10,0°	1,3	-0,41	-1,60	9°	6,0°
45°	1,63	-0,34	-1,44	11°	9,4°	1,58	-0,38	-1,87	9°	6,8°

En las figuras 3.3 y 3.4 se han representado respectivamente la variación de los parámetros, G , α_0 y α_c del modelo de Cook aplicado al Torbellino 1 y al Torbellino 2, en función del ángulo de incidencia del aire respecto del modelo M3D1. Recuérdese que, tal y como se ha observado en el capítulo 2, el parámetro G del modelo de Cook representa la intensidad del torbellino cónico, el ángulo α_0 representa el ángulo que forma la proyección vertical del eje del torbellino cónico sobre la cubierta con el borde de la misma donde este torbellino se genera y, finalmente, el ángulo α_c representa el ángulo de apertura del torbellino cónico. En la gráfica de la figura 3.3 puede observarse que la intensidad de ambos torbellinos cónicos evoluciona de forma aproximadamente lineal y creciente con el ángulo de incidencia de la corriente de aire. Además, se ha de señalar que la intensidad de ambos torbellinos alcanza valores muy similares entre sí para cualquier ángulo del viento incidente. Esta tendencia uniformemente creciente en

función del ángulo de incidencia de la corriente de aire, β , coincide con la manifestada por las succiones máximas medidas en la cubierta del modelo M3D1 (véase la figura 3.1).

Figura 3.3. Variación del parámetro G del modelo de Cook aplicado a las medidas del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1, en función del ángulo de incidencia de la corriente de aire, β . Los cuadrados representan al Torbellino 1, y los círculos al Torbellino 2.

Figura 3.4. Variación de los parámetros α_0 y α_c del modelo de Cook aplicado a las medidas del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1, en función del ángulo de incidencia de la corriente de aire, β . Los cuadrados representan al Torbellino 1, y los círculos al Torbellino 2. Los puntos negros (bien sean cuadrados o círculos) representan el ángulo de posición del torbellino, α_0 , y los puntos blancos (cuadrados o círculos) el ángulo de apertura del mismo, α_c .

En cuanto a la posición y la forma de ambos torbellinos, para un ángulo de la corriente incidente $\beta = 30^\circ$ el Torbellino 1 se sitúa en un ángulo $\alpha_0 = 20^\circ$ respecto del borde de la cubierta, siendo su ángulo de apertura $\alpha_c = 15,4^\circ$. Según aumenta el ángulo de la corriente incidente estos valores decrecen de forma aproximadamente lineal hasta $\alpha_0 = 11^\circ$ y $\alpha_c = 9,4^\circ$ para un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 45^\circ$. Por otra parte, cuando la corriente incidente tiene un ángulo $\beta = 30^\circ$ el Torbellino 2 tiene una posición

angular $\alpha_0 = 7^\circ$ y un ángulo de apertura $\alpha_c = 5,6^\circ$, valores que, según se aumenta el ángulo de incidencia de la corriente de aire, crecen hasta $\alpha_0 = 9^\circ$ y $\alpha_c = 6,8^\circ$.

Como puede observarse, tanto la posición como el ángulo de apertura de ambos torbellinos cónicos alcanzan valores parecidos cuando el viento está orientado según la bisectriz de la esquina de la cubierta ($\beta = 45^\circ$). Sin embargo, los valores no son idénticos ya que nunca se puede llegar a la situación de flujo simétrico debido a que es imposible fijar un punto de remanso en la arista vertical que separa las fachadas anteriores del modelo (Castro y Robins, 1977). De esta forma, cuando el viento incidente llega con un ángulo $\beta = 45^\circ$ respecto al modelo hay siempre un punto de remanso sobre una de las fachadas del mismo. Este hecho da lugar a que haya una situación distinta del flujo en las proximidades de cada uno de los bordes anteriores de la cubierta y a que, por consiguiente, tanto las intensidades de los torbellinos cónicos que allí se generan como sus posiciones y ángulos de apertura no puedan ser exactamente iguales.

Tras esta primera serie de medidas se concluye que para un ángulo de incidencia de la corriente respecto al modelo $\beta = 45^\circ$, se generan sobre la cubierta del modelo M3D1 los torbellinos cónicos más intensos, es decir, que producen una succión mayor en la superficie de la mencionada cubierta. Estos torbellinos cónicos tienen una posición de entre $\alpha_0 = 9^\circ$ y $\alpha_0 = 11^\circ$, con un ángulo de apertura que varía entre $\alpha_c = 9,4^\circ$ y $\alpha_c = 6,8^\circ$. Los valores más altos de posición y ángulo de apertura corresponden al torbellino generado en la arista común entre la cubierta y la fachada en donde se asienta el punto de remanso de la corriente incidente. El hecho de que la intensidad de los torbellinos cónicos sea máxima con un ángulo del viento incidente respecto al modelo igual a 45° ,

ha motivado que todos los ensayos concernientes al estudio de los parapetos en el modelo de ensayos M3D1 se hayan realizado con este mismo ángulo.

3.2. Estudio de la influencia de parapetos verticales sólidos y porosos en la carga aerodinámica en la cubierta del modelo M3D1.

En la figura 3.5 se describen esquemáticamente los parapetos utilizados en las medidas experimentales realizadas para este estudio de la influencia de la altura y de la porosidad de parapetos verticales en la carga aerodinámica sobre un tejado plano. Como ya se ha mencionado en la introducción del presente capítulo, el estudio se ha llevado a cabo en el túnel aerodinámico A9 y se ha utilizado el modelo M3D1. En el capítulo 2 dedicado a los elementos experimentales utilizados se detalla, además de las características del modelo M3D1, la situación de los parapetos en el modelo y la forma de sujeción de los mismos. Se ha de insistir en que todos los ensayos realizados para estudiar los efectos de la altura y de la porosidad de los parapetos verticales, han sido llevados a cabo situando el modelo con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto de la corriente de aire incidente.

Figura 3.5. Esquema acotado de los parapetos verticales utilizados para la experimentación con el modelo M3D1. Los parapetos tipo "A" son una chapa de madera de 2,5 mm de espesor, los parapetos tipo "B" son una rejilla metálica formada por hilos de 1 mm de espesor, los parapetos tipo "C" son una chapa de 2,5 mm de espesor con taladros de diámetro igual a 6 mm, y los parapetos tipo "D" están constituidos por una rejilla de plástico comercial de espesor 1,1 mm.

La nomenclatura utilizada para identificar los parapetos es la siguiente: los parapetos tipo “A” son parapetos sólidos, hechos con una chapa de madera de espesor 2,5 mm; los parapetos tipo “B” son una rejilla comercial metálica formada por hilos de 1 mm de diámetro dispuestos formando una rejilla cuadrada de 10 mm de lado; los parapetos tipo “C” están hechos con una chapa de madera de 2,5 mm de espesor a la cual se han practicado taladros de 6 mm de diámetro, con sus centros dispuestos en una malla cuadrada cuyas celdillas tienen 10 mm de lado; los parapetos tipo “D” están hechos con una rejilla comercial plástica. En la tabla 3.3 se incluyen los datos geométricos de estos parapetos verticales, es decir, la porosidad, ϕ , y el espesor, e , así como la altura adimensional, h/H , de los mismos empleada en los diversos ensayos (h es la altura del parapeto sobre la cubierta del modelo y H la altura del modelo de ensayos).

Tabla 3.3. Características de los parapetos verticales utilizados en el modelo de ensayo M3D1. Los campos de la tabla son los siguientes: el nombre (los parapetos están descritos en el texto), la porosidad, ϕ , el espesor, e ; y la altura adimensional del parapeto, h/H , donde h es la altura del mismo y H es la altura del modelo de ensayos ($H=0,16$ m).

Tipo	ϕ	e [mm]	h/H
A	0	2,5	0,013; 0,019; 0,025; 0,031; 0,038; 0,044; 0,050; 0,063; 0,094; 0,125
B	0,81	2,0	0,019; 0,031; 0,05; 0,063; 0,069; 0,081; 0,094; 0,106; 0,125
C	0,28	2,5	0,031; 0,063; 0,094; 0,125
D	0,50	1,1	0,031; 0,063; 0,094; 0,125

La acción de los parapetos tipo “A” (sólidos) en la succión producida por los torbellinos cónicos en la cubierta del modelo, ha sido estudiada en dos condiciones de flujo para tener en cuenta el efecto de la turbulencia de la corriente incidente en la mencionada succión. En un primer caso se ha medido la distribución de coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo variando la altura de los parapetos con la condición de flujo normal en el túnel aerodinámico A9, esto es, una corriente de aire cuya intensidad de la turbulencia medida a la altura de la cubierta del modelo, corriente arriba del mismo, es $I_u = 2,5\%$. En el segundo caso se ha vuelto a medir esta distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo, también en función de la altura de los parapetos, con una corriente cuya intensidad de la turbulencia es $I_u = 10\%$, también medida a la altura de la cubierta del modelo corriente arriba del mismo. Este aumento de la turbulencia de la corriente incidente se ha conseguido situando una barra horizontal a una distancia de 0,3 m de la esquina anterior del modelo M3D1 y a una distancia de 127 mm de la superficie del túnel, véase la figura 2.7 del capítulo 2.

En la figura 3.6 se pueden observar las distribuciones del coeficiente presión medidas en la cubierta del modelo M3D1 en las dos condiciones de flujo antes descritas, para distintas alturas de los parapetos tipo “A” (sólidos). De un primer análisis de los resultados se concluye que no se aprecian diferencias en cuanto a la intensidad o posición de los torbellinos cónicos al variar el nivel de turbulencia de la corriente incidente. Sin embargo, sí se observan dos efectos en la variación de la distribución del coeficiente de presión como función de la altura de los parapetos. En primer lugar, y como es lógico, la succión se ve atenuada debido a que, en principio, los parapetos elevan los torbellinos cónicos sobre la cubierta y ello produce un menor efecto de succión. En segundo lugar se aprecia un ligero desplazamiento de los torbellinos

cónicos hacia el interior de la cubierta, esto es, los parapetos producen el efecto de aumentar el ángulo entre la proyección vertical del eje de los torbellinos cónicos sobre la cubierta y el borde de la misma donde cada uno de ellos se forma.

En la figura 3.7 y en la tabla 3.4 se muestran las máximas succiones medidas, $-c_p$, en la cubierta del modelo de ensayos con parapetos sólidos en las dos condiciones de flujo, es decir, con los dos niveles de turbulencia de la corriente incidente antes descritos. En la gráfica se han representado mediante cuadrados las medidas hechas con el nivel de turbulencia bajo, y mediante círculos las medidas correspondientes al nivel de turbulencia alto. Para alturas de parapetos bajas, $h/H < 0,031$, se puede observar que en el caso de que el flujo presente una turbulencia más baja, la succión máxima medida en la cubierta del modelo aumenta con la altura de los parapetos. La succión máxima medida en la condición de baja turbulencia tiene un máximo para una altura de los parapetos $h/H = 0,031$. A partir de ese punto la succión máxima medida comienza a disminuir alcanzando un valor que se mantiene ya constante, en torno a $-c_p = 1,1$, para alturas superiores a $h/H = 0,12$. Por el contrario, cuando la corriente incidente presenta un nivel de turbulencia más elevado, la succión máxima medida disminuye siempre en función de la altura de los parapetos. Para alturas de los parapetos menores que $h/H = 0,044$ esta disminución no es especialmente pronunciada, pero a partir de este punto la pendiente se hace más negativa, coincidiendo con los valores de la máxima succión medidos con la corriente de aire de nivel de turbulencia más bajo.

Figura 3.6. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente. En el modelo han sido instalados parapetos verticales sólidos de altura $h/H = 0$, $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,063$, y las medidas se han realizado en dos condiciones de flujo, uno de baja turbulencia ($I_u = 2,5\%$ a la altura de la cubierta) y otro de turbulencia más elevada ($I_u = 10\%$).

Figura 3.7. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional de los parapetos, h/H , para dos condiciones distintas de flujo, $I_u = 2,5\%$ (cuadrados) e $I_u = 10\%$ (círculos). El modelo de ensayos está situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto de la corriente incidente. Se han representado también, mediante símbolos cuyo contorno es rojo, los valores de la succión medida en ensayos similares por otros autores: Kramer y otros (1979) (círculos), Kind (1988) (rombos), Lythe y Surry (1983) (triángulos), y Baskaran y Stathopoulos (1988) (cuadrados).

Tabla 3.4. Succiones máximas medidas en la cubierta del modelo M3D1, $-c_p$, situado en una corriente cuyo ángulo de incidencia respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y con parapetos verticales sólidos (tipo “A”) de altura adimensional, h/H , instalados en los bordes del tejado. Las medidas se han realizado en dos condiciones de flujo, definidas mediante la intensidad de la turbulencia de la corriente libre a la altura de la cubierta del modelo, $I_u = 2,5\%$ e $I_u = 10\%$.

h/H	$-c_p, (I_u = 2,5\%)$	$-c_p, (I_u = 10\%)$
0	3,68	3,59
0,013	-	3,36
0,019	3,88	-
0,025	4,01	3,46
0,031	4,15	-
0,038	3,86	3,33
0,044	3,37	-
0,50	-	3,12
0,063	2,58	2,50
0,094	1,39	1,61
0,125	1,14	1,21

En la figura 3.7 se han incluido también los valores de la succión medida por otros autores en función de la altura de parapetos verticales sólidos situados en los bordes de la cubierta de modelos de ensayos. Las condiciones en que se realizaron estos otros ensayos son similares a las de los ensayos pertenecientes a este trabajo de tesis, es decir,

en todos los casos se han medido coeficientes de presión en un modelo de ensayos cuya forma es un paralelepípedo. La orientación de todos los modelos respecto a la corriente incidente es de 45° , y las medidas de presión se han adimensionalizado en todos los casos con la presión dinámica medida en la corriente libre a la altura de la cubierta del modelo (salvo en el caso de las medidas realizadas por Kramer y otros (1979), para las cuales esta condición no puede comprobarse por falta de datos en el correspondiente artículo).

Los datos incluidos en la figura 3.7 son: la máxima succión media medida en la cubierta por Kind (1988), la succión media en un punto cercano a la esquina de la cubierta por Baskaran y Stathopoulos (1988) y por Kramer y otros (1973), y la succión media máxima en una línea paralela y cercana a uno de los bordes de la cubierta por Lythe y Surry (1983). Esta disparidad en la localización de las medidas sobre los modelos se traduce, como es lógico, en una gran disparidad en los resultados expuestos en la figura 3.7. Sin embargo, casi todas las medidas tienen un comportamiento similar, consistente en un aumento de la succión con la altura de los parapetos para alturas bajas de los mismos, aumento de la succión que se mantiene hasta una cierta altura de los parapetos a partir de la cual la succión comienza a disminuir. Las medidas de Kind (1988) son parcialmente diferentes a las de los otros autores en cuanto al comportamiento de la succión para alturas bajas de los parapetos. Kind (1988) ha medido un comportamiento constante (y no creciente), de la succión máxima con la altura de los parapetos hasta una cierta altura de los mismos, a partir de la cual esta succión disminuye. Esta diferencia entre las medidas de los distintos autores es achacada por Kind (1988) a la deficiente densidad de tomas de presión localizadas en la cubierta de los modelos de ensayo de los demás autores. Como ya se ha mencionado, según aumenta la altura de los parapetos la

posición angular de los torbellinos cónicos varía. Ello hace que la proyección vertical del núcleo de los torbellinos sobre la cubierta del modelo cruce, para determinadas alturas de los parapetos, alguna de las tomas de presión más próximas a la esquina de la cubierta, midiéndose entonces una succión especialmente alta en esa toma. Con una descripción analítica del fenómeno de los torbellinos cónicos semejante al modelo semi-empírico propuesto por Cook puede localizarse, a partir de un conjunto discreto de medidas, el punto del área de medida en donde se produce la máxima succión y su valor aproximado. Ello solucionaría el problema referido por Kind de comparar distintas medidas hechas con distintas distribuciones de tomas de presión.

Las medidas realizadas para esta tesis muestran un mayor parecido con las de Kind (1988), debido posiblemente a la coincidencia de medir la succión media máxima independientemente del lugar de la cubierta en donde ésta se produzca. Aún así, los valores de la succión medidos son inferiores a los de este autor, especialmente a partir de una altura de parapetos superior a $h/H = 0,044$. Se comprueba en la figura 3.7, además, que a partir de una altura $h/H = 0,08$ las medidas realizadas de la succión máxima medida se asemejan más a las realizadas por Lythe y Surry. Junto a la mencionada disparidad de la distribución de tomas de presión en los modelos de ensayos, existe otra causa que contribuye a las diferencias observadas en la figura 3.7. Ésta consiste en la diferencia entre los tamaños de los modelos de ensayos, ya que el tamaño relativo entre el diámetro de las tomas de presión instaladas y el modelo condiciona los valores obtenidos, aumentando la succión registrada cuanto menor es el tamaño de las mencionadas tomas. Este es un efecto que, según Cook (2002), ha de tenerse especialmente en cuenta al comparar medidas del coeficiente de presión realizadas en edificios reales y en modelos a escala ensayados en túnel aerodinámico.

Las tomas de presión empleadas en esta tesis tienen un diámetro de 1 mm (véase el capítulo 2) y, aunque sólo se proporciona información a este respecto en el trabajo de Kind (tomas de diámetro 0,8 mm), es razonable suponer que en todos los experimentos cuyos resultados están referidos en la figura 3.7 el diámetro de las tomas empleadas es muy parecido. Sin embargo, esto no ocurre con el tamaño de los modelos de ensayos empleados, el modelo utilizado por Kind tiene una planta de 0,455 m por 2,35 m y una altura de 1,6 m, el modelo de Baskaran y Stahtopoulos tiene una planta de 0,152 m por 0,152 m y una altura de 0,197 m, el modelo de Lythe y Surry tiene una planta de 0,122 m por 0,244 m y una altura de 0,06 m, y finalmente, no se especifican los datos del modelo de ensayos empleado en el trabajo de Kramer y otros. Luego, por lo anteriormente mencionado, se puede decir que las diferencias de tamaño de los modelos empleados contribuyen a las diferencias observadas en la figura 3.7.

En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se representan los valores de los parámetros G , α_0 y α_c del modelo de Cook (1990), aplicado a las distribuciones del coeficiente de presión medidas en las dos condiciones de flujo en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura de los parapetos, h/H . Se observa que un aumento de la turbulencia no repercute de forma apreciable en los parámetros del modelo de Cook. Si acaso, sí podría interpretarse de la figura 3.9 que, con un mayor nivel de turbulencia en la corriente incidente, el ángulo entre cada uno de los ejes de los torbellinos cónicos y el borde de la cubierta más próximo, α_0 , disminuye ligeramente. Los datos de las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se incluyen en las tablas 3.5 y 3.6, junto a los restantes parámetros, c_{p0} y Δc_p , del modelo de Cook y a la máxima succión medida en cada una de las dos zonas afectadas por los torbellinos cónicos.

A la vista de estos resultados, se ha continuado el análisis de los parapetos verticales midiendo siempre los coeficientes de presión con un flujo de aire de bajo nivel de turbulencia. De este modo no sólo se ha impuesto la condición de flujo que produce una mayor succión en la cubierta para alturas bajas de los parapetos, sino que también se simplifican los ensayos por tener que disponer menos elementos en el túnel aerodinámico (generadores de turbulencia) para la realización de los ensayos.

Figura 3.8. Valores del parámetro G del modelo de Cook aplicado a las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo de ensayos M3D1, en función de la altura adimensional de los parapetos sólidos instalados en el propio modelo, h/H . La corriente de aire tiene un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$ respecto del modelo. Los cuadrados (rombos) representan el Torbellino 1 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$). Los círculos (triángulos) representan el Torbellino 2 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$).

Figura 3.9. Valores del parámetro α_0 del modelo de Cook aplicado a las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo de ensayos M3D1, en función de la altura adimensional de los parapetos sólidos instalados en el propio modelo, h/H . La corriente de aire tiene un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$ respecto del modelo. Los cuadrados (rombos) representan el Torbellino 1 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$). Los círculos (triángulos) representan el Torbellino 2 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$).

Figura 3.10. Valores del parámetro α_c del modelo de Cook aplicado a las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo de ensayos M3D1, en función de la altura adimensional de los parapetos sólidos instalados en el propio modelo, h/H . La corriente de aire tiene un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$ respecto del modelo. Los cuadrados (rombos) representan el Torbellino 1 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$). Los círculos (triángulos) representan el Torbellino 2 en condición de flujo de baja turbulencia, $I_u = 2,5\%$ (alta turbulencia, $I_u = 10\%$).

Tabla 3.5. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos sólidos verticales instalados en el borde de la cubierta. La corriente tiene la orientación $\beta = 45^\circ$ y una intensidad de turbulencia $I_u = 2,5\%$ a la altura de la cubierta del modelo, medida corriente arriba del modelo. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,019	3,18	1,43	-0,30	-1,42	13°	8,9°	3,88	1,34	-0,63	-1,26	13°	8°
0,025	3,59	1,42	-0,30	-1,35	13°	9°	4,01	1,46	-0,58	-1,29	15°	7°
0,031	3,41	1,33	-0,38	-1,14	15°	9°	4,15	1,45	-0,53	-1,28	15°	7,3°
0,037	3,59	1,27	-0,47	-1,02	15°	9°	3,86	1,42	-0,60	-1,17	15°	7°
0,044	3,31	1,11	-0,62	-0,86	17°	8°	3,37	1,28	-0,60	-1,14	15°	8°
0,063	2,26	0,77	-0,16	-1,26	17°	13°	2,58	0,85	-0,44	-1,21	17°	8,8°
0,094	1,39	0,24	-0,40	-0,84	17°	17°	1,37	0,23	-0,39	-0,84	17°	15°

Tabla 3.6. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos sólidos verticales instalados en el borde de la cubierta. La corriente tiene la orientación $\beta = 45^\circ$ y una intensidad de turbulencia $I_u = 10\%$ a la altura de la cubierta del modelo, medida corriente arriba del modelo. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,14	1,69	-0,27	-1,44	9°	8,5°	3,59	1,34	-0,31	-1,93	9°	7,5°
0,013	3,27	1,57	-0,36	-1,43	11°	6,9°	3,36	1,82	-0,29	-1,84	9°	8,2°
0,025	2,89	1,31	-0,29	-1,39	13°	8,1°	3,46	1,17	-0,34	-1,47	13°	8,3°
0,037	3,09	1,19	-0,24	-1,20	13°	10,5°	3,33	1,21	-0,30	-1,35	13°	9,4°
0,050	2,50	0,97	-0,41	-0,93	15°	9°	3,12	1,15	-0,42	-1,08	15°	9°
0,063	2,42	0,8	-0,44	-0,85	17°	10°	2,50	0,83	-0,38	-1,02	15°	11,3°
0,094	1,50	0,42	-0,40	-0,72	17°	13,4°	1,59	0,49	-0,46	-0,70	17°	13,2°

En las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se muestra la distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo de ensayos con los distintos tipos de parapetos objeto de estudio. Se puede observar en cada figura la variación de la distribución del coeficiente según la porosidad de los parapetos, ϕ , teniendo éstos una altura adimensional sobre la cubierta $h/H = 0,031$, $h/H = 0,063$, $h/H = 0,094$ y $h/H = 0,125$.

En las figuras antes mencionadas se puede apreciar que una porosidad entre media y baja de los parapetos verticales, $\phi \approx 0,28-0,5$, afecta decisivamente a la acción de los torbellinos cónicos sobre la cubierta del modelo. Para alturas de parapetos bajas, $h/H < 0,031$, no se aprecia prácticamente ninguna alteración en la distribución del coeficiente de presión debida a la porosidad de los parapetos. Sin embargo, para alturas a partir de $h/H = 0,063$ se observa que los parapetos de tipo “C” (porosidad baja, $\phi = 0,28$) y de tipo “D” (porosidad media, $\phi = 0,5$) reducen de una forma más efectiva la succión en la cubierta del modelo de ensayos en comparación con los parapetos tipo “A”, que son sólidos. Los parapetos tipo “B” (porosidad alta, $\phi = 0,81$) apenas reducen la succión sobre la cubierta del modelo, debido a que no se crea corriente abajo de ellos una estela lo suficientemente grande para interactuar con los torbellinos cónicos y disminuir su intensidad. Obsérvese en la figura 3.14 que aún con los parapetos tipo “B” de máxima altura, $h/H = 0,125$, la zona de medida en la cubierta del modelo de ensayos muestra en una pequeña área tonos azules, los cuales corresponden a una succión alta, $-c_p \approx 3$.

Figura 3.11. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,031$. Tipo “A” (sólidos, $\phi = 0$), tipo “B” (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo “C” (porosidad baja, $\phi = 0,28$) y tipo “D” (porosidad media, $\phi = 0,5$). La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.12. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,063$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad baja, $\phi = 0,28$) y tipo "D" (porosidad media, $\phi = 0,5$). La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.13. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,094$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad baja, $\phi = 0,28$) y tipo "D" (porosidad media, $\phi = 0,5$). La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.14. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,125$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad baja, $\phi = 0,28$) y tipo "D" (porosidad media, $\phi = 0,5$). La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, es $I_u = 2,5\%$.

En la figura 3.15 se muestran las succiones máximas, $-c_p$, medidas en la cubierta del modelo de ensayos con los cuatro tipos de parapetos instalados en la cubierta, “A”, “B”, “C” y “D”, en función de la altura de los mismos, h/H . En ella se puede observar que para alturas de parapetos bajas, hasta $h/H = 0,031$, una porosidad baja y media de los parapetos reduce considerablemente la succión máxima medida en la cubierta del modelo. Esto es, con los parapetos tipo “C” y “D” de una altura $h/H = 0,031$ la succión máxima medida se ha reducido del orden de un 30% respecto de la succión máxima medida con los parapetos tipo “A”. Esto puede parecer una contradicción a la vista de las distribuciones del coeficiente de presión medidas con los distintos parapetos, todos de altura $h/H = 0,031$, incluidas en la figura 3.11. Ya se ha mencionado que en esta última figura no se aprecia una gran diferencia entre las distribuciones de coeficiente de presión medidas, aunque la diferencia entre los mínimos de cada distribución (succiones máximas) sí lo es. Ello da una idea de lo reducido del área en donde se produce la succión máxima, la cual es captada en los ensayos por la toma de presión que cumple dos condiciones, por un lado estar muy próxima a la proyección vertical sobre la cubierta del eje torbellino cónico, y por otro lado estar también muy próxima a la esquina del propio tejado. Además, en la figura 3.15 se observa que, a partir de una altura superior a $h/H = 0,093$, los valores de la succión máxima medidos con los parapetos sólidos y con los parapetos de porosidad media ó baja son similares, $-c_p \approx 1,2-1,6$. Aunque también se ha de mencionar que con los parapetos de porosidad intermedia (tipo “D”) de estas alturas, que se pueden considerar como grandes, las distribuciones de coeficiente de presión sugieren que todavía se forma un torbellino cónico en el borde de la cubierta gracias al flujo de aire que pasa a través de los parapetos, si bien este torbellino está muy amortiguado (véanse las figuras 3.13 y 3.14). Esto no ocurre, obviamente, si los parapetos son sólidos, ya que los torbellinos se

forman en este caso en el borde de los parapetos, es decir, más lejos de la superficie de la cubierta del modelo y por lo tanto no es de extrañar que la succión que se mide en este caso sea menor y más uniforme.

Figura 3.15. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3D1 con la altura adimensional de los distintos parapetos, h/H . Los cuadrados indican parapetos tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), los rombos indican parapetos tipo "B" ($\phi = 0,81$), los triángulos los del tipo "C" ($\phi = 0,28$), y los círculos indican los del tipo "D" ($\phi = 0,5$). El modelo de ensayos está situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto de la corriente incidente.

Llama la atención la poca efectividad de los parapetos tipo “B” en la reducción de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta del modelo sea cual sea la altura de los mismos. En las figuras 3.11 a 3.14 se puede observar que la distribución del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo de ensayos apenas varía según se aumenta la altura de estos parapetos. En la figura 3.15 se observa que la succión máxima medida oscila en función de la altura de los parapetos tipo “B”. Ello se produce por la interacción entre la estela de los hilos horizontales de la malla que conforma el parapeto y los torbellinos cónicos (véase la figura 3.16), interacción que, como ya se ha hecho notar, es insuficiente para atenuar de una forma efectiva la acción de los torbellinos cónicos.

Figura 3.16. Esquema de la interacción de la estela que se forma detrás de los hilos horizontales que conforman los parapetos tipo “B” y un torbellino cónico.

En las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 se incluyen respectivamente, y en función de la altura de los parapetos instalados, los valores de los parámetros del modelo de Cook aplicados a las distribuciones del coeficiente de presión medidas en la cubierta del modelo de ensayos con los parapetos tipo “B”, tipo “C” y tipo “D”. Los valores incluidos en estas tablas, junto a los contenidos en la tabla 3.5 correspondientes a los ensayos realizados con los parapetos tipo “A”, están representados en las figuras 3.17, 3.18 y 3.19.

En la figura 3.17 se muestran cuatro gráficas, cada una correspondiente a uno de los tipos de parapetos verticales ensayados. En cada gráfica se representan, en función de la altura de los parapetos, h/H , la variación tanto de las intensidades de los dos torbellinos cónicos, G , como de las succiones máximas medidas, $-c_p$, en las zonas de la cubierta afectadas por cada uno de los torbellinos. En esta figura se puede observar cómo la intensidad de los torbellinos definida mediante el parámetro G del modelo de Cook se correlaciona de una forma excelente con las máximas succiones medidas en la cubierta del modelo de ensayos.

La figura 3.18 es igual que la 3.17, con la salvedad de que en ella se representa la variación de la posición de los torbellinos cónicos, definida mediante el parámetro α_0 del modelo de Cook, en función de la altura de cada uno de los parapetos verticales. Se puede observar que la posición de los torbellinos en función de la altura de los parapetos sólidos (tipo “A”) y los de baja porosidad (tipo “C”), sigue una ley lineal creciente con una dispersión pequeña, en torno a 2°. Sin embargo, con parapetos de porosidad media-alta (tipo “D” ó tipo “B”) la posición de los torbellinos es mucho más dispersa, dándose la circunstancia de que los valores de la posición del Torbellino 1 y del Torbellino 2 son dispares. Este fenómeno se debe al hecho de que la ya comentada disparidad de flujo en

los bordes anteriores de la cubierta, debido a la situación del punto de remanso en una de las fachadas, se ve amplificada por la existencia de elementos porosos en los mencionados bordes, cuya estela, evidentemente, depende de las condiciones del flujo en un entorno muy próximo a ellos. La misma situación queda reflejada en las gráficas de la figura 3.19, en las que se muestra la variación con la altura de los parapetos del ángulo de apertura de los torbellinos cónicos (definido mediante el parámetro α_c del modelo de Cook).

Tabla 3.7. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos verticales tipo “B”, de porosidad $\phi = 0,81$, instalados en el borde de la cubierta. Los ensayos se han realizado con un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$, y una intensidad de la turbulencia $I_u = 2,5\%$ a la altura de la cubierta del modelo. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,019	2,61	1,15	-0,67	-1,01	13°	6,2°	2,94	1,02	-0,42	-1,50	11°	9,4°
0,031	2,66	1,02	-0,43	-1,08	15°	9°	3,24	1,01	-0,38	-1,51	11°	9,8°
0,050	2,71	0,88	-0,68	-0,84	17°	12,1°	3,38	0,98	-0,38	-1,41	11°	10,6°
0,063	2,72	0,92	-0,67	-0,82	17°	7°	3,35	0,96	-0,37	-1,43	11°	9,8°
0,069	2,57	0,89	-0,69	-0,78	17°	8°	3,06	0,92	-0,68	-1,03	15°	7°
0,081	2,5	0,87	-0,68	-0,76	17°	8°	2,96	0,98	-0,53	-1,24	13°	8,7°
0,094	2,48	1,05	-0,41	-1,00	17°	8°	2,93	0,96	-0,48	-1,25	13°	9,1°
0,106	2,38	0,83	-0,45	-0,80	17°	8°	3,09	1,09	-0,51	-1,20	11°	10,3°

Tabla 3.8. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos verticales tipo “C”, de porosidad $\phi = 0,28$, instalados en el borde de la cubierta. Los ensayos se han realizado con un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$, y una intensidad de la turbulencia $I_u = 2,5\%$ a la altura de la cubierta del modelo. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,031	2,63	1,11	-0,39	-1,13	13°	11°	2,71	1,02	-0,44	-1,39	13°	9,3°
0,063	1,95	0,62	-0,32	-0,91	17°	14,5°	1,71	0,48	-0,46	-0,78	17°	14°

Tabla 3.9. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos verticales tipo “D”, de porosidad $\phi = 0,5$, instalados en el borde de la cubierta. Los ensayos se han realizado con un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$, y una intensidad de la turbulencia $I_u = 2,5\%$ a la altura de la cubierta del modelo. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,031	2,64	1,26	-0,06	-1,47	11°	14,7°	3	1,24	-0,2	-1,86	11°	9,2°
0,063	1,52	0,33	-0,30	-0,85	15°	18°	2,1	1,02	-0,19	-1,34	9°	15°
0,094	1,41	0,33	-0,36	-0,64	17°	18°	1,68	0,57	-0,29	-0,91	13°	15°
0,125	1,14	0,23	-0,37	-0,55	17°	19°	1,46	0,59	-0,29	-0,72	11°	19,8°

Figura 3.17. Variación de las succiones máximas medidas en la cubierta del modelo M3D1, $-c_p$, y de la intensidad de los torbellinos cónicos, definida mediante el parámetro G del modelo de Cook, con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos verticales ensayados: tipo "A" ($\phi = 0$), tipo "B" ($\phi = 0,81$), tipo "C" ($\phi = 0,28$) y tipo "D" ($\phi = 0,5$). Los cuadrados (círculos) negros representan la succión máxima medida en la zona afectada por el Torbellino 1 (Torbellino 2), los cuadrados (círculos) blancos representan la intensidad del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.18. Variación de la posición de los torbellinos cónicos, definida mediante el parámetro α_0 del modelo de Cook(1990), con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos verticales ensayados: tipo "A" ($\phi = 0$), tipo "B" ($\phi = 0,81$), tipo "C" ($\phi = 0,28$) y tipo "D" ($\phi = 0,5$). Los cuadrados (círculos) representan la posición del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.19. Variación del ángulo de apertura de los torbellinos cónicos, definido mediante el parámetro α_c del modelo de Cook, con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos verticales ensayados: tipo "A" ($\phi=0$), tipo "B" ($\phi=0,81$), tipo "C" ($\phi=0,28$) y tipo "D" ($\phi=0,5$). Los cuadrados (círculos) representan el ángulo de apertura del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta=45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u=2,5\%$.

3.3. Estudio de la influencia de parapetos en voladizo en la carga aerodinámica en la cubierta de los modelos M2D y M3D1.

La distribución del coeficiente de presión en un tejado orientado de tal manera que una de las fachadas sea perpendicular al viento es conocida, bien por haber sido estudiada en modelos de ensayos que reproducen un edificio (Castro y Robins, 1977; Bächlin y otros, 1983), o bien por su similitud con el flujo de aire alrededor de un cilindro de sección rectangular orientado de forma perpendicular al viento (Haan y otros, 1998; Li y Melbourne, 1995). En ambos casos, al llegar al borde superior de la fachada, la corriente se desprende creando una burbuja de recirculación que será más o menos grande dependiendo del nivel de turbulencia de la corriente incidente, véase la figura 3.20.

Figura 3.20. Esquema del flujo bidimensional desprendido en la cubierta de un edificio (a), y de un cilindro de base rectangular (b).

Para examinar de qué manera un voladizo podría alterar esa burbuja de recirculación, y por extensión la distribución del coeficiente de presión en la cubierta, se han llevado a cabo una serie de medidas experimentales en el túnel aerodinámico S1 con el modelo de ensayos bidimensional M2D. Este modelo de ensayos M2D, descrito en detalle en el capítulo 2, es un modelo de edificio de altura $H = 100$ mm y longitud $L = 420$ mm. Sobre el borde anterior de la cubierta del modelo se ha situado un voladizo de 10 mm de anchura (véase la figura 2.13), y se ha medido el coeficiente de presión en la cubierta variando la altura del mencionado voladizo. Se han ensayado dos posiciones del voladizo sobre el borde de la cubierta, en la primera posición el voladizo sale 5 mm hacia fuera del modelo, y en la segunda posición el borde anterior del voladizo está enrasado con una línea vertical que parte del borde de la cubierta. En lo que sigue se denomina al voladizo situado en la primera posición voladizo tipo “P1”, y al voladizo situado en la segunda posición voladizo tipo “P2” (en las gráficas de resultados de la figura 3.21 se han incluido esquemas de ambos tipos de voladizo). En las mencionadas gráficas se observa que para una altura del voladizo hasta $h/H = 0,075$, se produce un pico de succión debajo del voladizo que excede la máxima succión que se presenta en la cubierta sin este complemento instalado. No obstante, a una longitud $x/L = 0,2$ medida desde el borde de la cubierta, este pico de succión se atenúa dando como resultado una reducción de la carga aerodinámica global en la cubierta en comparación con el caso del modelo sin parapeto alguno.

Figura 3.21. Variación de la succión medida en la cubierta del modelo M2D con la distancia adimensional al borde anterior, x/L , con los parapetos tipo "P1" y tipo "P2" instalados. Los símbolos indican la particularidad del ensayo: medidas sin parapetos (cuadrados negros), $h/H = 0,025$ (cuadrados blancos), $h/H = 0,05$ (círculos negros), $h/H = 0,075$ (círculos blancos) y $h/H = 0,1$ (triángulos blancos).

Tras estos primeros ensayos de flujo bidimensional con los parapetos en voladizo se concluye que éstos producen un efecto favorable en la carga aerodinámica sobre una cubierta, si bien se ha de tener en cuenta que el chorro de aire que pasa entre el voladizo y la cubierta produce una alta succión justo debajo del voladizo.

En la figura 3.22 se muestran los esquemas de los parapetos en voladizo empleados en los ensayos realizados con el modelo M3D1. Estos parapetos han sido contrachapados de 1,2 mm de espesor. Se ha realizado una primera serie de ensayos con parapetos en voladizo cuyos bordes son rectos, estos parapetos se denominan tipo “W1” y tipo “W2”. Los parapetos tipo “W1” sobresalen 4 mm hacia fuera del borde de la cubierta del modelo de ensayos, mientras que los bordes anteriores de los parapetos tipo “W2” se proyectan verticalmente sobre los bordes de la mencionada cubierta. A continuación se ha llevado a cabo una segunda serie de ensayos con parapetos semejantes a los anteriores, con la particularidad de que su borde anterior (borde orientado hacia fuera de la cubierta) es dentado. Estos parapetos se denominan tipo “S1” y tipo “S2”. El objetivo de este segundo conjunto de ensayos es estudiar si con esta configuración de borde dentado se puede introducir turbulencia de pequeña escala que sea capaz de reducir la intensidad de los torbellinos cónicos. En la tabla 3.10 se incluyen las alturas con las que cada tipo de parapeto ha sido ensayado.

Al igual que los ensayos relativos al estudio de los parapetos verticales, los ensayos de los parapetos en voladizo se han llevado a cabo situando el modelo M3D1 con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente. El nivel de turbulencia de la corriente de aire en el túnel aerodinámico con el cual se han realizado estos ensayos ha sido igual al seleccionado para estudiar los parapetos verticales, esto es, una intensidad

de turbulencia $I_u = 2,5\%$ medida a la altura de la cubierta del modelo en corriente libre.

Figura 3.22. Esquema acotado de los parapetos en voladizo utilizados para la experimentación con el modelo M3D1. Las cotas están expresadas en milímetros.

Tabla 3.10. Características de los parapetos en voladizo utilizados en el modelo de ensayo M3D1. Los campos de la tabla son el nombre (los parapetos están descritos en el texto) y la altura adimensional del parapeto, h/H , donde h es la altura del mismo y H es la altura del modelo de ensayos ($H = 0,16$ m).

Tipo	h/H
W1	0,016; 0,031; 0,063; 0,094; 0,125
W2	0,016; 0,031; 0,063; 0,094; 0,125
S1	0,031; 0,063
S2	0,031; 0,063

En la figuras 3.23 y 3.24 se muestra la variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo de ensayos M3D1 con la altura de los parapetos tipo “W1” y “W2”. En estas figuras se puede observar en primer lugar que para una altura de los parapetos $h/H = 0,031$, la succión sobre la cubierta del modelo está más amortiguada en comparación con la succión medida con los parapetos situados a las otras alturas. Esto ocurre tanto con los parapetos tipo “W1” como con los tipo “W2”. En segundo lugar, queda patente que los parapetos en voladizo sólo producen un alivio de la carga aerodinámica sobre la cubierta del modelo hasta una altura límite, comprendida entre $h/H = 0,063$ y $h/H = 0,094$, de ambos tipos de parapetos.

Por último, se observa que los parapetos tipo “W1” producen una mayor disminución de la succión en la cubierta del modelo que los parapetos tipo “W2”. Esto es en realidad

una obriedad, ya que al estar los parapetos tipo “W1” situados más hacia afuera del borde de la cubierta que los tipo “W2”, el remanso de la corriente que se crea debajo de los primeros es más grande; con lo que el chorro de aire que se genera debajo del voladizo es también mayor, y así la acción de los torbellinos cónicos se ve afectada en mayor medida con los parapetos tipo “W1” que con los tipo “W2”.

En la figura 3.25 se representa la distribución del coeficiente de presión, c_p , medida en la cubierta del modelo M3D1 con los parapetos tipo “S1” y tipo “S2” situados en los bordes de la misma. Como puede observarse, no existen diferencias apreciables respecto a la distribución del coeficiente de presión medida con los otros parapetos en voladizo (tipo “W1” y tipo “W2”) instalados en el modelo de ensayos. Por ello no se ha continuado una línea de investigación en este sentido, esto es, estudiando la influencia de pequeños generadores de turbulencia combinados con los parapetos en voladizo.

Figura 3.23. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3D1 con los parapetos tipo “W1” y tipo “W2” de alturas $h/H = 0,016$, $h/H = 0,031$ y $h/H = 0,063$.

Figura 3.24. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3D1 con los parapetos tipo “W1” y tipo “W2” de alturas $h/H = 0,094$ y $h/H = 0,125$.

Figura 3.25. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3D1 con los parapetos tipo “S1” y tipo “S2” de alturas $h/H = 0,031$ y $h/H = 0,063$.

En la figura 3.26 se ha representado la variación de la máxima succión medida en la cubierta del modelo con la altura de los parapetos en voladizo tipo “W1” y “W2”. En esta gráfica se compara, además, el comportamiento de los parapetos en voladizo con el comportamiento de los parapetos verticales sólidos (tipo “A”) y de porosidad baja (tipo “C”). Como se puede apreciar en esta gráfica, mediante el uso de los parapetos en voladizo ensayados se logra una disminución de la succión máxima más efectiva que con los parapetos verticales en el rango de alturas de parapetos bajas, es decir, en el intervalo comprendido entre $h/H = 0$ y $h/H = 0,05$. Para una altura $h/H = 0,031$, con los parapetos tipo “W1” se ha medido una disminución de la succión máxima en la cubierta del modelo de ensayos de hasta un 60% respecto de la medida con los parapetos sólidos (tipo “A”). Una vez superada la altura $h/H = 0,05$ la efectividad de los parapetos en voladizo observada en las medidas es menor que la mostrada por los parapetos verticales, ya sean porosos o sólidos. Esto es debido a que, como es fácil de imaginar, a una determinada altura de los voladizos la configuración local del flujo cambia, originándose en las aristas de la cubierta y debajo de los voladizos, los torbellinos cónicos. Para una altura $h/H = 0,125$ de los parapetos del tipo “W1” y “W2”, la succión máxima medida en la cubierta del modelo de ensayos llega a un valor, $-c_p \approx 3$, similar al medido sin ningún tipo de parapeto instalado en la cubierta, $-c_p \approx 3,5$.

La eficacia de los parapetos en voladizo ha sido comprobada también en un modelo cuya cubierta es curva, véase el anexo 3. En las medidas de la distribución del coeficiente de presión en la mencionada cubierta curva, se observa claramente la interacción entre el chorro generado bajo los voladizos y un torbellino cónico, y se comprueba que la presencia de los parapetos en voladizo difuminan (y alivian) eficazmente la succión generada por los torbellinos cónicos.

Figura 3.26. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3D1 con la altura adimensional de los parapetos instalados en sus bordes, h/H . Los rombos indican los parapetos tipo “W1”, los círculos indican los parapetos tipo “W2”, los cuadrados negros indican los parapetos tipo “A” (sólidos, $\phi = 0$) y los triángulos negros indican los parapetos tipo “C” ($\phi = 0,28$). El modelo de ensayos ha sido posicionado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto de la corriente incidente, cuya intensidad de la turbulencia es $I_u = 2,5\%$.

En las tablas 3.11 y 3.12 se incluyen los valores de los parámetros del modelo de Cook aplicados a las distribuciones del coeficiente de presión medidas en la cubierta del modelo M3D1 con los parapetos tipo “W1” y “W2”. Los valores de los parámetros del modelo de Cook que definen la intensidad, posición angular y ángulo de apertura de los torbellinos, es decir, G , α_0 y α_c , se han representado respectivamente en las figuras 3.27, 3.28 y 3.29.

Como puede observarse en la figura 3.27, en la que se representa, además del parámetro G , la máxima succión medida en la cubierta, $-c_p$, ambos valores siguen un comportamiento en función de la altura de los parapetos marcadamente parecido, tal y como ya se ha observado que ocurre con los parapetos verticales. De esta representación gráfica se concluye que la intensidad de los torbellinos cónicos es amortiguada para alturas bajas de los parapetos en voladizo, estando esta disminución en torno a un 70% respecto de la intensidad de los torbellinos que se forman sobre la cubierta del modelo en el caso de no existir parapeto alguno en la misma.

En cuanto a la posición y el ángulo de apertura de los torbellinos cónicos en las figuras 3.28 y 3.29 se puede ver, primero, que para una altura de los parapetos baja ($h/H = 0,031$) la posición angular de los torbellinos se aleja del borde en la que éstos son generados, y segundo, que para esta altura de los parapetos los torbellinos tienen un ángulo de apertura mayor. Ambos efectos son señal de que el uso de este tipo de parapetos interfiere positivamente en la acción de los torbellinos cónicos sobre la cubierta del modelo de ensayos.

Tabla 3.11. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos en voladizo tipo “W1” instalados en el borde del tejado. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2. El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,031	1,64	0,33	-0,78	-0,4	17°	9,3°	1,65	0,44	-0,79	-0,44	17°	9,7°
0,063	2,21	0,81	-0,44	-0,96	11°	10,4°	2,14	0,66	-0,43	-1,08	11°	10,2°
0,094	2,55	1,10	-0,50	-0,97	11°	7,8°	2,91	0,92	-0,54	-1,12	11°	7°
0,125	2,51	1,19	-0,47	-0,94	11°	7,6°	3,09	1,09	-0,54	-1,13	11°	6,6°

Tabla 3.12. Parámetros del modelo de Cook aplicados a las medidas experimentales del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo M3D1 en función de la altura adimensional, h/H , de los parapetos en voladizo tipo “W2” instalados en el borde del tejado. Se incluye también la succión máxima, $-c_p$, medida en la zona afectada por el Torbellino 1 y en la zona afectada por el Torbellino 2. El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

	Torbellino 1						Torbellino 2					
h/H	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c	$-c_p$	G	c_{p0}	Δc_p	α_0	α_c
0	3,44	1,64	-0,38	-1,46	11°	7,8°	3,68	1,67	-0,35	-1,89	9°	7,7°
0,016	1,84	0,50	-0,79	-0,64	17°	7,9°	1,98	0,50	-0,64	-0,96	15°	9,4°
0,031	1,87	0,39	-0,86	-0,61	17°	6,4°	2,08	0,49	-0,82	-0,59	17°	7,7°
0,063	2,27	0,81	-0,36	-1,16	11°	11,6°	2,51	0,74	-0,64	-0,88	15°	7,8°
0,094	2,55	1,12	-0,48	-0,95	11°	7,25°	2,62	0,91	-0,47	-1,06	11°	8,8°
0,125	2,59	1,22	-0,49	-0,95	11°	7,5°	2,98	1,02	-0,50	-1,13	11°	8°

Figura 3.27. Variación de las succiones máximas medidas, $-c_p$, y de la intensidad de los torbellinos cónicos, definida mediante el parámetro G del modelo de Cook, con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos en voladizo ensayados: tipo "W1" y tipo "W2". Los cuadrados (círculos) negros representan la succión máxima medida en la zona afectada por el Torbellino 1 (Torbellino 2). Los cuadrados blancos (círculos) representan la intensidad del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.28. Variación de la posición de los torbellinos cónicos, definida mediante el parámetro α_0 del modelo de Cook, con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos en voladizo ensayados: tipo "W1" y tipo "W2". Los cuadrados (círculos) representan la posición del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

Figura 3.29. Variación del ángulo de apertura de los torbellinos cónicos, definido mediante el parámetro α_c del modelo de Cook, con la altura adimensional de los parapetos, h/H , para cada uno de los parapetos en voladizo ensayados: tipo "W1" y tipo "W2". Los cuadrados (círculos) representan el ángulo de apertura del Torbellino 1 (Torbellino 2). El ángulo de incidencia del flujo respecto al modelo es $\beta = 45^\circ$, y la intensidad de la turbulencia a la altura de la cubierta del modelo es $I_u = 2,5\%$.

3.4. Análisis mediante visualización por termografía infrarroja del efecto de los parapetos, verticales y en voladizo, en el flujo de aire sobre la cubierta del modelo M3D2.

En las figuras 3.30 y 3.33 a 3.37 se muestran las visualizaciones del flujo sobre la cubierta del modelo M3D2 obtenidas mediante termografía infrarroja. El ángulo de incidencia de la corriente del aire respecto del modelo ha sido $\beta = 45^\circ$ en todos los ensayos (véase la figura 3.30). La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, ha sido $I_u = 2,5\%$. Como ya se ha avanzado en el capítulo 2, la distribución de colores corresponde al calor evacuado de la cubierta por la convección forzada por el flujo de aire, siendo el color azul oscuro el correspondiente a una transmisión de calor nula y el color rojo oscuro el correspondiente a una transmisión de calor máxima. Se ha escogido la misma escala para todas las imágenes con lo cual la comparación entre los flujos de calor correspondientes a los distintos casos es directa.

Tal y como exponen en sus trabajos Yamada y otros (1996), y Cook y otros (2002), la transmisión de calor por convección forzada no sólo depende de la velocidad local de aire sino también de su nivel de turbulencia. Por ello, a la hora de comparar unas distribuciones de calor con otras se ha de tener en cuenta que, debido a que los parapetos tienen distinta porosidad, se introducen en el flujo de aire sobre la cubierta distintos niveles de turbulencia en cada caso. Lo cual quiere decir que las comparaciones entre imágenes correspondientes a distintos tipos de parapetos han de ser cualitativas, y no cuantitativas.

Sin parapetos

Figura 3.30. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 sin ningún tipo de parapeto instalado. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

En la imagen correspondiente a la cubierta del modelo sin ningún tipo de parapeto instalado en ella (figura 3.30) se aprecia la existencia en estos ensayos de una clara asimetría. Se puede percibir que el Torbellino 1 está claramente definido y situado en las cercanías del borde de la cubierta. Sin embargo, esto no ocurre con el Torbellino 2, el cual por un lado está situado en una posición angular más alejada del borde de la cubierta, y por otro su acción está mucho más difuminada. El hecho de que este segundo torbellino tenga estas características es debido a que, en la configuración ensayada, el punto de remanso se sitúa en la fachada correspondiente al borde donde se ancla el Torbellino 2. Esto produce dos consecuencias encadenadas, en primer lugar que una mayor cantidad de aire rebordee la arista de la cubierta correspondiente al Torbellino 2 en comparación a la arista correspondiente al Torbellino 1 y, en segundo lugar, y debido a la primera consecuencia, la velocidad tangencial del Torbellino 2, v_θ , aumenta, con lo que da la impresión de que éste colapsa (*vortex breakdown*) y es empujado hacia la bisectriz de la esquina. El colapso implica, atendiendo a la descripción de este fenómeno incluida en el trabajo de Payne y otros (1988), una mayor anchura del torbellino cónico, que explica la razón por la que el Torbellino 2 se sitúa más lejos del borde de la cubierta que el Torbellino 1. Además, el colapso implica también, como es obvio, un aumento del nivel de turbulencia en la zona de influencia del torbellino, por lo que es lógico que en la imagen se observe que en la zona correspondiente al Torbellino 2 la transmisión de calor sea más uniforme y, en conjunto, más alta que en la zona correspondiente al Torbellino 1.

Se han realizado medidas de la velocidad local mediante hilo caliente a lo largo tres líneas rectas, AB, CD y EF, perpendiculares a la corriente incidente (véase la figura 3.31). Las medidas se realizaron con una sonda de hilo caliente cuyo hilo, posicionado

perpendicularmente al plano de la cubierta del modelo de ensayos, ha mantenido su punto medio a una altura de 6 mm sobre la superficie de la mencionada cubierta. Sólo se ha medido la velocidad en el caso de la cubierta sin parapeto alguno.

Figura 3.31. Posición de las líneas AB, CD y EF, en las cuales se ha medido la velocidad sobre la cubierta del modelo M3D2. Las medidas se han realizado a una altura de 6 mm sobre la cubierta. Las cotas están expresadas en milímetros.

En la figura 3.32 se muestran tres gráficas, la primera corresponde a la variación de la velocidad media adimensionalizada, U/U_∞ , medida en las tres líneas definidas en la figura 3.31. En la segunda gráfica se muestra, también en esas líneas, la variación de la intensidad de la turbulencia, $I_U = \sigma_U/U$, donde σ_U es la desviación típica de la medida de la velocidad. Y en la tercera gráfica se muestra la intensidad de luz, IL , visualizada

en esas líneas. Este parámetro es la intensidad extraída de la imagen contenida en la figura 3.30 dividida por su máximo y, como es evidente, es proporcional al calor evacuado por el aire a través de la cubierta.

Como puede observarse en la figura 3.32 el calor evacuado, definido mediante el parámetro IL , correlaciona moderadamente bien con la intensidad de la turbulencia, I_U , parámetro que depende en gran medida de los torbellinos cónicos establecidos sobre la cubierta del modelo. La mencionada correlación es especialmente buena en la parte izquierda de la cubierta (entre $x/l = 0$ y $x/l = 0,4$), correspondiente al Torbellino 1, mientras que en la parte derecha de la cubierta ($x/l > 0,5$), correspondiente al Torbellino 2, la correlación es peor. Aún así, es reseñable que las medidas de velocidad y turbulencia del flujo realizadas mediante hilo caliente captan una mayor anchura del torbellino cónico posicionado en este lado de la cubierta, lo cual coincide con lo visualizado en la figura 3.30 (colapso y mayor anchura del Torbellino 2). Por último, se ha de mencionar que por haberse realizado las medidas de velocidad y turbulencia por una parte, y la visualización del flujo por otra, en dos ensayos distintos (habiéndose desmontado y vuelto a montar el modelo en la cámara de ensayos del túnel), puede haber entre ambos casos pequeñas diferencias en el ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto del modelo que produzcan las diferencias observadas en la captación del Torbellino 2.

Figura 3.32. Variación con la distancia adimensional x/l de la velocidad, U/U_∞ , la intensidad de la turbulencia, I_U , y la intensidad de la luz visualizada, IL , a lo largo de las líneas de la cubierta del modelo M3D2 definidas en la figura 3.31. Los cuadrados representan la línea EF, los círculos la línea CD, y los triángulos la línea AB. El origen de la coordenada x está en los puntos A, C y E de cada una de las respectivas líneas, l es la longitud genérica de las líneas.

En las imágenes correspondientes a la cubierta del modelo de ensayos con parapetos sólidos (tipo “A”) incluidas en la figura 3.33, se observa que la transmisión de calor producida por la presencia de los torbellinos cónicos disminuye respecto a la producida en la cubierta del modelo sin parapetos. Con los parapetos más altos, $h/H = 0,063$, la zona afectada por el Torbellino 1 se ha ensanchado considerablemente respecto a las imágenes correspondientes a la cubierta sin parapetos o con los parapetos de menor altura ($h/H = 0,032$). Esto no puede ser achacado a un mayor nivel de turbulencia ya que la configuración es muy similar entre los tres casos y, dado que la porosidad de los parapetos es nula, no existe ningún elemento que introduzca vorticidad de pequeña escala en el flujo de aire sobre la cubierta del modelo. En cambio, sí es producto del colapso del Torbellino 1 debido a que, al originarse ahora en una arista situada a más altura respecto de la cubierta el torbellino cónico es más grueso, aumentando la relación entre las velocidades tangencial y longitudinal, v_θ/v_z , lo cual, una vez que este cociente rebasa un determinado valor, produce el colapso del torbellino, tal y como se ha indicado en la introducción de esta tesis.

Las imágenes correspondientes a la transmisión de calor en la cubierta del modelo de ensayos con los parapetos porosos (tipos “B”, “C” y “D”), incluidas en las figuras 3.34, 3.35 y 3.36, son muy semejantes entre sí, observándose levemente una mayor transmisión de calor en los parapetos de mayor porosidad (tipo “B”). Esto está de acuerdo con las medidas de presión hechas en el modelo de ensayos M3D1, ya que, como se ha mencionado, estos parapetos son, de entre los parapetos porosos ensayados con el modelo M3D2, los que menos disminuyen la succión provocada por los torbellinos cónicos en la cubierta del modelo. Otro efecto observado, en comparación con las distribuciones de calor captadas sobre la cubierta sin parapetos o con los

parapetos sólidos instalados, es que con los parapetos porosos el efecto creado por los dos torbellinos cónicos es más parecido entre sí, es decir, la porosidad tiende a igualar el calor evacuado por ambos torbellinos. Ello indica la gran importancia que tiene la turbulencia de pequeña escala, introducida gracias a la porosidad de los parapetos, en la transmisión de calor.

La variación, con la altura de los parapetos, de la distribución de calor captada con los parapetos en voladizo (tipo “W1”) dispuestos en la cubierta del modelo de ensayos M3D2, indica, como se observa en la figura 3.37, un comportamiento muy similar al analizado mediante el estudio de la distribución de presión en el modelo de ensayos M3D1. Se observa que para una altura de los parapetos $h/H = 0,032$, el flujo de aire que pasa entre la cubierta y el voladizo produce una alta transmisión de calor por el efecto de la alta convección forzada por el mencionado chorro de aire. También puede observarse que, en comparación con la distribución de calor captada sin parapetos instalados en la cubierta, se modifica la posición de los torbellinos cónicos (más alejados de sus respectivos bordes del tejado) y disminuye el calor evacuado exclusivamente gracias a ellos. Con una mayor altura de los parapetos en voladizo, $h/H = 0,063$, la distribución de calor evacuado muestra la presencia de los dos torbellinos nítidamente, con lo que la acción de los voladizos sobre los torbellinos cónicos se reduce, aunque sí se aprecia que la distribución de calor es mucho más simétrica que la distribución captada en la cubierta sin parapetos instalados.

Tipo "A", $h/H = 0,032$

Tipo "A", $h/H = 0,063$

Figura 3.33. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 con parapetos tipo "A", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

Tipo "B", $h/H = 0,032$

Tipo "B", $h/H = 0,063$

Figura 3.34. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 con parapetos tipo "B", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

Tipo "C", $h/H = 0,032$

Tipo "C", $h/H = 0,063$

Figura 3.35. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 con parapetos tipo "C", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

Tipo "D", $h/H = 0,032$

Tipo "D", $h/H = 0,063$

Figura 3.36. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 con parapetos tipo "D", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

Tipo "W1", $h/H = 0,032$

Tipo "W1", $h/H = 0,063$

Figura 3.37. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos M3D2 con parapetos tipo "W1", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

Tras los resultados descritos queda patente que en la visualización por termografía infrarroja se observan los mismos fenómenos aerodinámicos que los registrados con la medida de los coeficientes de presión. Éste resulta pues un método válido de visualización de flujo en cubiertas de edificios. Por el contrario, establecer un análisis cuantitativo de la distribución de presión en la superficie de un obstáculo basándose en imágenes captadas con termografía infrarroja presenta grandes limitaciones.

Yamada y otros (1996), y Sasaki y otros (1997) han concluido que, mediante este tipo de técnicas, es posible obtener una correlación entre la temperatura de un obstáculo captada mediante termografía infrarroja y una velocidad efectiva, U_e , definida como $U_e = U + gu'$, donde U es la velocidad media local, u' es la desviación típica de la velocidad local, y g un factor de pico que depende de las características locales del flujo. Sin embargo, estos autores advierten de las dificultades para establecer el valor único del factor de pico, incluso por zonas, y de la gran dispersión de los valores hallados de este factor de pico. Para describir el campo de presión en la superficie de un obstáculo a partir de imágenes captadas mediante termografía infrarroja se ha de encarar un problema similar, aunque más complejo. La complejidad añadida viene dada por la necesidad de establecer una correlación entre la mencionada velocidad efectiva, o un parámetro similar dependiente de la velocidad y de la turbulencia locales, y la presión. Esta es la mayor dificultad, a primera vista insalvable, ya que fenómenos aerodinámicos distintos establecidos en la superficie del obstáculo, pueden dar lugar a valores iguales de la velocidad efectiva, mientras que rara vez ocurre eso con la presión local. Por ello, y teniendo en cuenta los distintos fenómenos observados sobre la cubierta de los modelos de ensayos (torbellinos cónicos, colapso de torbellinos, estelas corriente debajo de parapetos porosos, corriente readherida, chorros generados por la presencia de

parapetos en voladizo), que además interactúan entre sí en algunas ocasiones, se ha desestimado seguir profundizando en esta línea de trabajo de relacionar los mapas de calor captados mediante termografía infrarroja y las distribuciones de presión medidas.

CONCLUSIONES.

En esta tesis doctoral se ha estudiado experimentalmente la efectividad de parapetos porosos y en voladizo para reducir la carga aerodinámica en las cubiertas de edificios. Para este fin se han programado sucesivas series de experimentos en el túnel aerodinámico con dos modelos de ensayos de forma semi-cúbica, siendo el primero, de planta 0,32 m x 0,32 m y de altura 0,16 m, el destinado a la medida del coeficiente de presión en su cubierta, y el segundo, de planta 0,3 m x 0,3 m y de altura 0,15 m, el dedicado a la visualización mediante termografía infrarroja de los torbellinos cónicos formados sobre su cubierta. El estudio aerodinámico de los mencionados parapetos (porosos y en voladizo) destinados a disminuir la carga aerodinámica sobre cubiertas constituye una aportación original de esta tesis.

Tras determinar el ángulo de incidencia crítico del modelo respecto al viento, en todos los ensayos posteriores los modelos han sido situados manteniendo esa orientación, esto es, de forma que la corriente incidente coincide con una de las diagonales de la cubierta ($\beta = 45^\circ$). Con esta orientación, la carga aerodinámica en la cubierta del modelo es máxima debido a que los torbellinos cónicos que se forman sobre la mencionada cubierta alcanzan su máxima intensidad. Ciertamente, que la máxima carga aerodinámica se alcance para la orientación $\beta = 45^\circ$ está condicionado por el hecho de tener el modelo de ensayos planta cuadrada, si la planta fuera rectangular en vez de cuadrada, o la cubierta del modelo no fuese plana, la carga aerodinámica máxima se alcanzaría con un ángulo de orientación del modelo respecto del viento distinto (véase el anexo 3). En la campaña de ensayos previos se ha comprobado también que la turbulencia del flujo incidente en el modelo disminuye la succión máxima medida en la

cubierta, aunque no altera la morfología de los torbellinos cónicos, es decir ni la intensidad, ni la posición, ni el grosor de los mismos.

Tras la campaña de ensayos llevada a cabo con los dos modelos de ensayos se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Mediante la colocación de parapetos verticales sólidos, esto es, no porosos, se reduce la succión sobre la cubierta a partir de una determinada altura de los mismos. Estos parapetos producen un desplazamiento de los torbellinos cónicos hacia el interior de la cubierta y, además, elevan el eje de los mismos respecto de la superficie de la cubierta, produciéndose entonces una menor succión sobre la misma y un engrosamiento (o aumento del ángulo de apertura) de los mencionados torbellinos.
- Los parapetos verticales porosos producen, en mayor o menor medida y dependiendo de su porosidad, un efecto de atenuación de la intensidad de los torbellinos cónicos formados sobre una cubierta. Ello implica un efecto siempre beneficioso con respecto al caso de no disponer parapeto alguno en los bordes de la mencionada cubierta. Además, la porosidad de los parapetos es un factor que, dependiendo de su valor, puede disminuir la carga aerodinámica en la cubierta respecto de la carga que se obtiene con parapetos sólidos. Con parapetos de porosidad media, entre $\phi = 0,5$ y $\phi = 0,3$, y altura $h/H = 0,031$ dispuestos en los bordes de la cubierta del modelo de ensayos, se ha registrado una reducción del 26% de la succión máxima medida en la cubierta con respecto a la succión máxima medida sin parapetos, y una reducción del 30% respecto a la succión

máxima medida con parapetos sólidos de igual altura. Siendo la explicación de este comportamiento el hecho de que gracias a la porosidad de los parapetos se produce una estela aguas abajo de los mismos, la cual interacciona con los torbellinos cónicos reduciendo su intensidad. Esta interacción no parece alterar en gran medida ni la posición ni el ángulo de apertura de los torbellinos cónicos.

- Los parapetos en voladizo situados a alturas bajas, hasta $h/H = 0,05$, reducen de forma muy efectiva la carga aerodinámica en una cubierta debida a la acción de los torbellinos cónicos. Para alturas grandes sobre la cubierta el efecto de estos parapetos no es apreciable, ya que los torbellinos cónicos se desarrollan por debajo de los parapetos. Con parapetos en voladizo situados a una altura $h/H = 0,031$, se ha medido una succión máxima en la cubierta del modelo de ensayos que es un 55% más baja que la obtenida sin parapetos, y un 60% más baja que la obtenida con parapetos sólidos de igual altura. Esta reducción de la succión se debe a que se genera un chorro entre el parapeto en voladizo y la cubierta que barre de la misma a los torbellinos cónicos. Este chorro interacciona con los mencionados torbellinos de forma similar, aunque más efectiva, que la estela generada en los parapetos porosos, es decir, reduce la intensidad de los torbellinos, modifica su posición alejándolos del borde de la cubierta y aumenta su ángulo de apertura. El hecho de que los parapetos en voladizo sobresalgan de la cubierta intensifica la atenuación de la succión producida por los torbellinos cónicos, ya que aumenta el caudal del chorro que pasa entre el voladizo y la cubierta. Se ha comprobado también que esta tipo de dispositivos dejan de ser efectivos para alturas relativamente grandes ($h/H \approx 0,1$), ya que permiten el desarrollo de los torbellinos cónicos debajo de su

superficie, es decir, los torbellinos se forman en el borde de la cubierta y evolucionan hacia el interior de la misma por debajo de los parapetos. En este caso se alcanzan en la cubierta niveles de succión del mismo orden que el existente cuando no se han dispuesto los parapetos en voladizo.

Los parapetos en voladizo representan una opción muy a tener en cuenta si se pretende reducir las cargas máximas del viento en una cubierta. Su efecto beneficioso ha sido comprobado en cubiertas con formas alejadas de las incluidas en la normativa vigente, véase el anexo 3. Se ha de resaltar, sin embargo, que este tipo de dispositivos ranurados no parece modificar sustancialmente la succión en otras partes de la superficie de un edificio de baja altura que no sean la cubierta como pueden ser las fachadas. Ello es debido a que la efectividad de los parapetos en voladizo está condicionada a la existencia de torbellinos cónicos con los que interactuar y a los cuales amortiguar, habiéndose comprobado, además, que los mencionados torbellinos cónicos no se forman en las fachadas de edificios de altura media-baja (véase el anexo 2).

También se ha logrado visualizar los torbellinos cónicos empleando termografía infrarroja, obteniéndose resultados coherentes con las medidas del coeficiente de presión realizadas. Con esta técnica se ha puesto a punto un método simple y relativamente económico de visualización basado en el calor evacuado por el flujo a través de la superficie de un obstáculo (aunque este análisis ha quedado circunscrito a su faceta cualitativa únicamente).

La posibilidad de establecer una correlación entre los mapas del coeficiente de presión y de temperatura (o calor radiado) en la superficie de un obstáculo barrido por un flujo de

aire parece, cuando menos, incierta a corto plazo. Se han realizado esfuerzos por algunos autores (Yamada y otros, 1996; Sasaki y otros, 1997) para correlacionar la temperatura con las características locales de la velocidad (media y desviación típica), aunque la correlación lograda es poco fina y depende de las características del flujo (desprendido, turbillónario, etc...). Sin embargo, la correlación entre temperatura (o calor radiado) y presión está dificultada, cuando no imposibilitada, por el hecho de que dos fenómenos aerodinámicos distintos que se producen en la superficie de un obstáculo, pueden generar, cada uno por lado, una velocidad y un nivel de turbulencia locales que impongan la misma transmisión de calor en la superficie del mencionado obstáculo, lo que produce, cuando menos, una gran dificultad para interpretar los resultados. Por otra parte, se puede intentar una calibración empírica para correlacionar mapas de temperatura y presión en el caso de un fenómeno aerodinámico aislado, por ejemplo, aceleraciones de corriente debidas a un estrechamiento. Sin embargo, el hecho de que existan multitud de fenómenos distintos y, además, cuya posible combinación ha de tenerse en cuenta por alterar las velocidades y niveles de turbulencia (por ejemplo, la interacción entre la estela generada en los parapetos porosos y los torbellinos cónicos), hace muy dudosa la posibilidad de predecir las cargas aerodinámicas en la superficie de un edificio, a partir de la visualización con termografía infrarroja, con un grado de fiabilidad adecuado, o similar, al que se alcanza hoy día mediante la medida directa de los coeficientes de presión en túnel aerodinámico.

Como propuesta para continuar esta tesis se proponen las siguientes líneas:

- Estudio del efecto de la porosidad en parapetos en voladizo. Posibles mejoras de la reducción de la succión producida por los torbellinos cónicos creando una

estela turbillonaria corriente abajo a partir de la superficie del voladizo. Análisis combinado de los distintos factores, esto es, la porosidad, anchura del voladizo y su altura sobre la cubierta, para descubrir alguna relación crítica que minimice la acción de los torbellinos cónicos.

- Estudio del efecto de la variación del ángulo de ataque de los parapetos en voladizo. Dependiendo del ángulo de ataque del voladizo, se puede contraer o expandir, más o menos, el chorro de aire que pasa entre el mencionado voladizo y la cubierta, a fin de dilucidar cuál es la mejor situación a la hora de reducir la succión producida por los torbellinos cónicos.
- Estudio de la altura crítica de los parapetos en voladizo para la cual dejan de ser efectivos en la reducción de la succión provocada por los torbellinos cónicos. Análisis de la influencia de la esbeltez de los edificios, entendida como la relación entre la altura y la dimensión longitudinal, en la altura crítica de los parapetos en voladizo.

REFERENCIAS.

1. ASCE 7-98, 2000, Minimum design loads for buildings and other structures, Revision of ANSI/ASCE 7-95, American Society for Civil Engineers.
2. W. Bächlin, E. J. Plate, A. Kamarga, 1983, Influence of the ratio of building height to boundary layer thickness and of the approach flow velocity profile on the roof pressure distribution of cubical buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 11, pp. 63-74.
3. C. A. Balaras, A. A. Argiriou, 2002, Infrared thermography for building diagnostics, *Energy and Buildings* 34, pp. 171-183.
4. D. Banks, R. N. Meroney, P. P. Sarkar, Z. Zhao, F. Wu, 2000, Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84, pp. 65-85.
5. D. Banks, R. N. Meroney, 2001, A model of roof-top surface pressures produced by conical vortices: Model development, *Wind and Structures, An International Journal* Vol. 4 N° 3.
6. A. Baskaran, T. Stathopoulos, 1988, Roof corner wind loads and parapet configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 29, pp. 79-88.
7. I. P. Castro, A. G. Robins, 1977, The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, *Journal of fluid Mechanics* 79, pp. 307-335.
8. N. J. Cook, 1982, Calibration of the quasi-static and peak factor approaches to the assessment of wind loads against the method of Cook and Mayne, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 10, pp. 315-341.

9. N. J. Cook, 1985, The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification, Butterwords, London.
10. N. J. Cook, 1990, The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures, Butterwords, London.
11. N. J. Cook, 1999, Discussion on "Enhanced scour tests to evaluate pedestrian level winds" by F. Livesey, D. Morrish, M. Mikitiuk, N. Isyumov and on "A visual technique for the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings using infrared thermography" by M. Yamada, Y. Uematsu, R. Sasaki, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 79, pp., 307-309.
12. N. J. Cook, 2002, Discussion on "Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners" by F. Wu, P.P. Sarkar, K. C. Metha, Z. Zhao, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, pp., 127-130.
13. N. J. Cook, P. Chan, D. Wu, M. A. Holder, 2002, Towards quantitative visualisation of transient surface flow on building models using infrared thermography, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, pp., 663-673.
14. C. P. Crosby, E.H. Mathews, J. P. Du Plessis, 1990, The numerical prediction of air flow through and around permeable windbreaks and buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 35, pp. 213-224.
15. Q. Deng, I. Gursul, 1996, Effect of leading-edge flaps on vortices and vortex breakdown, *Journal of Aircraft*, vol. 33 n° 6 November-December 1996 1079-1086.
16. C. Dyrbye, S. O. Hansen, 1997, Wind loads on structures, John Wiley & Sons, Inc., New York.

17. Eurocódigo 1, 1998, Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento. UNE-ENV 1991-2-4, AENOR, Madrid.
18. S. J. Gumley, 1983, A detailed design method for pneumatic tubing systems, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 13, pp. 441-452.
19. F. L. Haan Jr., A. Kareem, A. A. Szewczyk, 1998, The effects of turbulence on the pressure distribution around a rectangular prism, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77-78, pp. 381-392.
20. R. Hoxey, A. Robertson, L. Short, 1998, The role of corner vortices in the design of structures, *Structural Engineering International* Vol. 1/98, pp. 50-55.
21. H. P. A. H. Irwin, K. R. Cooper, R. Girard, 1979, Correction of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 5, pp. 93-107.
22. F. T. Johnson, E. N. Tinoco, P. Lu, M. A. Epton, 1980, Three-dimensional flow over wings with leading-edge vortex separation, *AIAA Journal* vol. 18 n° 4 April 1980 367-380.
23. H. Kawai, G. Nishimura, 1996, Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 60, pp. 211-225.
24. H. Kawai, 1997, Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulent flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71, pp. 579-588.
25. H. Kawai, 2002, Local peak pressure and conical vortex on building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, pp. 251-263.

26. R.J. Kind, 1986, Worst Suctions near edges of flat rooftops on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 25, pp. 31-47.
27. R.J. Kind, 1988, Worst Suctions near edges of flat rooftops with parapets, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 31, pp. 251-264.
28. C. Kramer, H. J. Gerhardt, S. Scherrer, 1979, Wind pressure on block-type buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 4, pp., 229-242.
29. C. Kramer, H. J. Gerhardt, 1991, Wind pressures on roofs of very low and very large industrial buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 38, pp. 285-295.
30. K. S. Kumar, T. Stathopoulos, 1998, Power spectra of wind pressures on low building roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, pp. 665-674.
31. C. W. Letchford, R. Marwood, 1997, On the influence of v and w component turbulence on roof pressures beneath conical vortices, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71, pp. 567-577.
32. Q. S. Li, W. H. Melbourne, 1995, An experimental investigation of the effects of free-stream turbulence on streamwise surface pressures in separated and reattaching flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 54-55, pp. 313-323.
33. J.-X. Lin, D. Surry, H. W. Tieleman, 1995, The distribution of pressure near roof corners of flat roof buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 56, pp. 235-265.

34. L. De Luca, G. Guglieri, G. Cardone, G. M. Carlomagno, 1995, Experimental analysis of surface flow on a delta wing by infrared thermography, *AAIA Journal*, vol. 33 nº 8, August 1995.
35. G. Lythe, D. Surry, 1983, Wind loading of flat roofs with and without parapets, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 13, pp. 75-94.
36. E. R. Meinders, K. Hanjalic, 1999, Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20, pp. 255-267.
37. J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, S. Pindado, 2001, *Aerodinámica Civil. Cargas de viento en edificaciones.*, McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid.
38. J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales, 2001, Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid IDR/IF 0116, Madrid.
39. J. Meseger, J. M. Perales, S. Pindado, A. Sanz, N. Bezdenejnykh, G. Tevar, 2002, Estudio de barreras cortavientos y otras medidas atenuantes de las emisiones y de la dispersión de polvo en los puertos, Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid IDR/IF 0291, Madrid.
40. J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, S. Pindado, 2002, Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil, *Revista de Obras Públicas* 3.419, Año 149, Marzo 2002.
41. K. Michiels, S. Pindado, 1994, Flow visualization experiments in water tunnel W. T. 1, Stagiaire Report 1994-43, Von Karman Institute for Fluid Dynamics.

42. A. M. Mitchell, J. Détery, 2001, Research into vortex breakdown control, *Progress in Aerospace Sciences* 37, pp. 385-418.
43. Y. Okuda, J. Katsura, S. Kawamura, 1997, Local severe suction on the side of a prism model on a field, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 72, pp. 23-32.
44. C.-W. Park, S.-J. Lee, 2000, The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84, pp., 237-244.
45. F. M. Payne, T. T. Ng, R. C. Nelson, L.B. Schiff, 1988, Visualization and wake surveys of vortices flow over a delta wing, *AAIA Journal*, vol. 26 n° 2 February 1988 137-143.
46. J. A. Peterka, N. Hosoya, S. Dodge, L. Cochran, J. E. Cermak, 1998, Area-average peak pressures in a gable roof vortex region, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77-78, pp. 205-215.
47. E. J. Plate, H. Kiefer, 2001, Wind loads in urban areas, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp. 1233-1256.
48. P. Saathoff, W. H. Melbourne, 1999, Effects of the freestream turbulence on streamwise pressure measured on a square-section cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 79, pp. 61-78.
49. R. Sasaki, Y. Uematsu, M. Yamada, H. Saeki, 1997, Application of infrared thermography and a knowledge-based system to the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67&68, pp. 873-883.

50. J. H. B. Smith, 1984, Theoretical modelling of three-dimensional vortex flows in aerodynamics, *Aeronautical Journal*, April 1984 101-116.
51. P. K. Stansby, L. R. Wooton, 1975, The value of wind research to civil engineering, *Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures*, Heathrow 1975, Edited by Dr. Keith J. Eaton, Cambridge University Press.
52. T. Stathopoulos, A. Baskaran, P.A. Goh, 1990, Full-scale measurements of wind pressures on flat roof corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 36, pp. 1063-1072.
53. T. Stathopoulos, R. Marathe, H. Wu, 1999, Mean wind pressures on flat roof corners affected by parapets: field and wind tunnel studies, *Engineering Structures* 21, pp. 629-638.
54. J. T. Templin, S. Raimondo, 1986, Experimental evaluation of test section boundary interference effects in road vehicle tests in wind tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 22, pp. 129-148.
55. H. W. Tieleman, 1996, Full/model-scale comparison of pressures on the roof of the TTU experimental building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 65, pp. 133-142.
56. H. W. Tieleman, D. Surry, K. C. Metha, 1996, Full/model-scale comparison of surface pressures on the Texas Tech experimental building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 61, pp. 1-23.
57. K. D. Visser, R. C. Nelson, 1993, Measurements of circulation and vorticity in the leading-edge vortex of a delta wing, *AAIA Journal* vol. 31 n° 1 January 1993 104-111.

58. C. W. Williams, C. J. Baker, 1997, Appraisal of a semi-empirical model for the pressure field beneath roof corner vortices, *Journal of Fluids and Structures* 11, pp. 767-792.
59. F. Wu, P.P. Sarkar, K. C. Metha, Z. Zhao, 2001, Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp. 403-420.
60. M. Yamada, Y. Uematsu, R. Sasaki, 1996, A visual technique for the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings by using infrared thermography, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 65, pp. 261-271.

ANEXO 1. Ajuste del modelo de Cook al campo de medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1.

En este anexo se detalla el proceso de ajuste de la formula de Cook a las medidas del coeficiente de presión realizadas en la cubierta del modelo de ensayos M3D1, estando éste situado a un ángulo de incidencia del viento $\beta = 45^\circ$, y sin ningún tipo de parapeto o dispositivo adicional instalado en los bordes de la cubierta del modelo, véase la figura 2.4 (obviamente, el procedimiento es idéntico si hay parapetos de algún tipo).

La expresión de la fórmula de Cook que se pretende ajustar es:

$$c_p = c_{p0} + \frac{\Delta c_p + G \ln(r/H)}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right)^2}, \quad (A1.1)$$

donde c_{p0} , Δc_p , G , α_0 y α_c son parámetros a ajustar y H es la altura del modelo de ensayos. Puede observarse que la expresión que se ha escogido es la que, según Cook, corresponde a la zona de crecimiento del torbellino cónico.

En la figura A1.1 se muestra la distribución del coeficiente de presión medida sobre la cubierta del modelo M3D1, cuando sobre éste incide una corriente de aire con una orientación $\beta = 45^\circ$. Pueden observarse sobre la cubierta del modelo dos zonas de forma triangular que demarcan áreas en donde la succión es particularmente intensa. Estas zonas de baja presión están creadas por los dos torbellinos cónicos que se generan sobre la cubierta, los cuales serán denominados “Torbellino1” y “Torbellino 2” según estén situados a la izquierda o derecha de la dirección del viento incidente.

Figura A1.1. Distribución medida experimentalmente del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3D1 con un ángulo de incidencia del flujo $\beta = 45^\circ$. La distribución es una interpolación realizada mediante el programa Matlab 6.1 a partir de las medidas realizadas en puntos discretos. En la figura se puede apreciar la posición de cada uno de los dos torbellinos cónicos, los llamados Torbellino 1 y Torbellino 2, que aparecen en esta configuración de flujo. La zona coloreada es aquella en la que se han distribuido tomas de presión en la cubierta del modelo. El contorno negro marca los límites de la cubierta.

Si se observa la fórmula de Cook, puede comprobarse que la expresión (A1.1) tiene un máximo cuando la coordenada α tiende al valor α_0 , es decir, este ángulo α_0 marca la posición angular del torbellino cónico (α_0 es el ángulo que forma la proyección del eje del torbellino sobre la cubierta con el borde de la misma). En lo que sigue, la fórmula de Cook se ha escrito en la forma:

$$c_p = a(\alpha) + b(\alpha) \ln(r/H), \quad (\text{A1.2})$$

donde:

$$a(\alpha) = c_{p0} + \frac{\Delta c_p}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right)^2}, \quad (\text{A1.3})$$

$$b(\alpha) = \frac{G}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} \right)^2}. \quad (\text{A1.4})$$

Como las tomas de presión dispuestas en la cubierta del modelo forman una rejilla de celdas cuadradas, en un primer paso se ha interpolado y se ha hallado, a partir de las medidas hechas, el coeficiente de presión a lo largo de las rectas $\alpha_i = 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ, 13^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ y 45° , para cada uno de los torbellinos presentes en la configuración medida. En la figura A1.2 se representa el coeficiente de presión, c_p , en función del logaritmo neperiano de la coordenada r adimensionalizada con la altura del modelo H , $\ln(r/H)$, a lo largo de distintas rectas $\alpha = \text{cte}$. En esta figura se observa que

las curvas se ajustan bastante bien cada una a una recta de regresión, y que la pendiente parece tener un máximo para un ángulo dado. Williams y Baker fijan α_0 donde la pendiente es máxima, no obstante, aquí se ha optado por otro método para hallar α_0 , según se explica en los párrafos siguientes.

Figura A1.2. Coeficiente de presión, c_p , medido sobre líneas $\alpha_i = 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 11^\circ, 13^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 20^\circ$ y 25° , en función del logaritmo neperiano de la distancia al origen de coordenadas adimensionalizada con la altura del paralelepípedo, $\ln(r/H)$. Los símbolos negros (círculos, cuadrados, triángulos, etc...) representan medidas en la zona afectada por el Torbellino 1, los símbolos rojos representan medidas en la zona afectada por el Torbellino 2.

Las constantes de las rectas de regresión $c_p|_{\alpha=\alpha_i} = a_i + b_i \ln(r/H)$ que se ajustan para cada ángulo a las curvas de las gráficas de la anterior figura son los valores de los parámetros $a(\alpha)$ y $b(\alpha)$ de la expresión (A1.2). En la figura A1.3 se ha representado la variación de estos parámetros con α . Se observa en esta figura que ambas curvas presentan un extremo (un mínimo correspondiente a $a(\alpha)$ y un máximo correspondiente a $b(\alpha)$), estando mejor definido el correspondiente a la curva que representa los valores de la constante a . Es en este mínimo donde se establece el valor de α_0 y también de G , asignando a esta última constante el valor de la curva $b(\alpha)$ correspondiente a $\alpha = \alpha_0$. William y Baker, por el contrario, fijan el valor α_0 en el punto donde la curva $b(\alpha)$ alcanza su máximo. Teniendo en cuenta que los extremos de ambas curvas, $a(\alpha)$ y $b(\alpha)$, prácticamente se localizan en el mismo punto no parece tener gran relevancia escoger una u otra metodología para fijar α_0 . Si se ha optado por alterar el procedimiento descrito por Williams y Baker es debido a la mencionada mejor definición del extremo de la curva $a(\alpha)$, y además, porque dado que el parámetro a representa los valores del coeficiente de presión a lo largo de una línea $r = H$, al escoger el valor de α_0 que marca el extremo de la curva $a(\alpha)$ se está fijando directamente un extremo de la expresión (A1.1).

Para establecer el valor del parámetro α_c se ha adoptado el siguiente criterio, α_c es la diferencia entre α_0 y el ángulo α_{05} , $\alpha_c = |\alpha_{05} - \alpha_0|$. Siendo el ángulo α_{05} el ángulo para el cual $a(\alpha)$ alcanza un valor igual a la semisuma entre sus valores mínimo y máximo,

esto es, $a_{05} = \frac{a_{\min} + a_{\max}}{2}$ (véase la figura A1.3).

Figura A1.3. Variación con el ángulo α para ambos torbellinos, de las constantes, a y b de las rectas de ajuste $c_p|_{\alpha=\alpha_i}$. En la gráfica correspondiente al Torbellino 1 se indican los valores de las constantes G (círculo negro), α_0 y α_{05} (cuadrados negros). Obsérvese que el valor de la constante α_{05} se escoge en el punto intermedio entre el mínimo y el máximo de la constante a , valores cuya diferencia se indica en la gráfica mediante el parámetro $\delta = |a_{\min} - a_{\max}|$.

Para hallar los valores de los parámetros c_{p0} y Δc_p se ha de recurrir a otro ajuste. Sea el nuevo parámetro:

$$\lambda = \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha - \alpha_o}{\alpha_c} \right)^2}. \quad (\text{A1.5})$$

La constante a de las rectas de regresión $c_p|_{\alpha=\alpha_i}$ tiene, en función del parámetro λ , la siguiente expresión lineal:

$$a(\lambda) = c_{p0} + \Delta c_p \lambda. \quad (\text{A1.6})$$

Entonces, si se representan los valores de a en función del nuevo parámetro λ y se ajusta una recta de regresión, la pendiente de ésta marca el valor de Δc_p , y el término independiente el valor de c_{p0} , con lo que ya se obtienen todos los parámetros que permiten el ajuste de la fórmula de Cook a los valores del coeficiente de presión medidos experimentalmente. En la figura A1.4 se muestra este ajuste a los datos correspondientes al Torbellino 1 y al Torbellino 2.

Figura A1.4. Variación de la constante a , término independiente de las rectas de regresión $c_p|_{\alpha=\alpha_i}$, con λ . Las líneas marcan el ajuste lineal de los datos.

Con el método descrito y partiendo de los valores experimentales que se muestran en la figura A1.1 se ha llegado a las siguientes expresiones para los Torbellinos 1 y 2:

Torbellino 1:

$$c_p(\alpha, r) = -0,38 + \frac{1,64 \ln(r/H) - 1,46}{1 + \left(\frac{\alpha - 11}{7,8}\right)^2}. \quad (\text{A1.7})$$

Torbellino 2:

$$c_p(\alpha, r) = -0,35 + \frac{1,67 \ln(r/H) - 1,89}{1 + \left(\frac{\alpha - 9}{7,7}\right)^2}. \quad (\text{A1.8})$$

En la figura A1.5 se muestra la distribución del coeficiente de presión que proporcionan ambas expresiones. Puede observarse una gran semejanza con las medidas experimentales de la figura A1.1. La expresión logarítmica proporciona una descripción bastante exacta de la distribución del coeficiente de presión, especialmente para aquellas zonas cuya coordenada angular α es mayor que el ángulo que marca la posición del torbellino cónico, α_0 . Para ángulos menores que α_0 , es decir, comprendidos entre la posición angular del torbellino y el borde de la cubierta, la expresión logarítmica no ajusta exactamente, ya que no tiene en cuenta la succión que se produce por la aceleración local que sufre la corriente al cambiar bruscamente de dirección en el borde

del tejado. Ello hace que entre la posición angular del torbellino y el borde del tejado el modelo semiempírico de Cook minore la succión respecto a las medidas reales. No obstante, teniendo en cuenta diversas medidas experimentales de presión en cilindros cuadrados y rectangulares (Castro y Robins, 1977; Saathoff y Melbourne, 1999; Li y Melbourne, 1995; Haan y otros, 1998), se puede afirmar que este efecto de succión producido por el borde de la cubierta no excede el valor $-c_p = 1,5$, de manera que, en el caso que nos ocupa, parece razonable decir que la succión que excede un valor $-c_p = 2$ es debida únicamente al efecto del torbellino cónico.

Figura A1.5. Distribución de presión resultante de ajustar el modelo semiempírico de Cook a los dos torbellinos correspondientes a las medidas experimentales representadas en la figura A1.1.

Q. Now, you're going to tell me that the
evidence that you've just described is
evidence that the defendant was
driving the vehicle at the time of the
accident, is that correct?
A. Yes.
Q. And that's the only evidence that
you have that the defendant was
driving the vehicle at the time of the
accident?
A. Yes.
Q. Now, you're going to tell me that
the evidence that you've just described
is evidence that the defendant was
driving the vehicle at the time of the
accident, is that correct?
A. Yes.
Q. And that's the only evidence that
you have that the defendant was
driving the vehicle at the time of the
accident?
A. Yes.

ANEXO 2. Estudio experimental del coeficiente de presión en la esquina de la fachada de un edificio de forma semi-cúbica.

En este anexo se presentan los resultados del estudio de las cargas aerodinámicas en fachadas de edificios. Este estudio está destinado a conocer de una forma más precisa la carga aerodinámica en las esquinas de las fachadas, las cuales son a priori las zonas de las mismas susceptibles de estar más solicitadas por la acción del viento. Además, se pretende analizar qué fenómenos aerodinámicos son los responsables de estas cargas y, por último, se estudia también la efectividad de una serie de dispositivos destinados a reducir las mencionadas cargas aerodinámicas.

Según la información suministrada en el Eurocódigo 1 las cargas aerodinámicas más intensas en la fachada de un edificio de planta rectangular se producen en las proximidades de las esquinas. En el Eurocódigo 1 se dividen las fachadas de este tipo de edificios en diversas zonas (A, B, C, D y E, véase la figura A2.1), dispuestas según la dirección del viento, y se asigna a la cara exterior de cada una dos coeficientes de presión, $c_{pe,10}$ y $c_{pe,1}$ (véase la tabla A2.1). El primero de estos coeficientes, $c_{pe,10}$, se ha de aplicar si la zona en cuestión tiene un área mayor de 10 m^2 , y el segundo, $c_{pe,1}$, si su área es menor de 1 m^2 . Si el área de la zona está entre 1 m^2 y 10 m^2 se ha de establecer una interpolación logarítmica entre ambos coeficientes.

Figura A2.1. Esquema de las zonas, según el Eurocódigo 1 (1998), en que se dividen las fachadas de un edificio de planta rectangular (A, B, C, D y E). Nótese que la dirección del viento ha de estar contenida en un abanico de 90° centrado en la fachada D.

Tabla A2.1. Coeficientes de presión externa en fachadas de edificios de planta rectangular, según el Eurocódigo 1 (véase la figura A2.1).

Zona	A		B		C		D		E	
d/h	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≤ 1	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,8	+1,0	-0,3	
≥ 4	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,6	+1,0	-0,3	

Para llevar a cabo el trabajo experimental se ha construido un modelo de ensayos de forma semi-cúbica, de base cuadrada de lado 0,36 m y altura 0,18 m. Este modelo ha

sido instrumentado con 40 tomas de presión en las proximidades de una de sus esquinas, 20 en cada fachada (véase la figura A2.2). El modelo de ensayos, una vez construido, ha sido instalado en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM), en una de las plataformas giratorias que permiten controlar el ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto al modelo, véase la figura A2.3 (el ángulo de incidencia β está indicado en la figura A2.2).

Se realizó una primera serie de medidas barriendo los ángulos, $\beta = -45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 42^\circ, 44^\circ, 45^\circ, 46^\circ, 48^\circ$ y 50° . Como puede observarse se ha cubierto exhaustivamente el intervalo comprendido entre -45° y 50° . En la figura A2.4 se muestran los coeficientes de presión mínimos medidos en esta serie de ensayos. Se ha obtenido un coeficiente de presión mínimo $c_{p \min} = -1,33$ en la fachada AB (véase la figura A2.2), para un ángulo de guiñada del edificio respecto al viento $\beta = 20^\circ$. El valor del coeficiente de presión mínimo medido se mantiene en torno a $c_{p \min} = -1,3$ para ángulos de guiñada comprendidos entre $\beta = 12^\circ$ y $\beta = 20^\circ$. Este resultado coincide con la información incluida en el Eurocódigo 1 (véase la tabla A2.1), para el peor caso de carga aerodinámica en las proximidades de una esquina, esto es, $c_{pe,1} = -1,3$.

Figura A2.2. Dibujo esquemático del modelo de ensayos. Las cotas están expresadas en milímetros.

Figura A2.3. Modelo de ensayos posicionado en una de las plataformas giratorias de la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9.

Figura A2.4. Variación con el ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto al modelo de ensayos, β , de los coeficientes de presión mínimos, $c_p \min$, medidos en la esquina "B" del modelo. Los cuadrados representan el coeficiente mínimo medido en la fachada AB y los círculos el coeficiente mínimo medido en la fachada BC.

En la figura A2.5 se muestra la variación del coeficiente de presión máximo, $c_{p \max}$, medido en las fachadas AB y BC del modelo de ensayos. Se observa que se capta perfectamente el punto de remanso, $c_{p \max} = 1$, en la parte anterior del modelo. Se ha observado también que con un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 45^\circ$ el punto de remanso se sitúa en la fachada AB, produciéndose el salto de este punto de una fachada a otra para un ángulo en torno a $\beta = 42^\circ$.

En las figuras A2.6-A2.9 se muestran las distribuciones del coeficiente de presión, c_p , en las zonas de las fachadas AB y BC del modelo que contienen las tomas de presión, para los ángulos de incidencia del viento $\beta = -15^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ y 40° . La succión máxima medida en las fachadas del modelo es significativamente menor a los valores característicos que pueden llegar a medirse en la cubierta (por ejemplo, $-c_p = 2,5$, Eurocódigo 1), siendo estos últimos producto de la existencia de torbellinos cónicos en la cubierta. En figuras A2.6-A2.9 no se observa la formación de torbellino cónico alguno en las proximidades de la esquina instrumentada, por lo que no es de extrañar que los valores máximos registrados de la succión sean inferiores a los recomendados en el Eurocódigo 1 para el entorno cercano a las esquinas de la cubierta (o medidos en otros experimentos, véase el capítulo 3).

Figura A2.5. Variación con el ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto al modelo de ensayos, β , de los coeficientes de presión máximos, $C_{p \max}$, medidos en la esquina "B" del modelo. Los cuadrados representan el coeficiente máximo medido en la fachada AB y los círculos el coeficiente máximo medido en la fachada BC.

Figura A2.6. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = -15^\circ$.

Figura A2.7. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 0^\circ$.

Figura A2.8. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 20^\circ$.

Figura A2.9. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 40^\circ$.

Con el propósito de reducir la carga aerodinámica medida en la esquina del modelo de ensayos, se han realizado más series de experimentos situando dispositivos adicionales en la esquina "B" del modelo, véanse las figuras A2.10 y A2.11. Los dispositivos D1 y D2 son un perfil cuya sección es una escuadra con brazos de 7 mm de largo y 2 mm de espesor. El dispositivo D1 está separado 2 mm de las fachadas del modelo de ensayos, y el dispositivo D2 está separado 4 mm. El dispositivo D3 es un perfil igual al de los dispositivos D1 y D2 salvo que está girado 180° con respecto a éstos, y situado tocando la esquina del modelo. El dispositivo D4 está fabricado con un perfil cuya sección es 7 mm por 2 mm. El dispositivo D5 ha sido fabricado con una varilla de acero de diámetro 4 mm y está separada 4 mm de la esquina del modelo, siendo equidistante a ambas fachadas.

En las gráficas de la figura A2.12 se puede observar la variación con el ángulo de incidencia de la corriente, β , de los coeficientes de presión mínimos, $c_{p \text{ min}}$, medidos en las fachadas del modelo de ensayos con los distintos dispositivos instalados en la esquina "B". En la tabla A2.2 se incluyen, en función del dispositivo ensayado, los valores de los coeficientes de presión mínimos medidos, $c_{p \text{ min}}$, y los coeficientes de presión promediados, $c_{p \text{ prom}}$, en el área de medida de la esquina (fachada AB) en que se produce la máxima succión para el ángulo crítico, β_{crit} , al que se alcanzan los coeficientes de presión mínimos. Los valores de esta orientación crítica en cada caso son: $\beta_{\text{crit}} = 5^\circ$ con los dispositivos D1 y D2, $\beta_{\text{crit}} = 10^\circ$ con los dispositivos D3 y D5, y $\beta_{\text{crit}} = 15^\circ$ con el dispositivo D4.

Figura A2.10. Vista en planta de los dispositivos posicionados a lo largo de la esquina del modelo situada más a barlovento. Las cotas están expresadas en milímetros.

Figura A2.11. Imagen del dispositivo D2 montado en la esquina "B" del modelo de ensayos.

Figura A2.12. Coeficientes de presión mínimos medidos en la esquina del modelo con los distintos dispositivos ensayados. Los cuadrados representan el coeficiente mínimo medido en la fachada AB y los círculos el coeficiente mínimo medido en la fachada BC.

Tabla A2.2. Coeficientes de presión mínimos medidos, $c_{p \text{ min}}$, y coeficientes de presión promediados, $c_{p \text{ prom}}$, en la fachada AB para cada orientación crítica del viento, β_{crit} , en función del dispositivo instalado en la esquina.

	β_{crit}	$c_{p \text{ min}}$	$c_{p \text{ prom}}$
Sin dispositivo	20°	-1,33	-0,92
D1	5°	-1,4	-1,12
D2	5°	-1,14	-0,93
D3	10°	-1,25	-1,03
D4	15°	-1,22	-0,95
D5	10°	-1,26	-1,02

Se observa una disminución de la succión máxima medida que varía entre un 5% y un 15%, siendo este último valor correspondiente al dispositivo D2. Ello es debido a la mayor distancia que existe entre el dispositivo D2 y las fachadas. Aunque la reducción de la succión máxima gracias a los dispositivos ensayados pueda parecer importante, y una reducción de la carga del 15% siempre lo es desde el punto de vista estructural, esta información ha de tratarse con una cierta precaución, ya que a la vista del coeficiente de presión promediado en la zona de medida, $c_{p \text{ prom}}$, la carga aerodinámica global en el área de medida no sólo no se reduce sino que puede aumentar ligeramente con respecto a la carga medida sin dispositivo alguno colocado en la esquina del modelo de ensayos (véase la figura A2.13).

En las figuras A2.14-A2.18 se muestran las distribuciones del coeficiente de presión, c_p , medidas en las fachadas que conforman la esquina B del modelo de ensayos, con los cinco dispositivos propuestos para reducir la carga aerodinámica. No se observan remarcables diferencias entre estas distribuciones de presión y la medida en el peor caso de carga aerodinámica en la fachada AB sin ningún dispositivo colocado en la esquina del modelo (figura A2.8). Tampoco, en ninguno de los casos, se ha observado la formación de torbellinos cónicos en las fachadas del modelo de ensayos. Los ángulos críticos se localizan en todos los casos ensayados entre $\beta = 5^\circ$ y $\beta = 20^\circ$, en este intervalo el flujo se desprende en la esquina con lo que en parte de la fachada AB, sino toda, la corriente está desprendida. La conclusión que se deriva de este análisis es que al introducir un elemento adicional como los dispositivos propuestos, no se modifica sustancialmente esta configuración fluida, de desprendimiento de tipo bidimensional.

Figura A2.13. Variación de los coeficientes de succión promediados en el área de medida de la fachada AB del modelo de ensayos, $-C_{p \text{ prom}}$, con el ángulo de incidencia de la corriente de aire respecto al modelo, β . Los cuadrados de contorno negro representan la fachada sin dispositivo alguno en la esquina "B". Los símbolos de contorno rojo corresponden a la fachada con los distintos dispositivos: D1 (cuadrados), D2 (triángulos), D3 (rombos), D4 (círculos) y D5 (cruces).

Figura A2.14. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos con el dispositivo D1 instalado. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 5^\circ$.

Figura A2.15. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos con el dispositivo D2 instalado. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 5^\circ$.

Figura A2.16. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos con el dispositivo D3 instalado. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 10^\circ$.

Figura A2.17. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos con el dispositivo D4 instalado. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 15^\circ$.

Figura A2.18. Distribución del coeficiente de presión, c_p , en ambas fachadas de la esquina "B" del modelo de ensayos con el dispositivo D5 instalado. El ángulo de incidencia de la corriente de aire es $\beta = 10^\circ$.

Aunque con algunos de los dispositivos ensayados se haya reducido la succión máxima medida en la fachada AB, esta disminución no es comparable a la que se logra en la cubierta con parapetos en voladizo (equivalentes a los dispositivos D1 y D2), situados en sus bordes, véase el capítulo 3. Este es un hecho que puede asociarse a las diferencias del flujo de aire en los entornos respectivos de las esquinas de las fachadas y de los bordes de las cubiertas. En este último caso, los parapetos en voladizo afectan seriamente a los torbellinos cónicos, responsables de la alta succión que aparece en las cubiertas a ciertos ángulos de incidencia del viento, lo que no ocurre en las fachadas, en donde la succión es producto de un desprendimiento de la corriente de tipo bidimensional.

Este contraste en la eficacia de este tipo de dispositivos ranurados para reducir la succión provocada por el viento ha de recalcarse ya que, si bien en las esquinas de las fachadas su presencia es, o bien inocua, o bien ligeramente perjudicial, en los bordes de los tejados es un elemento muy a tener en cuenta para atenuar la influencia de los torbellinos cónicos, responsables de las altas succiones que aparecen en las cubiertas de edificios.

ANEXO 3. Estudio experimental del coeficiente de presión en una cubierta curva.

En este anexo se incluye un estudio del coeficiente de presión en una cubierta curva. El punto de partida de este estudio se encuentra en los resultados de la medida experimental de las cargas del viento en un modelo de ensayos de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte (Meseguer y otros, 2001). En la figura A3.1 se incluye una imagen del mencionado modelo de ensayos, construido en esa ocasión para realizar las medidas del coeficiente de presión en las fachadas y cubiertas del conjunto torre-edificio base. Se observa claramente que el conjunto se divide en la torre de control y un edificio base cuya cubierta es curva. En esta cubierta curva se han medido succiones locales extremadamente altas para ciertos ángulos de incidencia del viento, $c_p \approx -4$, lo que ha motivado este análisis para conocer: a) si afecta a la succión sobre la cubierta y en qué medida, que la cubierta curva sobresalga en voladizo de las fachadas, b) qué influencia ejerce la forma curva de la cubierta en los torbellinos cónicos que se pueden generar sobre la misma, y c) si un parapeto en voladizo puede reducir la succión producida por los torbellinos cónicos en la cubierta.

Para llevar a cabo el estudio de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta curva del edificio base se ha construido un modelo de ensayos simplificado de este edificio, véanse las figuras A3.2 y A3.3. Este modelo conserva la curvatura de la cubierta del edificio base de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte. El modelo ha sido instrumentado en una primera serie de medidas con 91 tomas de presión situadas en la cubierta según se indica en la figura A3.4, posteriormente se realizó una segunda serie de medidas con otras 57 tomas de presión adicionales también instaladas en la cubierta, véase la figura A3.5.

Figura A3.1. Modelo de ensayos utilizado para la medida de la cargas del viento en el conjunto de edificios de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte (Meseguer y otros, 2001).

Figura A3.2. Esquema del modelo de ensayos. El área instrumentada de la cubierta está sombreada en la planta del dibujo. La curvatura de la cubierta se define en la figura A3.3. Las cotas están expresadas en milímetros.

Figura A3.3. Definición de la cubierta del modelo de ensayos.

Figura A3.4. Situación de las tomas de presión en la cubierta del modelo de ensayos en la primera serie de medidas. Las cotas están expresadas en milímetros y medidas sobre la forma en planta, salvo aquellas con un asterisco (*), que están medidas sobre la cubierta.

Figura A3.5. Situación de las tomas de presión en la cubierta del modelo de ensayos en la segunda serie de medidas. Las tomas adicionales respecto de la primera serie de medidas se indican mediante círculos blancos. Las cotas están expresadas en milímetros.

En una primera serie de ensayos se ha medido la distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo en tres casos distintos, conseguidos variando la longitud del voladizo que presenta la cubierta. En la figura A3.6 se incluye un esquema de los tres casos. El primero, que presenta un voladizo de longitud $l/H = 0,55$, donde H representa la altura en las esquinas más altas de la cubierta (véase la figura A3.3), es el que presenta el modelo sin modificación alguna. Para reducir la longitud de este voladizo se colocaron dos postizos de madera debajo del mismo, de este modo se han establecido los dos casos más de medida, con el voladizo de longitud $l/H = 0,25$ y sin voladizo alguno. A partir de aquí se designan estos tres casos como "Voladizo 1", "Voladizo 2" y "Sin Voladizo".

Figura A3.6. Planta de los tres casos de voladizo estudiados.

En la figura A3.7 se representa la variación de las succiones máximas medidas en la cubierta del modelo, $-c_{p \text{ min}}$, en los tres casos de voladizo, con el ángulo de incidencia de la corriente del aire, β . Se observa que las succiones más altas, entre $-c_p = 3,8$ y $-c_p = 4,7$, se han medido para ángulos de incidencia del viento comprendidos entre $\beta = 43^\circ$ y $\beta = 65^\circ$. En la figura A3.7 se pueden apreciar dos máximos, uno en torno a $\beta = 45^\circ$ y otro en torno a $\beta = 60^\circ$. Puede apreciarse en esta figura que mientras que para ángulos de incidencia cercanos a 45° las succiones máximas medidas en de los tres casos son similares, en torno a $-c_p = 3,8$, para ángulos próximos a $\beta = 60^\circ$ no se da esta circunstancia, siendo mayor la succión máxima medida en el caso "Sin Voladizo", $-c_p \approx 4,7$, que la medida en los otros dos casos, $-c_p \approx 4$ (Voladizo 2) y $-c_p \approx 3,4$ (Voladizo 1). Las succiones máximas correspondientes al ángulo $\beta = 45^\circ$ se han medido en una zona relativamente alejada de la esquina de la cubierta; por el contrario las succiones máximas correspondientes al ángulo $\beta = 60^\circ$ se localizan en una zona próxima a la esquina (véase la figura A3.8). El hecho de que se produzca la máxima succión en una zona alejada de la esquina para ciertos ángulos de incidencia de la corriente de aire, contradice la creencia general que sugiere que las succiones máximas en las cubiertas de edificios bajos se producen por los torbellinos cónicos en las proximidades de las esquinas en donde se forman. Este fenómeno puede explicarse debido a que la curvatura de la cubierta acelera el flujo de aire que pasa por encima de ella (este es un efecto bien conocido en las superficies convexas), y una aceleración del flujo en sentido longitudinal, lo que, además de retrasar el colapso de los torbellinos cónicos, afecta a la morfología de los mismos, estrechando su diámetro y por tanto también su núcleo, lo cual aumenta la succión producida (Cook, 2002).

En las figuras A3.9 y A3.10 se muestran, vistas en planta, las distribuciones del coeficiente de presión en el área de medida de la cubierta del modelo de ensayos, véase la figura A3.2. Estas distribuciones de presión han sido medidas en los tres casos de voladizo estudiados para los ángulos $\beta = 43^\circ$ y $\beta = 60^\circ$. Puede apreciarse que para el ángulo de incidencia $\beta = 43^\circ$ la zona de mayor succión queda alejada de la esquina, mientras que para un ángulo $\beta = 60^\circ$ esta succión máxima se produce en las proximidades de la esquina. No se observan grandes diferencias entre las distribuciones del coeficiente de presión medidas en los tres casos (Voladizo 1, Voladizo 2 y Sin Voladizo), aunque sí se manifiesta en los resultados una cierta tendencia del torbellino cónico a colapsar antes cuanto más corto es el voladizo de la cubierta, esto se pone de manifiesto por la menor longitud de las zonas de alta succión (azules) en las correspondientes distribuciones del coeficiente de presión de las figuras A3.9 y A3.10.

Figura A3.7. Máximas succiones, $-c_{p \min}$, medidas en la cubierta del modelo de ensayos en función del ángulo de incidencia de la corriente, β . Los símbolos representan los siguientes casos de ensayo: "Voladizo 1" (cuadrados), "Voladizo 2" (círculos), y "Sin Voladizo" (triángulos).

Figura A3.8. Zonas en de la cubierta del modelo en las que se han medido las succiones más altas.

Figura A3.9. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos con las tres longitudes del voladizo de la cubierta (Voladizo 1: $l/H = 0,55$, Voladizo 2: $l/H = 0,25$ y Sin Voladizo: $l/H = 0$), con un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 43^\circ$.

Figura A3.10. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos con las tres longitudes del voladizo de la cubierta (Voladizo 1: $l/H = 0,55$, Voladizo 2: $l/H = 0,25$ y Sin Voladizo: $l/H = 0$), con un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 60^\circ$.

En la figura A3.11 se muestran los valores del coeficiente de presión medido en la cubierta del modelo sin voladizo, a lo largo de algunas líneas rectas $\alpha = \text{cte.}$ trazadas sobre la vista en planta y que parten de la esquina de barlovento de la cubierta. Los valores del coeficiente de presión se han representado en función del logaritmo neperiano de la distancia adimensional medida desde la esquina del modelo, esto es, $\ln(r/H)$, donde r es la distancia y H la altura de la cubierta en las esquinas más altas de la misma ($H = 118,5 \text{ mm}$).

La figura A3.11 es equivalente a la figura A1.2 del anexo 1, en donde se muestra la distribución del coeficiente de presión interpolada a lo largo de las rectas trazadas en la cubierta plana del modelo M3D1. Obsérvese que, mientras en la figura A1.2 el coeficiente de presión varía linealmente cuando se le representa en función del logaritmo neperiano de la distancia a la esquina de la cubierta (lo cual posibilita la aplicación del modelo de torbellino semi-empírico de Cook), en la figura A3.11 este tipo de distribuciones no son lineales. Esto es debido a que el torbellino cónico, es decir su eje, se curva debido a la curvatura de la propia cubierta.

Figura A3.11. Variación del coeficiente de presión a lo largo de diversas líneas $\alpha = \text{cte.}$ trazadas en la vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido sin voladizo y con un ángulo de incidencia del viento igual a $\beta = 43^\circ$.

En la segunda serie de medidas se ha estudiado el efecto de un parapeto en voladizo de anchura 10 mm situado sobre el borde curvo de la cubierta en donde se genera el torbellino cónico, véase la figura A3.12. Como ya se ha mencionado, en este caso se han situado tomas de presión adicionales en la cubierta para captar con mayor definición la distribución del coeficiente de presión en la misma. Los tres casos analizados son los siguientes: sin parapeto en voladizo, con el parapeto en voladizo situado a una altura igual a $h/H = 0,038$ sobre el borde de la cubierta, y con el parapeto en voladizo situado a una altura igual a $h/H = 0,055$ sobre el borde de la cubierta. En los dos últimos casos el parapeto en voladizo ha sido posicionado de tal forma que no sobresalga hacia fuera de la cubierta. En los tres casos de ensayo estudiados en esta serie de medidas la cubierta no presenta voladizo alguno sobre las fachadas del modelo, es decir, se han situado fachadas postizas alineadas con los bordes de la cubierta.

En la figura A3.13 se observa que la succión producida por el torbellino que aparece en la cubierta cuando no se ha dispuesto el parapeto en voladizo, queda disminuida en gran medida si se sitúa en la mencionada cubierta cualquiera de los dos parapetos en voladizo ensayados. Sin embargo, se observa también que entre el parapeto y la cubierta se crea una succión intensa

En la tabla A3.1 se incluyen los coeficientes mínimos medidos en la cubierta del modelo con un ángulo de incidencia $\beta = 45^\circ$ en los tres casos ya descritos, sin el parapeto en voladizo y con el parapeto situado a las alturas $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,055$. En los casos medidos con parapetos se proporcionan dos coeficientes de presión mínimos, el primero correspondiente a la superficie de la cubierta en general salvo el área que queda debajo del voladizo, y el segundo correspondiente a éste área específica.

Con el parapeto instalado en la cubierta se ha medido una disminución de la succión máxima comprendida entre el 34% y el 39% respecto a la máxima succión medida en la cubierta sin parapeto. Sin embargo, se observa un alto incremento, hasta el 30%, de la succión justo debajo del parapeto en comparación con la medida en la cubierta sin parapeto.

Figura A3.12. Cubierta del modelo de ensayos con el parapeto en voladizo situado sobre el borde curvo de la cubierta del mismo.

Figura A3.13. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos sin el parapeto en voladizo instalado, y con el mencionado parapeto instalado a las alturas $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,055$. Se ha marcado en trazo negro el contorno de la cubierta.

Tabla A3.1. Coeficientes de presión mínimos, $c_{p \text{ min}}$, medidos en la cubierta del modelo de ensayos, con y sin parapeto en voladizo instalado, con un ángulo de incidencia de la corriente de aire $\beta = 45^\circ$. Los coeficientes medidos en la cubierta salvo el área situada bajo el parapeto en voladizo han sido caracterizados con el número (1), los coeficientes medidos en el área que queda bajo el parapeto han sido caracterizados con el número (2).

h/H	$c_{p \text{ min}}(1)$	$c_{p \text{ min}}(2)$
0	-3,24	-
0,038	-1,98	-3,50
0,055	-2,14	-4,23

Tras los ensayos llevados a cabo concernientes a la carga aerodinámica en la cubierta curva, se han observado los siguientes efectos: en primer lugar, la existencia del voladizo en la cubierta disminuye la succión máxima medida en la misma, no obstante, no parece alterar en demasía la distribución del coeficiente de presión en la cubierta y, por extensión, la carga aerodinámica. En segundo lugar, la convexidad de la cubierta da lugar a aceleraciones del flujo que afectan a los torbellinos cónicos, pudiendo éstos provocar las succiones máximas en zonas de la cubierta relativamente alejadas de su origen. Por último, en tercer lugar, se ha registrado un descenso notable de la succión provocada por los torbellinos cónicos formados sobre la cubierta del modelo de ensayos, en los casos en que se ha instalado un parapeto en voladizo sobre el borde de la misma situado más a barlovento. Sin embargo, se ha de advertir también que la succión que se provoca localmente entre el parapeto y la cubierta por el hecho de encajonar el

flujo de aire es alta.

POSTFACIO (AGRADECIMIENTOS).

En 1999 empecé una carrera universitaria después de casi tres años trabajando en el sector privado, no es nada fácil realizar un cambio de vida profesional semejante a los 30 años, máxime en un momento histórico en el que el estado del bienestar se desmorona en España para las jóvenes generaciones profesionales. A este respecto siempre estaré agradecido a D. Aurelio Jiménez por su apoyo y capacidad para entender las circunstancias que me rodeaban y que motivaron mi cambio de orientación profesional y, por supuesto, a D. José Meseguer, quien me dio la oportunidad de trabajar en el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” posibilitando así el inicio de mi carrera universitaria.

La escritura de una tesis doctoral es un inmenso ejercicio de paciencia, pero con este término, paciencia, no quiero referirme al doctorando, quien es normalmente responsable de su propia decisión y ha de sobrellevar con entereza la mayor o menor dureza del camino que él mismo ha elegido. Al decir paciencia pienso en el entorno afectivo, familia y amigos, de quien realiza una tesis doctoral. En este sentido me siento en la obligación de nombrar aquí a aquellos que, con su apoyo y comprensión han contribuido de manera decisiva al desarrollo de esta tesis:

- A mis padres y hermanos, quienes tratan de apoyarme en todo momento aún cuando mi comportamiento les haya parecido más de una vez fuera de lugar.
- A David y Mirella, por el apoyo incondicional y toda la ayuda.
- A Carlos, mi amigo eterno.
- A Imanol y Sonia, por su cariño.

- A Antonio, quien siempre ha tenido tiempo para una llamada de teléfono y un rato de charla.
- A Roberto y Beatriz, por los buenos ratos y la buena música.
- A los amigos de la Sierra, Francisco, Ana V., Salva, Ana I., Miguel, Yolanda, Álvaro, Daniel, Lorena, Carolina..., por darme su amistad siendo yo un extraño.
- A quien me dio el corazón.
- A los amigos de Barcelona, Xavi, Maite, Sergi y Ana, para quienes la distancia nunca existe.
- A Aurelio y Lucía, por saber cuando necesitaba ayuda y dármela espontáneamente.
- A Ester y Johnny, por ser un referente para mí y meter sensatez en mi cabeza.
- A quien dejó de pensar que yo era un capullo aburrido y me hizo reír.
- A José Manuel R. R. y su familia, por ser mi otra familia.
- A mi tío Carlos, siempre presente en mi recuerdo.
- A Cuca, Alejandro y Sebastián, por los cafés matinales.

A todos ellos, de corazón, gracias.

Por último, agradezco también a mis compañeros del IDR/UPM su inestimable ayuda en todo lo relativo al desarrollo experimental y escrito de esta tesis.

El Escorial, Marzo de 2003.

CURRICULUM VITAE.

SANTIAGO PINDADO CARRIÓN

Nº D.N.I. 50.722.737-D, expedido en Madrid.

Fecha de nacimiento: 9 de Agosto de 1969, en Valencia.

Domicilio: Urbanización Parque Real, bloque 2, apto. 101. C/ Juliana nº 4. El Escorial,
Madrid 28280.

Teléfono: 91-8960981

TITULACIÓN

1995. Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid. Especialidad:
Aeronaves, Misiles y Motopropulsores.

ACTIVIDAD PROFESIONAL

1996-1999. Sener, Ingeniería y Sistemas.

1999- . Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad
Politécnica de Madrid (IDR/UPM).

PUBLICACIONES (libros)

J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, S. Pindado. *Aerodinámica de instalaciones
aeroportuarias*. Fundación Aena, Madrid, 2000.

J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, S. Pindado. *Aerodinámica Civil. Cargas del viento
en edificaciones*. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid, 2001.

PUBLICACIONES (artículos)

S. Pindado. El jet-foil, un barco que vuela. *Revista Hespérides* nº 127, 1996.

J. Meseguer, B. Fairbanks, E. Montero, S. Pindado. Estudio aerodinámico de la nueva torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, 2002.

J. M. Perales, J. Meseguer, S. Pindado, E. Meseguer. Experimentación en gravedad reducida. *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, 2002.

J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, S. Pindado. Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil. *Revista de Obras Públicas*, nº 3.419, Marzo 2002.

J. Meseguer, S. Pindado. Usos de los túneles aerodinámicos. *Mundo Científico*, nº 235, Septiembre 2002.

S. Pindado, J. Meseguer. Wind túnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. (En preparación).

PUBLICACIONES (congresos)

S. Pindado, J. Meseguer, J. M. Perales, A. Sanz, A. Martínez. Wind-induced loads over double cantiliver bridges under construction. IABMAS'02, Barcelona, España, 14-17 Julio 2002.

OTRAS PUBLICACIONES (trabajos)

Instituto Von Kármán (Bruselas):

S. Pindado y K. Michiels, Flow visualization experiments in the water túnel W.T.1. Stagiaire Report 1994-43. October 1994.

Sener, Ingeniería y Sistema. División Mecánica de Barcelona:

S. Pindado. Análisis del flujo en un codo simple con FLUENT/UNS y RAMPANT. SAI-SRLM-NT-003. Mayo 1997.

S. Pindado. Análisis del flujo en un codo simple con FLUENT/UNS y RAMPANT (II). SAI-SRLM-NT-004. Julio 1997.

S. Pindado. Cálculo preliminar del acondicionamiento de aire del modelo SEAT 340 (Toledo S5). SAI-SRLM-NT-005. Julio 1997.

S. Pindado. Análisis del flujo en un codo simple con FLUENT/UNS y RAMPANT (III). SAI-SRLM-NT-006. Julio 1997.

S. Pindado. Programa para el cálculo de flujo en conductos de tipo intercooler. SAI-SRLM-CC-001. Noviembre 1997.

S. Pindado. Análisis del flujo en los conductos del intercooler 1.9 Tdi serie II. SAI-SRLM-NT-007. Noviembre 1997.

S. Pindado. Cálculos preliminares en el estudio del descongelado del parabrisas de un automóvil. SAI-SRLM-CC-002. Abril 1998.

S. Pindado. Análisis del flujo de aire en el parabrisas y lunas delanteras del modelo SE 340. SAI-SRLM-NT-008. Junio 1998.

S. Pindado, R. Rebolo. Flow model simulation of the exhaust gas system from the gas turbine plenum exit to the boiler inlet section. P227125. Julio 1998.

S. Pindado, T. Michalek, Análisis de los conductos defrost del modelo AUDI B6. P215850. Agosto 1998.

S. Pindado, Análisis del deshielo del parabrisas del modelo SE 340 (I). SAI-SRLM-NT-009. Noviembre 1998.

S. Pindado, Análisis del deshielo del parabrisas del modelo SE 340 (II). SAI-SRLM-NT-010. Noviembre 1998.

S. Pindado, Cálculo de pérdidas de carga en rejillas hexagonales. SAI-SRLM-CC-003/01. Julio 1999.

Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM):

S. Pindado, J. Meseguer, J. M. Perales. Evaluación y análisis mediante ensayos en túnel de la aerodinámica interna de la plataforma de ensayo de motores del Aeropuerto de Barajas. LA-9910. Octubre 1999.

J. Meseguer, S. Pindado, J. M. Perales. Cargas del viento sobre un modelo de cubierta del nuevo edificio terminal del Aeropuerto de Barajas. LA-9911b. Noviembre 1999.

S. Pindado, J. Meseguer. Evaluación de la capacidad de arrastre por el aire de polvo de carbón. LA-9912. Noviembre 1999.

S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Evaluación y análisis mediante ensayos en túnel aerodinámico del comportamiento de una orza de catamarán. LA-9913. Noviembre 1999.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Estudio mediante ensayos en túnel aerodinámico de la distribución de vientos en la ampliación del puerto de Ferrol. LA-0001. Marzo 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas aerodinámicas sobre los tejados de algunos edificios del campus de Leioa (Universidad del País Vasco, Bilbao). LA-0002-1. Abril 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas globales del viento sobre un modelo de pérgola. IDR/IF 0005. Abril 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre la cubierta del velódromo de Dos Hermanas (Sevilla). IDR/IF 0004. Mayo 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio "Tropicarium". IDR/IF 0006. Junio 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Edificio "Tropicarium". Acciones del viento sobre las lamas del recubrimiento. Anexo al Informe Ref. IDR/IF 006. Sin referencia. Junio 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Proyecto constructivo LAV Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa. Medida de las cargas del viento sobre un modelo de la estación de Zaragoza-Delicias. IDR/IF 0007. Junio 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del estadio "Chapín" de Jerez de la Frontera. IDR/IF 0003. Julio 2000.

J. Meseguer, S. Pindado. Estimación de la distancia recorrida por las partículas de polvo de carbón. LA-9912b. Septiembre 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Estudio del viento en la Plaza de Toros Monumental de Las Ventas (Madrid). 9810/CA. Octubre 2000.

J. Meseguer, S. Pindado. Barreras cortavientos porosas. LA-9912c. Octubre 2000.

J. Meseguer, S. Pindado. Cargas de viento sobre los tejados del modelo de recubrimiento del parque de carbón de importación. LA-9912d. Octubre 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Cargas del viento sobre un modelo de la cubierta de la ampliación del Museo Reina Sofía de Madrid. LA-0008. Noviembre 2000.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del Palacio de Ferias de Málaga. IDR/IF 0110. Enero 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio Endesa. IDR/IF 0009. Enero 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del Palacio de Ferias de Málaga. Informe complementario. IDR/IF 0110/1. Febrero 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Estudio del viento en la Plaza de Toros Monumental de Las Ventas (Madrid). IDR/IF 0113. Febrero 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del sistema de cerramiento de la Plaza de Toros de San Sebastián (Sistema Párpado). IDR/IF 0111. Febrero 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio de la torre de control del aeropuerto de La Rioja. IDR/IF 0113. Junio 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Wind loads on solar cells module SX 120. IDR/IF 0115. Noviembre 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte. IDR/IF 0116. Diciembre 2001.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de los coeficientes de sustentación y de resistencia de dos perfiles de palas de aerogenerador de energía eólica. IDR/IF 0217. Enero 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Análisis del viento en la Plaza de Toros de Las Ventas y medida de las velocidades sobre un modelo de cubierta. IDR/IF 0218. Febrero 2002.

S. Pindado, J. M. Perales, A. Sanz, J. Meseguer. CFD calculations of an air separator device for the Airbus A380 hydraulic system. IDR/IF 0225-A. Abril 2002.

S. Pindado, J. M. Perales, A. Sanz, J. Meseguer. CFD calculations of the flow field in the lower cavity of a reservoir unit for the Airbus A380 hydraulic system. IDR/IF 0225-B. Abril 2002.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, N. Bezdenejnykh, J. M. Perales. Estudio preliminar de barreras cortavientos para el puerto de Valencia. IDR/IF 0251. Mayo 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio "Torre Espacio". IDR/IF 0219. Junio 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Estudio en túnel aerodinámico de la velocidad del viento a nivel peatonal alrededor del edificio "Torre Espacio". IDR/IF 0219-b. Junio 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo del edificio "Torre Marenstrum" de Gas Natural de Barcelona. IDR/IF 0224. Junio 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Estudio en túnel aerodinámico de la velocidad del viento, a nivel peatonal, en el edificio de ampliación del Museo Reina Sofía de Madrid. IDR/IF 0220. Julio 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Medida de las cargas del viento sobre un modelo de pérgola fotovoltaica. IDR/IF 0222. Julio 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales. Wind loads on a 15° solar cells module. IDR/IF 0226-D. Julio 2002.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Sanz, N. Bezdenejnykh, J. M. Perales. Estudio preliminar de barreras cortavientos para el puerto de Avilés. IDR/IF 0651. Julio 2002.

J. Meseguer, J. M. Perales, S. Pindado, A. Sanz, N. Bezdenejnykh, G. Tevar. Estudio de barreras cortavientos y otras medidas atenuantes de las emisiones y de la dispersión de polvo en los puertos. IDR/IF 0291. Septiembre 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Martínez, A. Laverón. Medida de las cargas del viento sobre un modelo de la torre de control del aeropuerto de Barcelona. IDR/IF 0230. Octubre 2002.

S. Pindado, J. M. Perales. Wind loads on solar cells modules. IDR/IF 0226-E. Octubre 2002.

S. Pindado, J. M. Perales. Wind loads on solar cells modules (II). IDR/IF 0226-F. Noviembre 2002.

S. Pindado, J. Meseguer, A. Martínez, A. Laverón. Medida de las cargas del viento sobre un modelo de la torre de control del aeropuerto de Barcelona. Informe complementario. IDR/IC 0230. Noviembre 2002.

J. Meseguer, A. Laverón, J. M. Perales, S. Pindado, A. Martínez. Cargas de viento sobre la nueva cubierta del estadio Santiago Bernabeu. IDR/IF 0231-c. Diciembre 2002.

S. Pindado, J. M. Perales. Wind loads on solar cells modules (and III). IDR/IF 0226-G. Enero 2003.

S. Pindado, J. M. Perales. Wind loads on 0° solar cells modules. IDR/IF 0226-H. Febrero 2003.

J. Meseguer, S. Pindado, A. Martínez, A. Laverón. Medida mediante ensayos en túnel aerodinámico de las cargas de viento sobre el complejo "Palacio del Agua" de Orihuela. IDR/IF 0334. Febrero 2003.

CURSOS Y SEMINARIOS (Doctorado)

1999/2000. Aerodinámica Civil. Dr. Meseguer, Dr. Sanz, Dr. Perales

1999/2000. Planes de Emergencia en Aeropuertos Civiles. Dr. Cevallos.

1999/2000. Técnicas de filtrado Recursivo y Multisensor Aplicadas a la Navegación Aérea. Dr. Sáez Nieto.

1999/2000. Ayudas Visuales Luminosas para la Navegación Aérea. Dr. Bugallo.

1999/2000. Estabilidad y Control de Sistemas Dinámicos. Dr. Gómez-Pérez.

2000/2001. Método de Perturbaciones en Mecánica de Fluidos. Dr. Ryazantsev.

2000/2001. Introducción a la Vibroacústica. Dr. Perales, Dr. García-Fogeda.

CURSOS Y SEMINARIOS

NASA-ESA Instructor Training Course. European Astronaut Center (EAC), Colonia, Alemania. Noviembre 2002.