

Anexo B: Cargas en cubiertas debidas a torbellinos cónicos

Santiago Pindado Carrión, Sebastián Franchini y José Meseguer Ruiz

Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva", IDR/UPM
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid
28040 Madrid, España

ÍNDICE

RESUMEN	
B1. INTRODUCCIÓN	2
B2. TÉCNICAS EMPLEADAS	10
B3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO EN LA CARGA AERODINÁMICA	17
B4. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS VERTICALES SÓLIDOS Y POROSOS EN LA CARGA AERODINÁMICA	20
B5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS EN VOLADIZO EN LA CARGA AERODINÁMICA	28
B6. IMÁGENES DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA DEL EFECTO DE LOS PARAPETOS	34
B7. TORBELLINOS CÓNICOS EN UNA CUBIERTA CURVA	40
B8. REFERENCIAS	48

RESUMEN

En este anexo 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 (Pindado y Meseguer, 2003; Pindado y otros, 2004; Franchini y otros, 2005).

Mediante medidas en túnel aerodinámico del coeficiente de presión en la cubierta de modelos de ensayos se ha analizado el modo en que los mencionados parapetos afectan a los torbellinos cónicos, responsables de la succión más alta que puede darse en cubiertas de edificios. También 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.

NOTA

Aunque el contenido de este anexo corresponde a material elaborado con anterioridad para otros propósitos, es posible que en el proceso de adaptación a este curso se hayan deslizado erratas e inconsistencias no detectadas por el momento. Para consultar la posible lista de erratas véase <http://www.idr.upm.es/sita>

B1. INTRODUCCIÓN

Los efectos del viento sobre construcciones civiles se empezaron a tener en cuenta a partir de mediados del siglo XIX, debido distintos accidentes ocurridos 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 sujetas por piedras en casas rurales. 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.

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 que ayudaran a arquitectos e ingenieros a prever los efectos aerodinámicos en sus proyectos. Estos códigos, que son en realidad normas de aplicación relativamente sencilla 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 sobredimensionarla. 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.

Así pues, actualmente, debido a la gran experiencia acumulada en ensayos en túnel, 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 olviden 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 dificultar 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 bastante uniforme en media.
- Readherencia de la corriente. Aspecto 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 con el borde de ataque relativamente afilado 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 la superficie de la estructura sometida al viento, esto es, aceleraciones de la corriente, desprendimientos y torbellinos cónicos, siendo de poca relevancia el caso contrario (compresión). 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 isentrópicamente 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.

Como se ha mencionado, 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 algún modo propio 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.

Por otra parte se sabido que la presión dinámica de un flujo turbulento resulta ser mayor que la presión dinámica asociada a la velocidad media, hecho tenido en cuenta en los códigos de cálculo

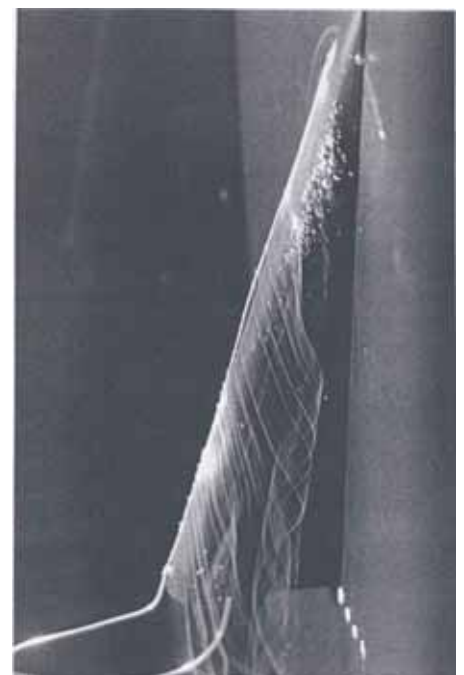
mediante coeficientes correctores adecuados (la intensidad de la turbulencia del viento, I_u , y el factor de pico, k_p).

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, 1997). 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, 1997). 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).

Aunque es posible tener en cuenta los efectos no estacionarios del viento al estimar la carga aerodinámica estática en el recubrimiento exterior de una estructura, aquí, 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 del trabajo 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).

Centrado otra vez el discurso en 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 (figura B1.1). 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 Délery, 2001).

Figura B1.1. Visualización en túnel hidrodinámico de un torbellino cónico formado en un ala delta; de 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_0 , y longitudinal,

v_z , del torbellino cónico (figura B1.2) supera el valor $v_0/v_z = 1,3$, se produce el fenómeno llamado colapso del torbellino (Mitchell y Délerly, 2001). Este colapso del torbellino consiste en que el eje del torbellino empieza a enrollarse sobre sí mismo (figura B1.3). 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 Délerly, 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. En Kawai y Nishimura (1996) se estudian 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, como se representa en la figura B1.3. 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.

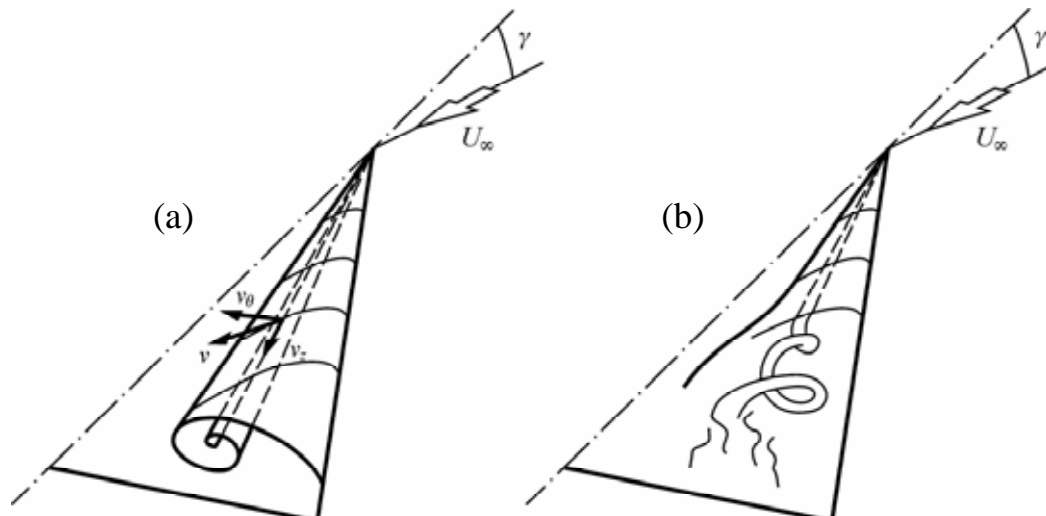


Figura B1.2. Formación de torbellinos cónicos en alas en delta, (a) torbellino antes de su colapso, (b) torbellino colapsado. En la figura se indican las velocidades tangencial, v_0 , y longitudinal, v_z , del flujo correspondiente al torbellino cuya relación gobierna el colapso del mismo.

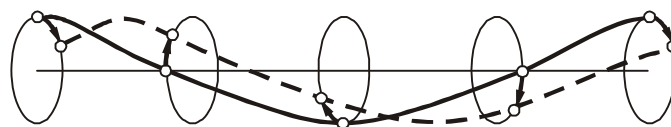


Figura B1.3. Esquema de la estructura de eje del torbellino cónico según Kawai y Nishimura (1996).

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: cuando el viento incide sobre un edificio de baja altura con un cierto ángulo respecto a 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. Hay, por ejemplo, otros dos tipos de torbellinos cónicos ligados al flujo de aire en las fachadas de edificios altos que 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; en la figura B1.4 se representan los tres tipos de torbellinos cónicos mencionados en este párrafo. En los trabajos de Okuda y colaboradores, y de 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.

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 enormes 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 (este parece ser el caso del valor -20).

Valores muy negativos del coeficiente de presión 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. Se puede explicar 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 nacen los torbellinos (Kind, 1988). Además, la succión que estos torbellinos crean sobre la cubierta crece de forma inversa a la distancia a la esquina donde se generan. 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.

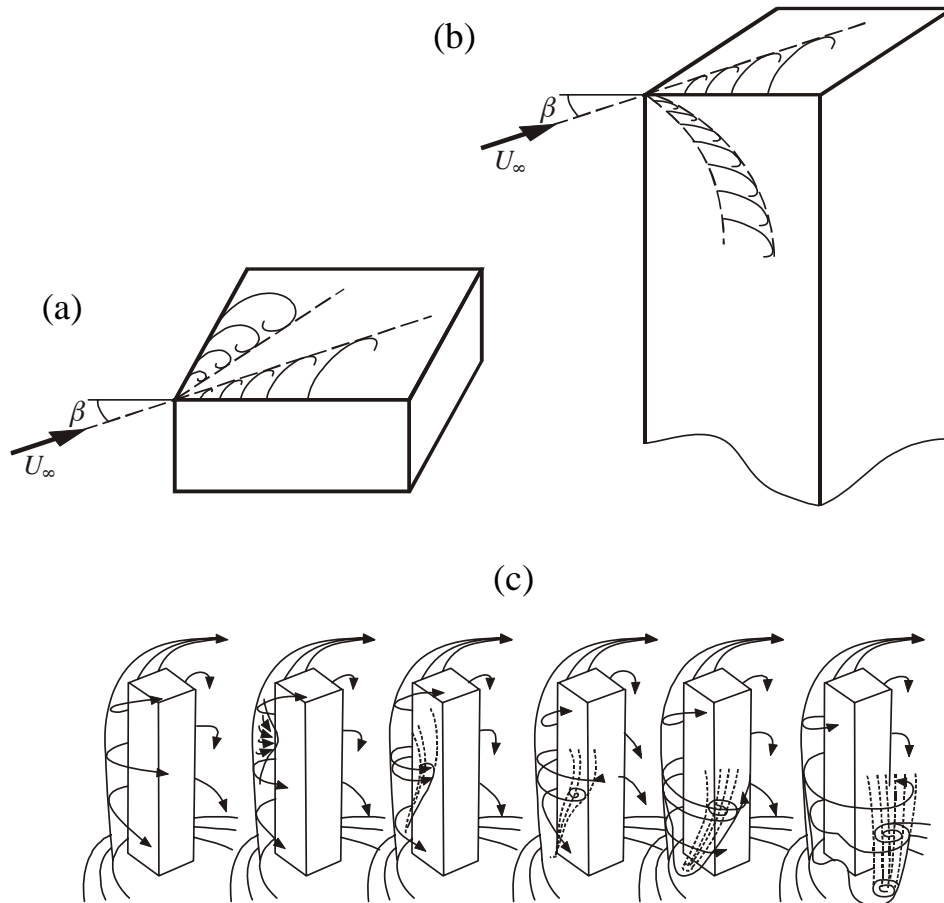


Figura B1.4. Cconfiguraciones de flujo que dan lugar a torbellinos cónicos en la superficie de edificios: (a) tejados de edificios bajos cuando el viento incide con un cierto ángulo respecto a las fachadas (torbellino estacionario), (b) tejados y parte superior de las fachadas de edificios altos cuando el viento incide con un cierto ángulo respecto a 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).

En cuanto a cómo afecta la turbulencia a la succión producida por un torbellino cónico sobre la cubierta de un edificio, la información publicada en distintos trabajos 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_u , como ya se ha mencionado.

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 del 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, 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.

Para realizar los estudios experimentales que se describen en este anexo 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. 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.

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 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 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.

Aquí, además de parapetos sólidos, también se han estudiado los posibles beneficios 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 la comodidad de 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 barrera.

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 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 se ha analizado un nuevo tipo de parapeto con forma de voladizo y situado encima de los bordes de la cubierta, configuración que está siendo objeto de cierta atención en la literatura (Pindado y Meseguer, 2003; Pindado y otros, 2004; Franchini y otros, 2005, Kopp y otros, 2005a, 2005b, 2005c, 2005d). 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 forma 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.

Adicionalmente se ha puesto a punto un procedimiento de visualización de los torbellinos cónicos mediante termografía infrarroja. 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, 1999). 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 Cook y otros (2002), donde se llega 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).

B2. TÉCNICAS EMPLEADAS

Los distintos ensayos han sido realizados en los túneles aerodinámicos A9 y S1 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid, IDR/UPM (www.idr.upm.es). En cuanto a las técnicas empleadas, se ha utilizado por una parte la medida directa de los coeficientes de presión en las cubiertas de distintos modelos de ensayos, y por otra parte la visualización mediante termografía infrarroja de los torbellinos cónicos formados sobre la cubierta de otro modelo de ensayos.

El túnel aerodinámico A9 es un túnel de tipo Eiffel o de circuito abierto (Meseguer y otros, 2002 b; Meseguer y Pindado 2002). Este túnel tiene 14,25 m de longitud, véase la figura B2.1, y 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 con una potencia nominal de 7,5 kW y 0,9 m de diámetro cada uno. 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 del modelo de ensayos respecto a la corriente (figura B2.2). 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 $U_{\infty} = 22$ m/s. 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 generadores de turbulencia corriente arriba del modelo de ensayos. El hecho de tener una corriente que puede calificarse como de baja turbulencia redundante, como ya se ha mencionado, 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.

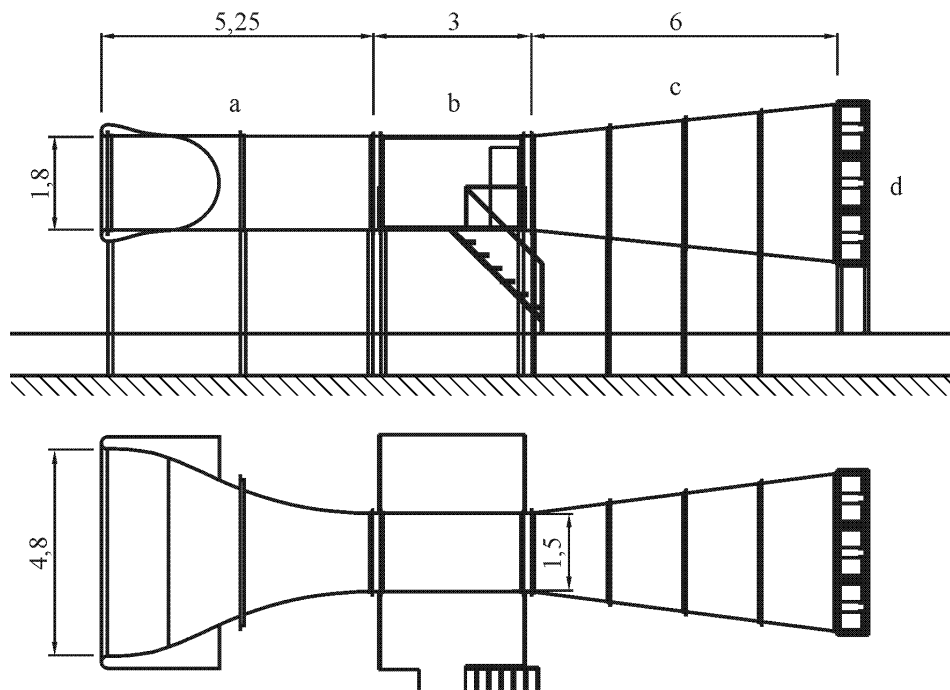


Figura B2.1. Planta y alzado del túnel aerodinámico A9 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM): (a) contracción, (b) cámara de ensayos, (c) difusor y (d) sección de ventiladores. Cotas en metros (véase también www.idr.upm.es).



Figura B2.2. 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 el caso de cubiertas planas, los modelos ensayados en el túnel aerodinámico A9 han sido dos, denominados M3PRE y MTERM. El modelo M3PRE ha sido diseñado y construido para medir el coeficiente de presión en un conjunto de puntos de su cubierta, por el contrario, el modelo MTERM 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 M3PRE y MTERM 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 M3PRE la cubierta se ha fabricado empleando aglomerado de madera prensado (MDF – *Medium Density Fiberboard*), en el modelo MTERM se ha empleado una chapa de acero de 0,4 mm de espesor para favorecer la transmisión de calor y, además, se ha forrado el exterior de este chapa de acero con una capa de cinta adhesiva blanca para mejorar la captación de las imágenes por la cámara termográfica.

En la figura B2.3 se muestra un esquema del modelo M3PRE. 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 M3PRE varíe entre 0,327 m y 0,330 m si se cuenta con el espesor de las chapas y de los parapetos. Este modelo de ensayos está construido en su totalidad con aglomerado de pasta de madera prensado (MDF). En la figura B2.4 se presenta un esquema de la situación de las 92 tomas de presión instaladas en la cubierta del modelo M3PRE. 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.

Las tomas de presión instaladas en el modelo de ensayos M3PRE 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 es de 10 Hz.

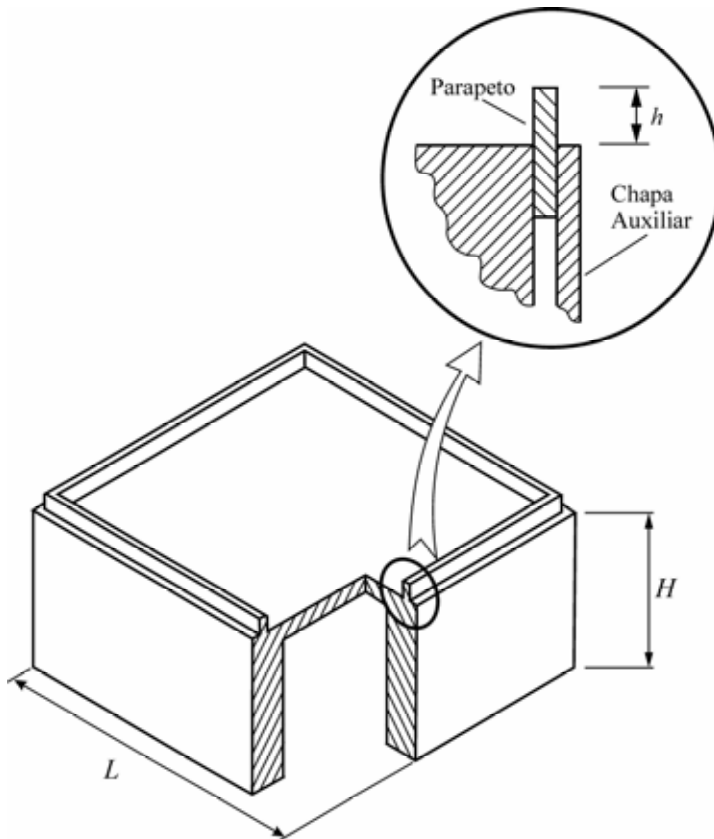


Figura B2.3. Esquema del modelo M3PRE.

Los tubos de plástico de las tomas de presión correspondientes al modelo M3PRE se han conectado a un lector de presión (transductor), cuyas señales eléctricas pasan a los acondicionadores de señal y de estos al filtro de 10 Hz mencionado. Una vez filtradas, las señales analógicas se conducen hasta un sistema de adquisición de datos conectado a una tarjeta controladora 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).

El modelo M3PRE 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 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 del modelo.

En la figura B2.5 se muestra un esquema del modelo de ensayos MTERM. Este modelo es muy similar en la forma al modelo M3PRE; se trata 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 B2.5, 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 MTERM está construido con aglomerado MDF salvo la cubierta, que es una chapa de acero de 0,4 mm de espesor. En el interior del modelo MTERM se ha situado una matriz de lámparas incandescentes para calentar la cubierta del modelo. 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. Además, la chapa 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 los posible los gradientes de temperatura en el interior del modelo.

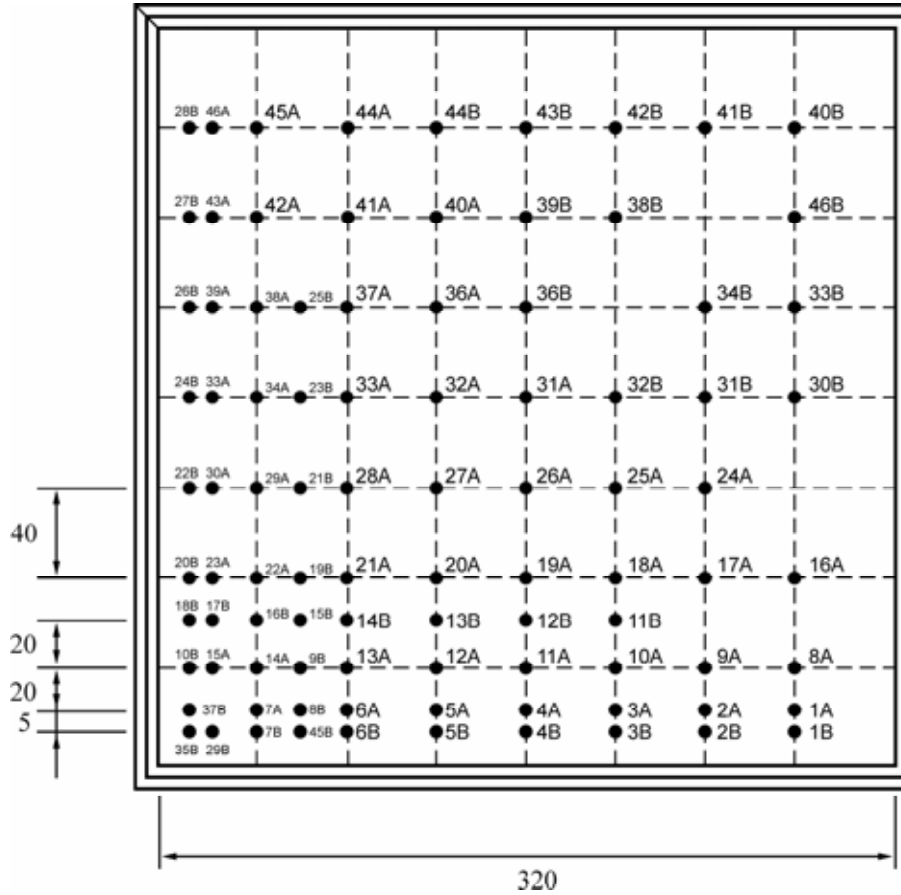


Figura B2.4. Esquema acotado de la cubierta del modelo M3PRE. En el dibujo se indica la numeración adoptada de las tomas de presión. Cotas en milímetros.

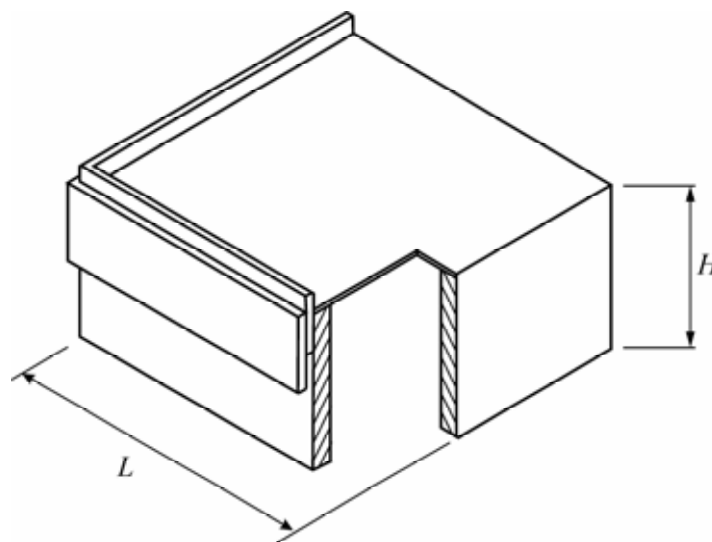


Figura B2.5. Esquema del modelo de ensayos MTERM.

La elección de la fuente de calor contrasta con la seleccionada por otros autores en sus trabajos. Por ejemplo en Yamada y otros (1996) se describe como fuente de calor la recirculación de agua caliente dentro del modelo de ensayos, empleando una placa de metacrilato de 12 mm de espesor sobre un tanque de agua caliente. La fuente de calor escogida para calentar la cubierta del modelo MTERM es más simple, ya que el objetivo de los ensayos era simplemente la visualización del efecto de los parapetos en el flujo de aire sobre la cubierta del modelo MTERM, para tener así una descripción cualitativa del flujo adicional a la obtenida mediante las medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE.

El modelo MTERM 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 B2.6 puede observarse la disposición experimental que se ha adoptado en los ensayos. Sobre el modelo MTERM y fijada al techo de la cámara de ensayos se ha situado una cámara termográfica de Insight Vision Systems Ltd. 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.

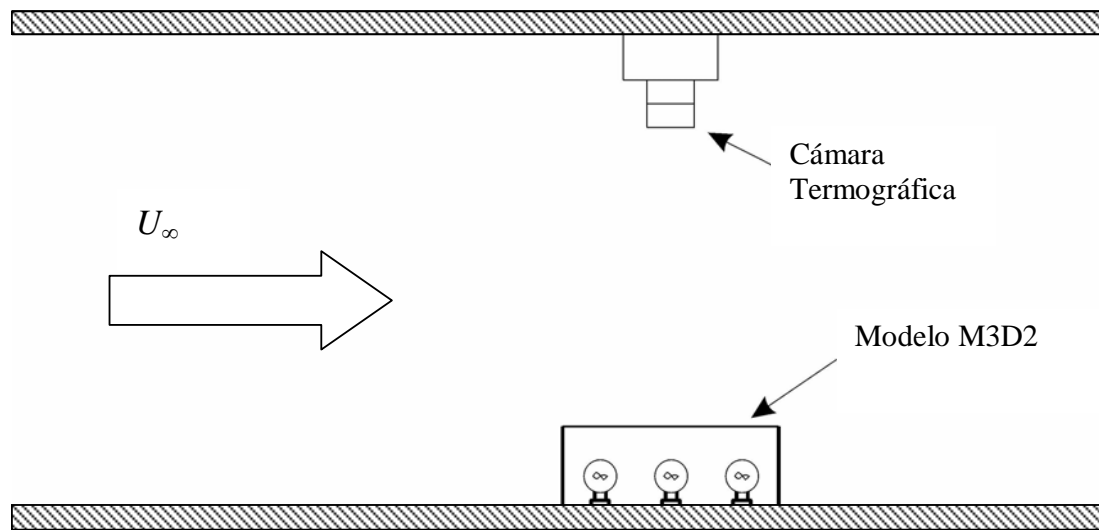


Figura B2.6. Esquema de la disposición experimental empleada en los ensayos de visualización mediante termografía infrarroja con el modelo MTERM.

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 MTERM 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 cuatro 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 diez 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.

En el transcurso de la campaña de ensayos, tanto para medir los perfiles de velocidad de los túneles A9 y S1 como para medir la velocidad sobre la cubierta del modelo MTERM, se ha utilizado también un sistema de velocimetría por hilo caliente, con el que 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 B2.7. 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°. La intensidad de turbulencia, I_u , del túnel aerodinámico S1 es del orden del 4%.

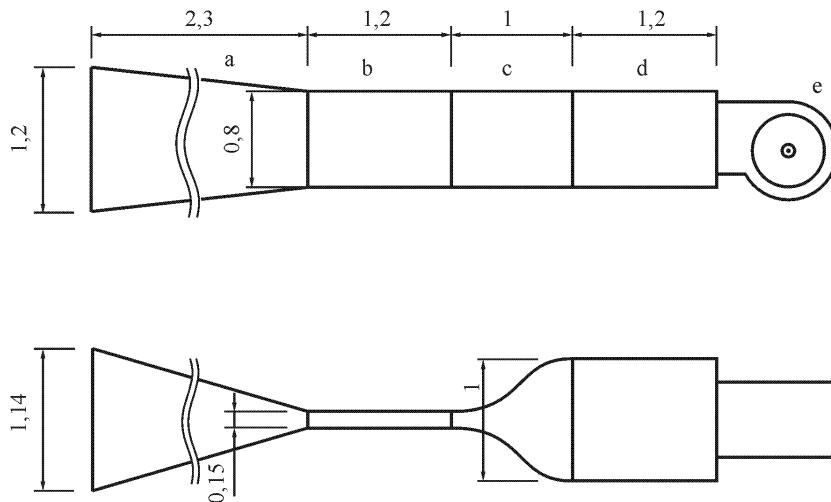


Figura B2.7. Planta y alzado del túnel aerodinámico S1 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM): (a) difusor, (b) cámara de ensayos, (c) contracción, (d) cámara de tranquilización, y (e) ventilador. Cotas en metros.

En la figura B2.8 se muestra el modelo M2PRE, destinado a los ensayos en el túnel aerodinámico S1. 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 B2.8, además se indica también en el dibujo la situación de las 24 tomas de presión instaladas en la cubierta del modelo. El modelo M2PRE está construido, salvo las tomas de presión, con aglomerado de madera prensado (MDF). Las tomas de presión instaladas en este modelo son iguales a las del modelo M3PRE, y están conectadas a un transductor, 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.

La relación entre la altura del modelo M2PRE 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. Aquí no se han corregido las medidas por bloqueo, debido a que tales medidas del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M2PRE se han realizado para establecer una comparación entre los efectos de diferentes parapetos en voladizo, sin ánimo de proporcionar valores con respecto a un edificio a escala real.

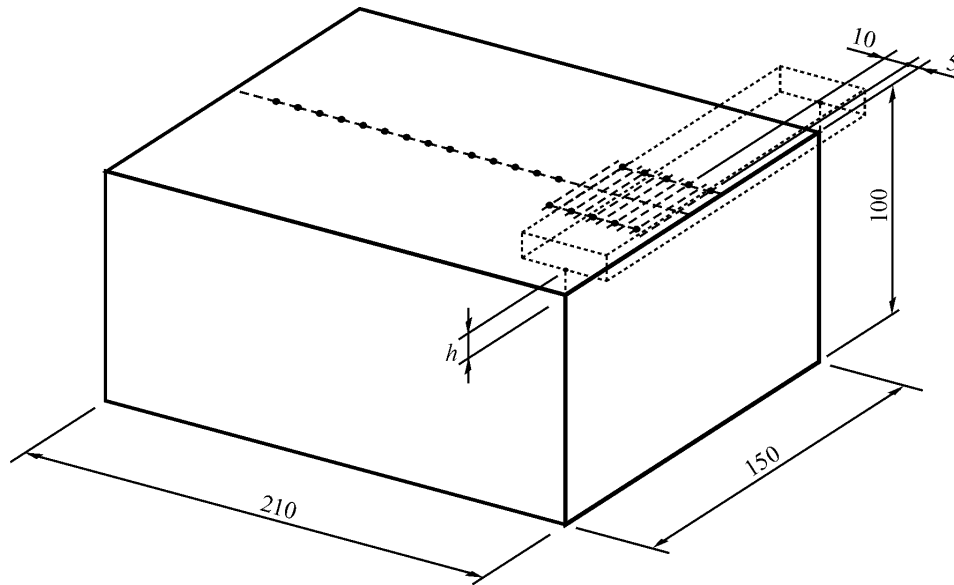


Figura B2.8. Dibujo esquemático del modelo de ensayos M2PRE. Las tomas de presión dispuestas en la cubierta del modelo se indican mediante puntos negros en el dibujo. Se indica también, línea de trazos, el voladizo sobre el borde anterior de la cubierta en una posición genérica. Cotas en milímetros.

En el apartado siguiente se presentan las medidas experimentales del coeficiente de presión en los modelos de ensayos M3PRE y M2PRE, y los mapas de transferencia de calor en la cubierta del modelo MTERM obtenidos mediante termografía infrarroja.

Este estudio experimental se divide en cuatro partes. El propósito de la primera serie de medidas es fijar con el modelo M3PRE el ángulo de incidencia de la corriente, β , para el que se producen las mayores cargas aerodinámicas en la cubierta del mismo, para estudiar a este ángulo de carga máxima la influencia de los distintos parapetos.

En la segunda parte se analiza el efecto de parapetos verticales situados en el borde de la cubierta del modelo M3PRE. 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 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 M2PRE, y la otra utilizando el modelo M3PRE.

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

Hay por último una quinta parte donde la configuración en estudio está formada por cubiertas no planas (curvas).

B3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO EN LA CARGA AERODINÁMICA

Se ha realizado una primera serie de ensayos con el modelo M3PRE 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 la figuras B3.1).

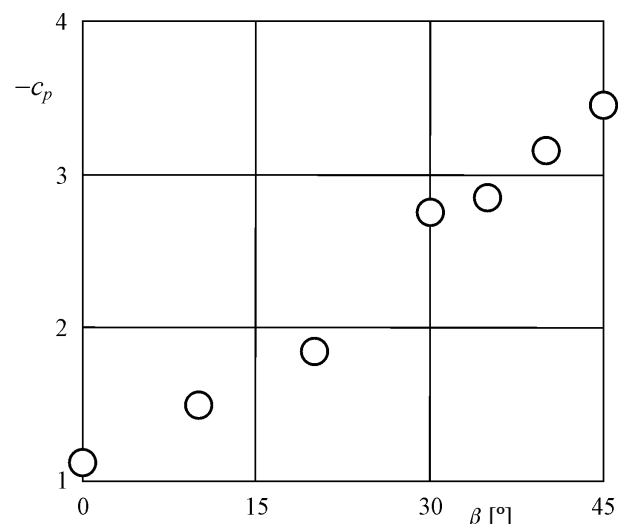
Para la realización de los ensayos se ha situado el modelo M3PRE en una de las plataformas giratorias existentes en las paredes de la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9. Se ha llevado a cabo un conjunto de siete ensayos con el modelo situado a otros tantos ángulos de incidencia respecto de la corriente. En la tabla B3.1 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. 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 B3.1. Succiones máximas medidas en la cubierta del modelo M3PRE, $-c_p$. 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 B2.4).

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 B3.1 se han representado en la figura B3.1. En esta figura se observa un comportamiento claramente lineal de la succión máxima medida en la cubierta del modelo, siendo el valor extremo de esta succión máxima el correspondiente a una incidencia del viento $\beta = 45^\circ$, como es lógico.

Figura B3.1. Variación de la succión máxima medida en la cubierta (tejado) del modelo M3PRE en función del ángulo de inclinación de la corriente incidente, β .



En la figura B3.2 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 torbellinos cónicos. Además, puede observarse que 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 donde se genera al aumentar el ángulo de incidencia de la corriente de aire.

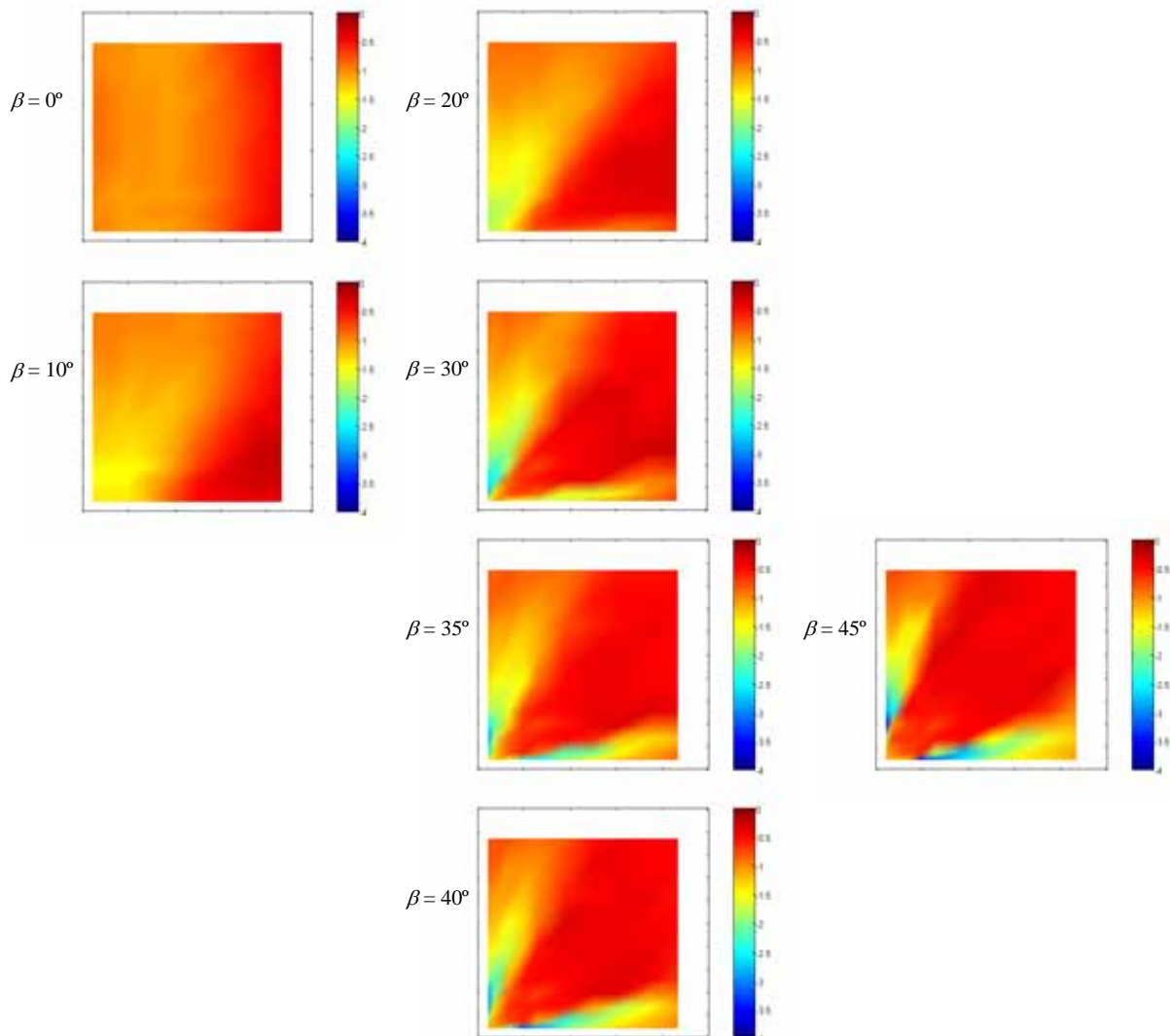


Figura B3.2. Variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3PRE, en función del ángulo de incidencia de la corriente, β .

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. A partir de cada distribución discreta de valores del coeficiente de presión, se interpola para hallar el valor del coeficiente en el área interior al mencionado conjunto de tomas, tras lo cual 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 representadas no llegan a los bordes de la cubierta del modelo. Se ha desechado 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.

Los resultados medidos indican que ambos torbellinos cónicos son parecidos cuando el viento está orientado según la bisectriz de la esquina de la cubierta ($\beta = 45^\circ$). Sin embargo, los valores medidos 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, las intensidades de los torbellinos cónicos que allí se generan no puedan ser exactamente iguales.

Tras esta primera serie de medidas se concluye que los torbellinos cónicos más intensos se generan para un ángulo de incidencia de la corriente respecto al modelo $\beta = 45^\circ$, lo que ha motivado que todos los ensayos concernientes al estudio de los parapetos en el modelo de ensayos M3PRE se hayan realizado con este mismo ángulo.

B4. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS VERTICALES SÓLIDOS Y POROSOS EN LA CARGA AERODINÁMICA

En la figura B4.1 se muestran esquemáticamente los parapetos utilizados en las medidas realizadas para evaluar la influencia de la altura y de la porosidad de parapetos verticales en la atenuación de la carga aerodinámica sobre un tejado plano. En la tabla B4.1 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).

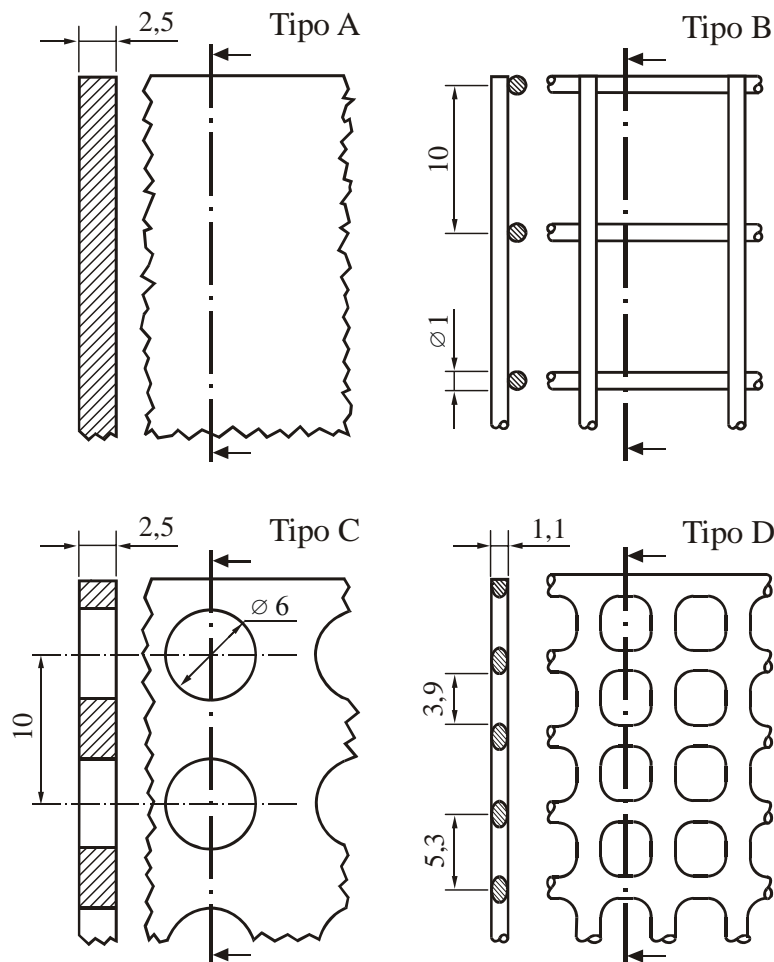


Figura B4.1. Esquema de los parapetos verticales utilizados para la experimentación con el modelo M3PRE. Los parapetos tipo "A" son una chapa de madera de 2,5 mm de espesor, los parapetos tipo "B" son una rejilla metálica de 10 mm de lado formada por hilos de 1 mm de espesor, los parapetos tipo "C" son una chapa de 2,5 mm de espesor con taladros de 6 mm de diámetro con sus centros dispuestos en una malla cuadrada cuyas celdillas tienen 10 mm de lado, y los parapetos tipo "D" están constituidos por una rejilla comercial de plástico de 1,1 mm de espesor.

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 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 intensidad de turbulencia $I_u = 10\%$.

Tabla B4.1. Características de los parapetos verticales utilizados en el modelo de ensayo M3PRE. Los campos de la tabla son los siguientes: el nombre del parapeto, 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

En la figura B4.2 se pueden observar las distribuciones del coeficiente presión medidas en la cubierta del modelo M3PRE en las dos condiciones de flujo 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 debidos a 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 B4.3 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. 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.

En la figura B4.3 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 del túnel A9, 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 (en el caso de las medidas de Kramer y otros (1979) no se dispone de tal información).

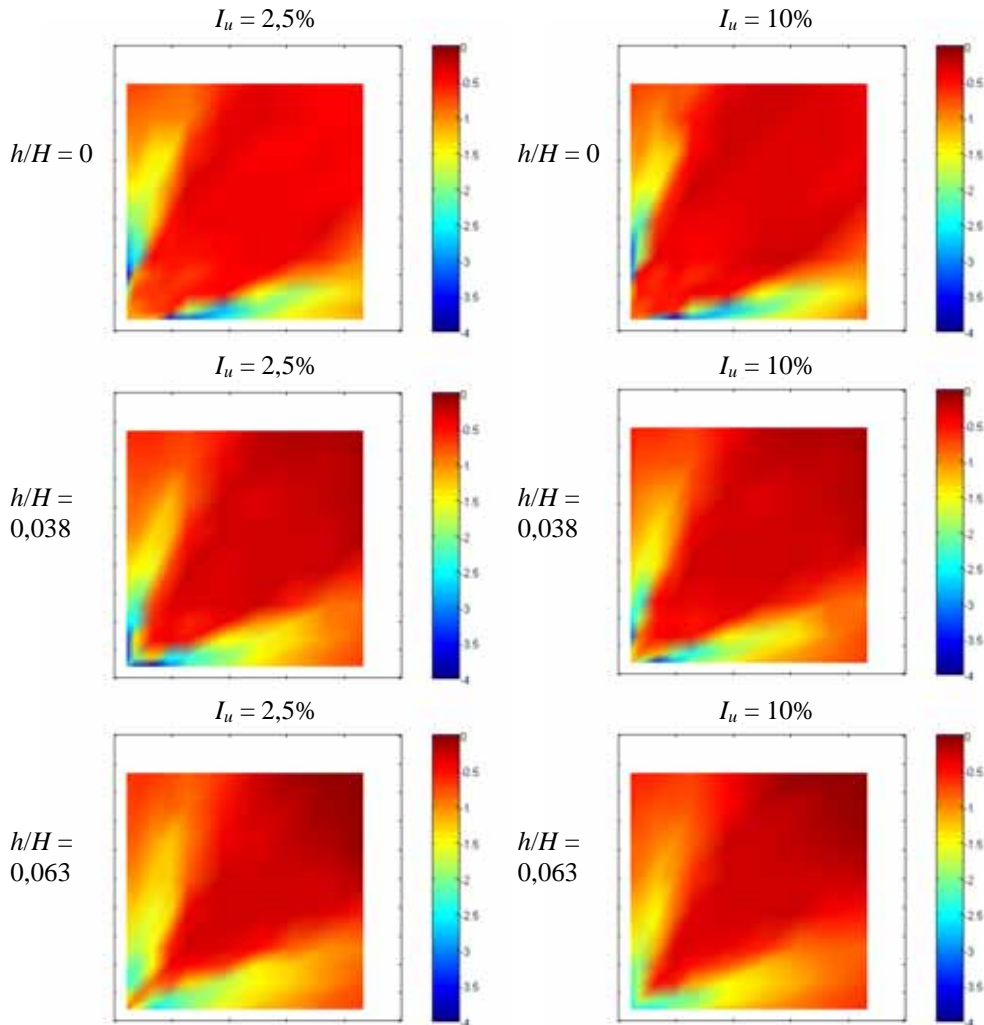


Figura B4.2. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente. En el modelo han sido instalados parapetos verticales sólidos de altura $h/H = 0$, $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,063$, y las medidas se han 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 ($I_u = 10\%$).

Los datos incluidos en la figura B4.3 son: la máxima succión media medida en la cubierta (Kind, 1988), la succión media en un punto cercano a la esquina de la cubierta (Baskaran y Stathopoulos, 1988; Kramer y otros, 1973), y la succión media máxima en una línea paralela y cercana a uno de los bordes de la cubierta (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 de la figura B4.3. 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. La 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.

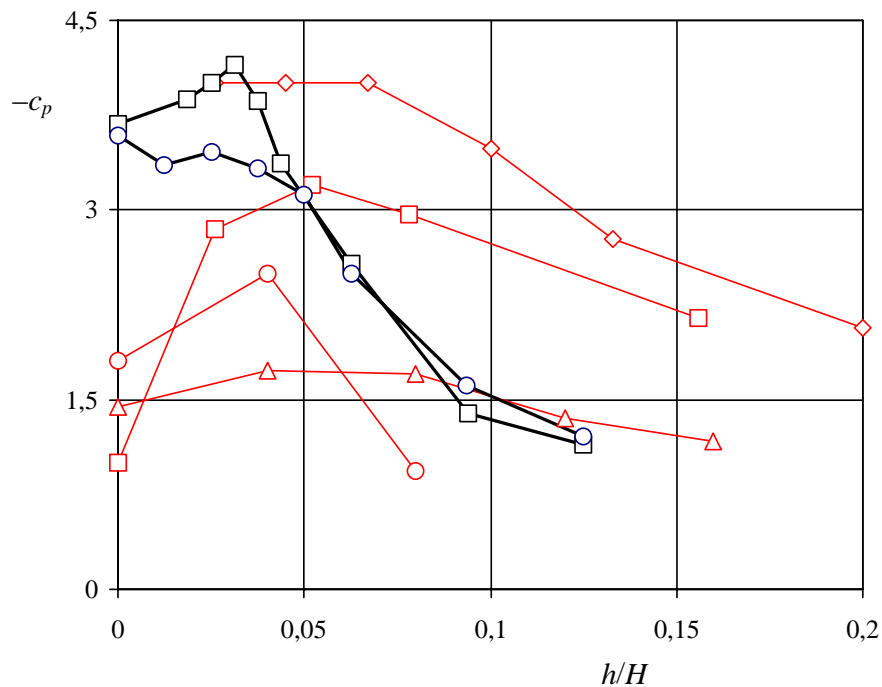


Figura B4.3. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3PRE en función de la altura adimensional de los parapetos, h/H , para dos condiciones distintas de flujo, $I_u = 2,5\%$ (cuadrados) e $I_u = 10\%$ (círculos). El modelo de ensayos está situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ 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); de Pindado y Meseguer (2003).

Existe otra posible causa que contribuye a las diferencias observadas en la figura B4.3. 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 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 el modelo M3PRE tienen un diámetro de 1 mm 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 B4.3 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; no se especifican los datos del modelo de ensayos empleado en el trabajo de Kramer y otros.

En las figuras B4.4, B4.5, B4.6 y B4.7 se muestran las distribuciones 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 estas figuras 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 B4.7 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, $-c_p \approx 3$.

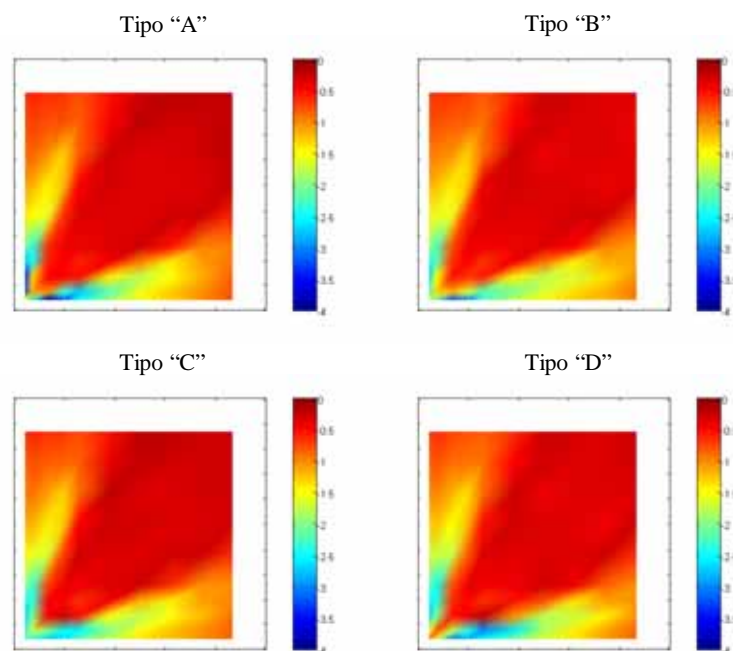


Figura B4.4. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,031$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad 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 $I_u = 2,5\%$.

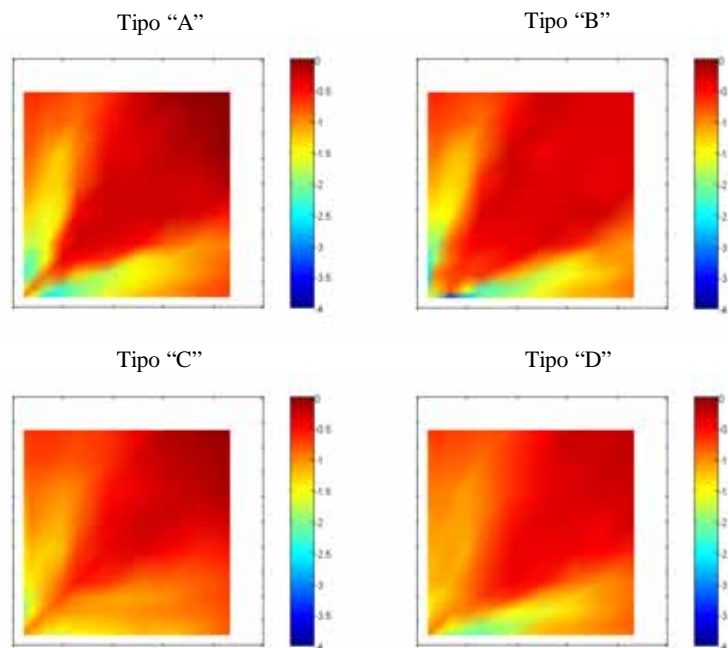


Figura B4.5. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,063$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad 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 $I_u = 2,5\%$.

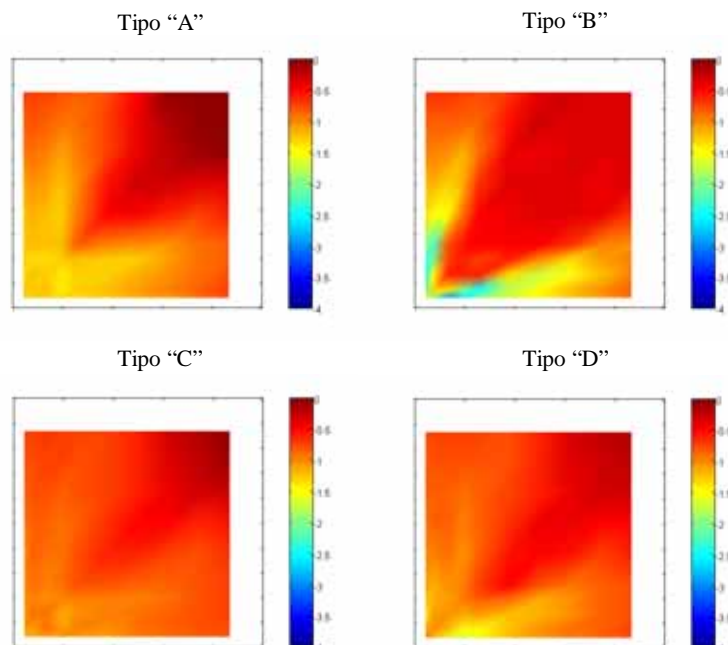


Figura B4.6. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,094$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad 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 $I_u = 2,5\%$.

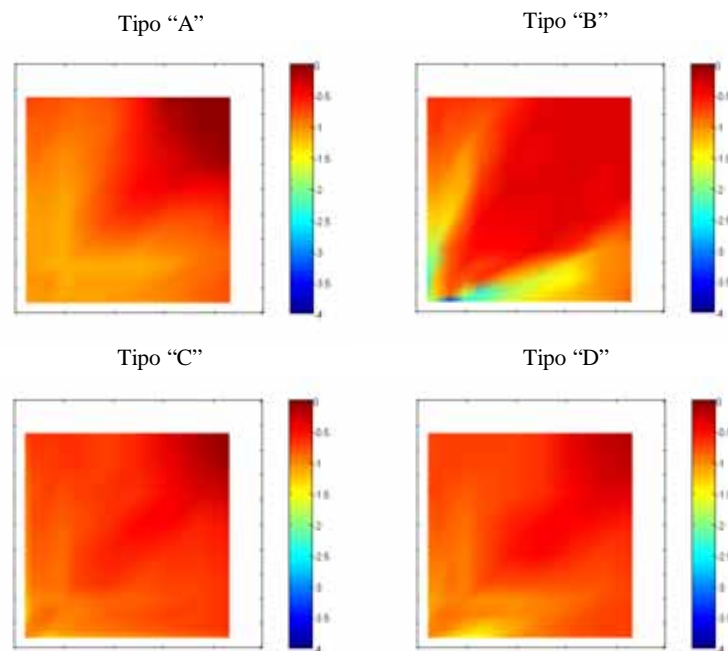


Figura B4.7. Distribución del coeficiente de presión en la cubierta del modelo M3PRE situado con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente, con parapetos verticales de altura $h/H = 0,125$. Tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), tipo "B" (porosidad alta, $\phi = 0,81$), tipo "C" (porosidad 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 B4.8 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 B4.4. 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 B4.8 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 B4.6 y B4.7). 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.

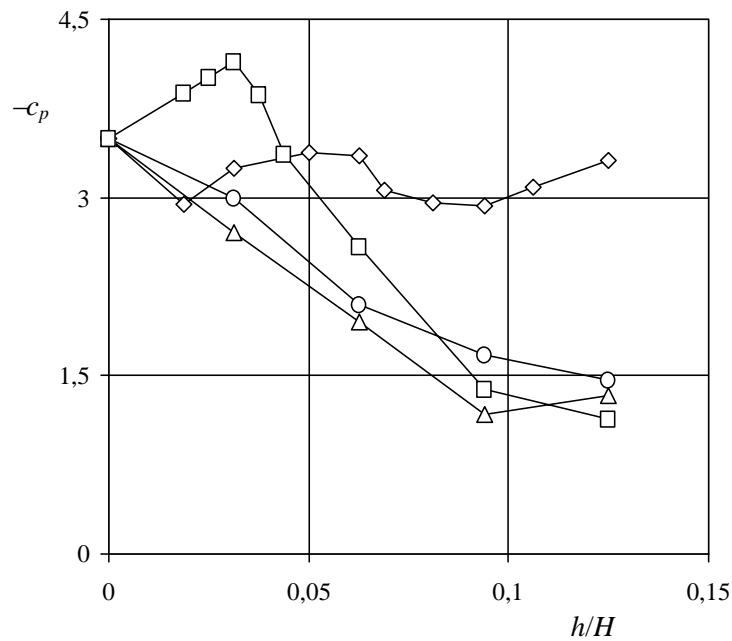


Figura B4.8. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3PRE con la altura adimensional de los distintos parapetos, h/H . Los cuadrados indican parapetos tipo "A" (sólidos, $\phi = 0$), los rombos indican parapetos tipo "B" ($\phi = 0,81$), los triángulos los del tipo "C" ($\phi = 0,28$), 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 B4.4 a B4.7 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 B4.6 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 B4.9), interacción que, como ya se ha hecho notar, es insuficiente para atenuar de una forma efectiva la acción de los torbellinos cónicos.

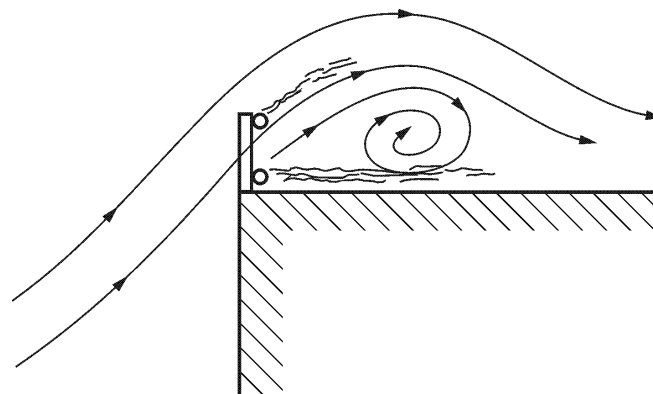


Figura B4.9. Esquema de la interacción de la estela que se forma detrás de los hilos horizontales que conforman los parapetos tipo "B" y un torbellino cónico.

B5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE PARAPETOS EN VOLADIZO EN LA CARGA AERODINÁMICA

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 (figura B5.1).

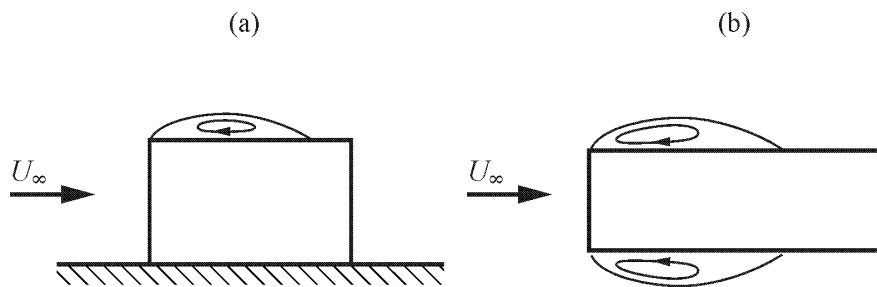


Figura B5.1. Esquema del flujo bidimensional desprendido en la cubierta de un edificio (a), y de un cilindro de base rectangular (b).

Para examinar de qué manera un voladizo puede 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 M2PRE. Este modelo tiene una 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, 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 (figura B5.2). 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 la figura B5.2 se incluyen esquemas de ambos tipos de voladizo). 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.

En la figura B5.3 se muestran los esquemas de los parapetos en voladizo empleados en los ensayos realizados con el modelo M3PRE. Estos parapetos han sido contrachapado 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 las aristas de la 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 B5.1 se incluyen las alturas con las que cada tipo de parapeto ha sido ensayado.

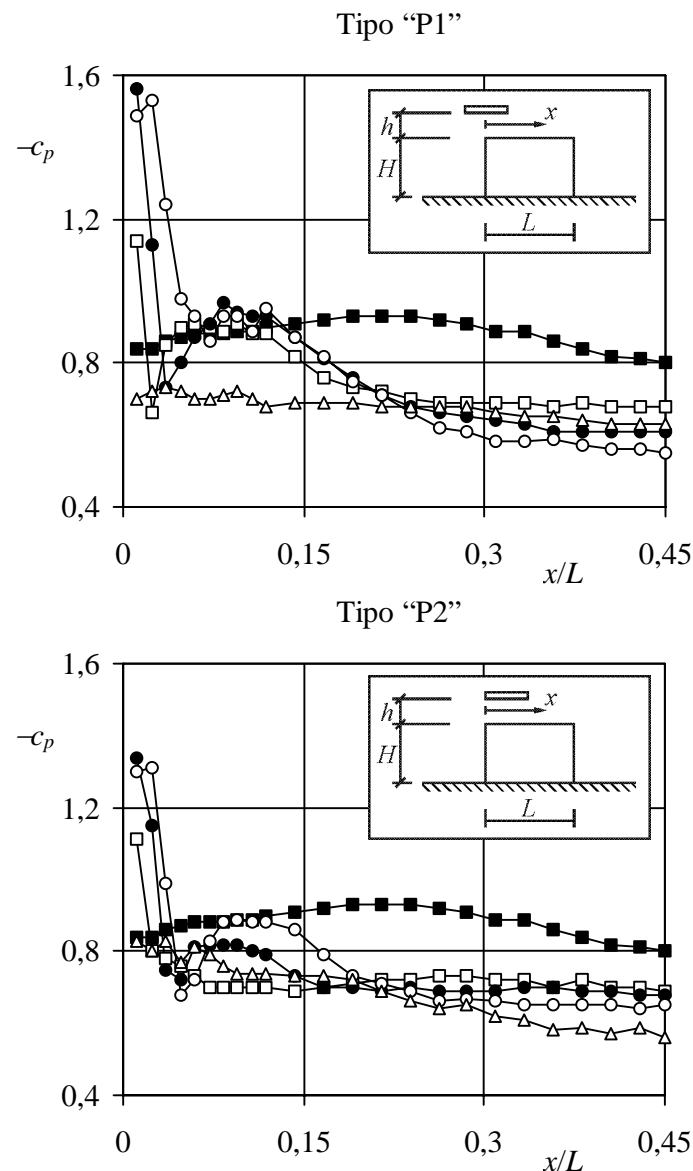


Figura B5.2. Variación de la succión medida en la cubierta del modelo M2PRE con la distancia adimensional al borde anterior, x/L , con los parapetos tipo "P1" y tipo "P2" instalados. Los símbolos indican la particularidad del ensayo: medidas sin parapetos (cuadrados negros), $h/H = 0,025$ (cuadrados 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 puede concluir 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.

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 M3PRE con una orientación $\beta = 45^\circ$ respecto a la corriente incidente. El nivel de turbulencia de la corriente en el túnel aerodinámico 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.

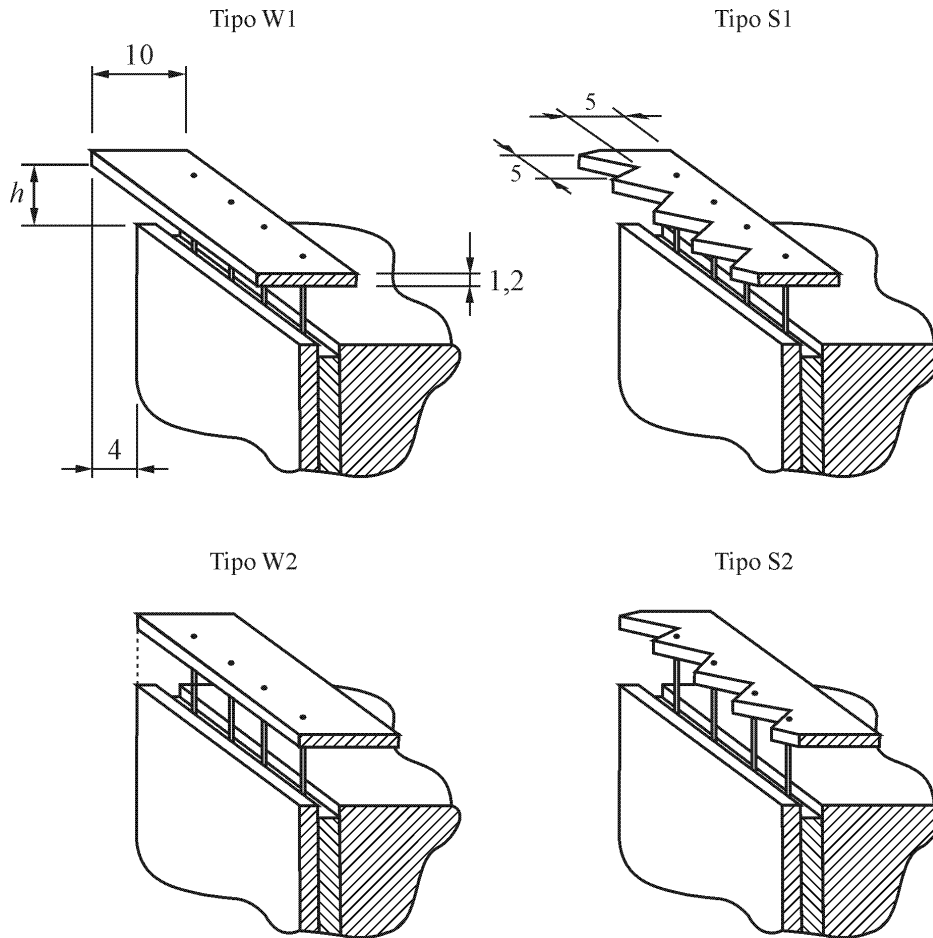


Figura B5.3. Esquema acotado de los parapetos en voladizo utilizados para la experimentación con el modelo M3PRE. Cotas en milímetros.

Tabla B5.1. Características de los parapetos en voladizo utilizados en el modelo de ensayo M3PRE. Los campos de la tabla son el identificador de los parapetos 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 B5.4 y B5.5 se muestra la variación de la distribución del coeficiente de presión, c_p , en la cubierta del modelo de ensayos M3PRE 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.

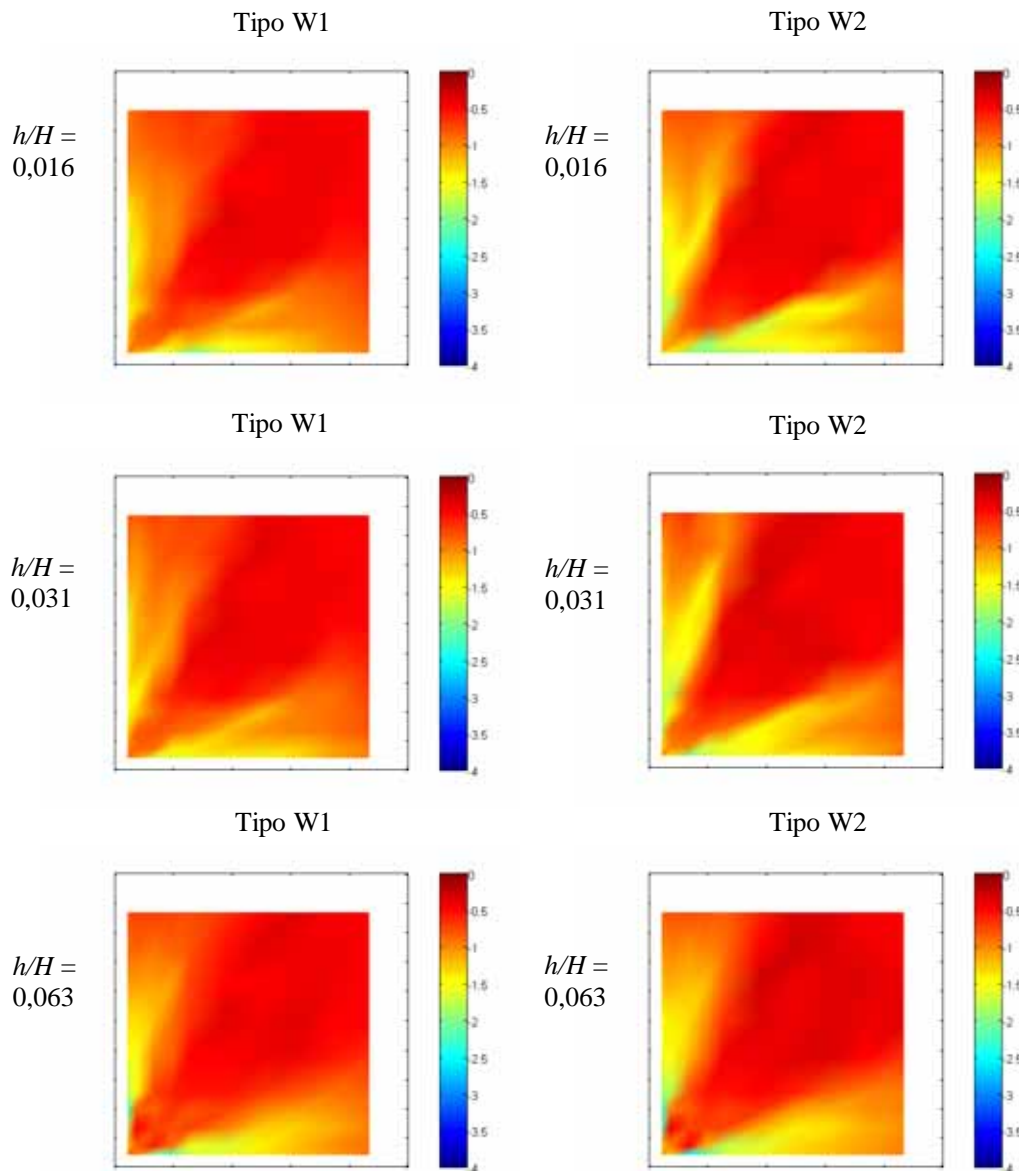


Figura B5.4. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3PRE con los parapetos tipo "W1" y tipo "W2" de alturas $h/H = 0,016$, $h/H = 0,031$ y $h/H = 0,063$.

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 obviedad, 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 B5.6 se representa la distribución del coeficiente de presión, c_p , medida en la cubierta del modelo M3PRE 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 con esta línea de trabajo.

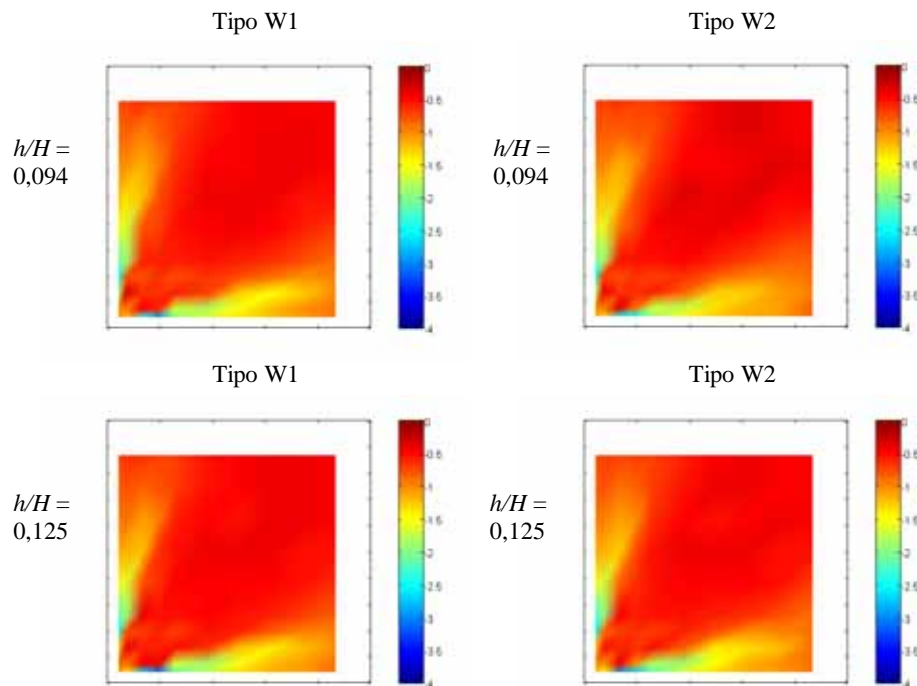


Figura B5.5. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3PRE con los parapetos tipo "W1" y tipo "W2" de alturas $h/H = 0,094$ y $h/H = 0,125$.

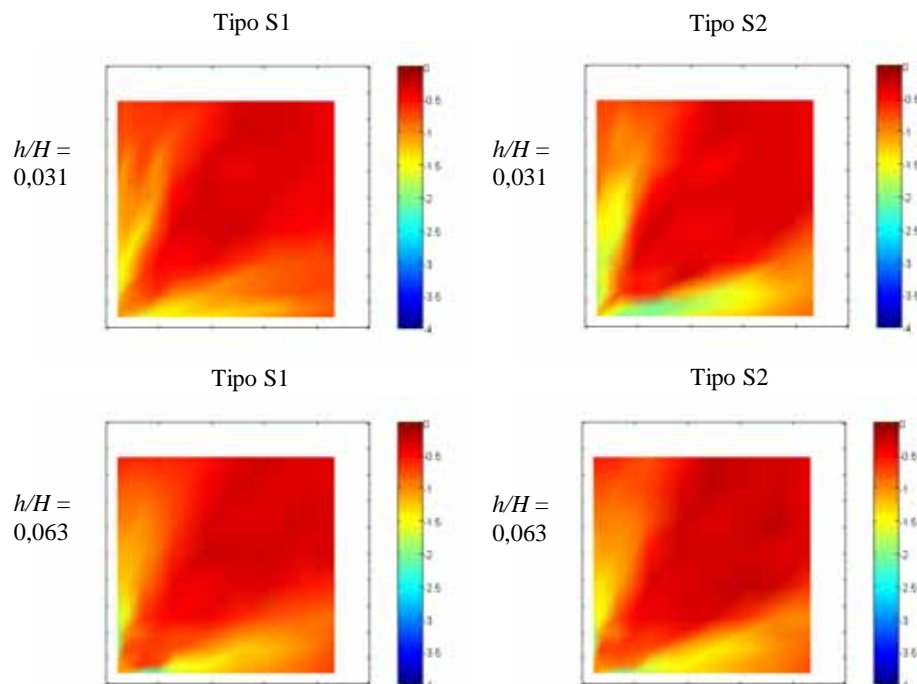


Figura B5.6. Distribución del coeficiente de presión, c_p , medido en la cubierta del modelo M3PRE con los parapetos tipo "S1" y tipo "S2" de alturas $h/H = 0,031$ y $h/H = 0,063$.

En la figura B5.7 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 observar, 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 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 es de $-c_p \approx 3$, 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 apartado B7. 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.

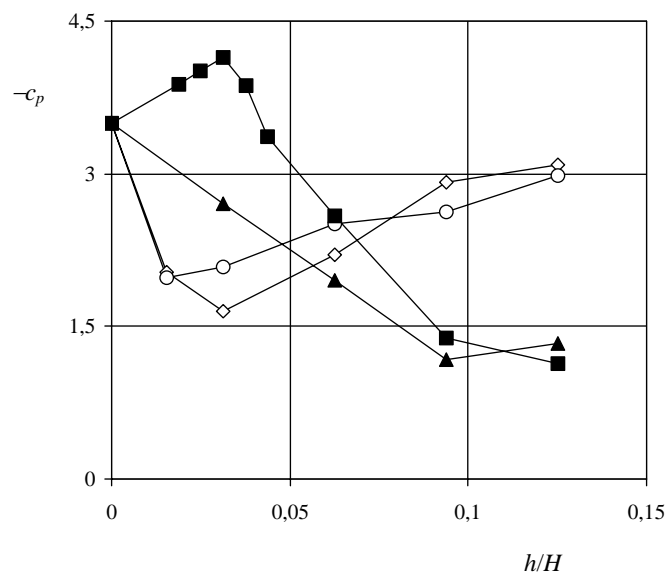


Figura B5.7. Variación de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo M3PRE con la altura adimensional de los parapetos instalados en sus bordes, h/H . Los rombos indican los parapetos tipo "W1", los círculos indican los parapetos tipo "W2", los cuadrados negros indican los parapetos 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 $I_u = 2,5\%$.

B6. IMÁGENES DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA DEL EFECTO DE LOS PARAPETOS

En las figuras B6.1 y B6.4 a B6.8 se muestran las visualizaciones del flujo sobre la cubierta del modelo MTERM 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. La intensidad de la turbulencia, medida a la altura de la cubierta del modelo, ha sido $I_u = 2,5\%$. 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.

Como se expone en Yamada y otros (1996), 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.

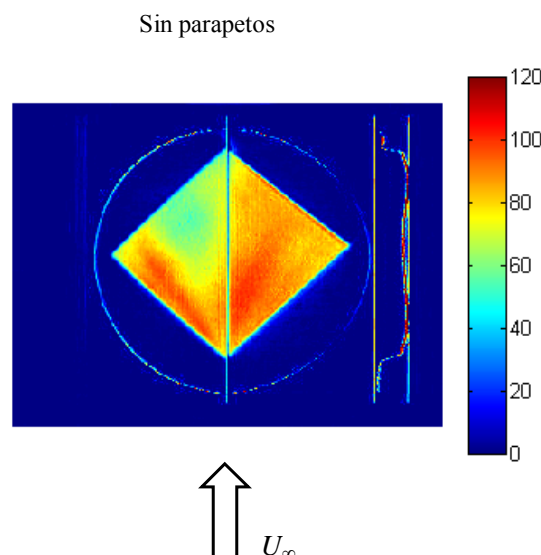


Figura B6.1. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos MTERM sin ningún tipo de parapeto instalado. La escala de colores es proporcional al calor transmitido, es decir, el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

En la imagen correspondiente a la cubierta del modelo sin ningún tipo de parapeto instalado en ella (figura B6.1) se aprecia la existencia en estos ensayos de una clara asimetría. Se puede percibir que el Torbellino 1 (el de la izquierda) está claramente definido y situado en las cercanías del borde de la cubierta. Sin embargo, esto no ocurre con el Torbellino 2 (el de la derecha), 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 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 perpendiculares a la corriente incidente (véase la figura B6.2). 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 cubierta. Sólo se ha medido la velocidad en el caso de la cubierta sin parapeto alguno.

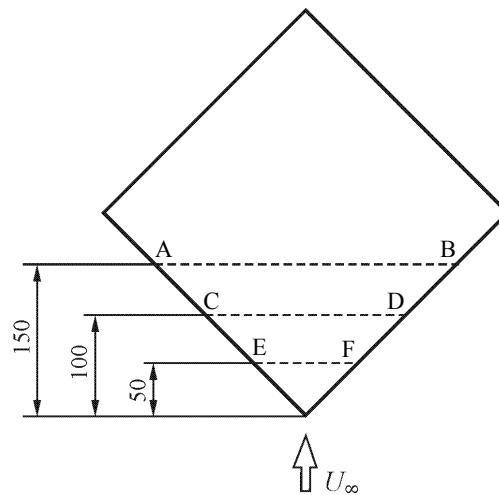


Figura B6.2. Posición de las líneas AB, CD y EF, donde se ha medido la velocidad sobre la cubierta del modelo MTERM. Las medidas se han realizado a una altura de 6 mm sobre la cubierta. Cotas en milímetros.

En la figura B6.3 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 B6.2. 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 B6.1 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 B6.3 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 B6.1 (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 el Torbellino 2.

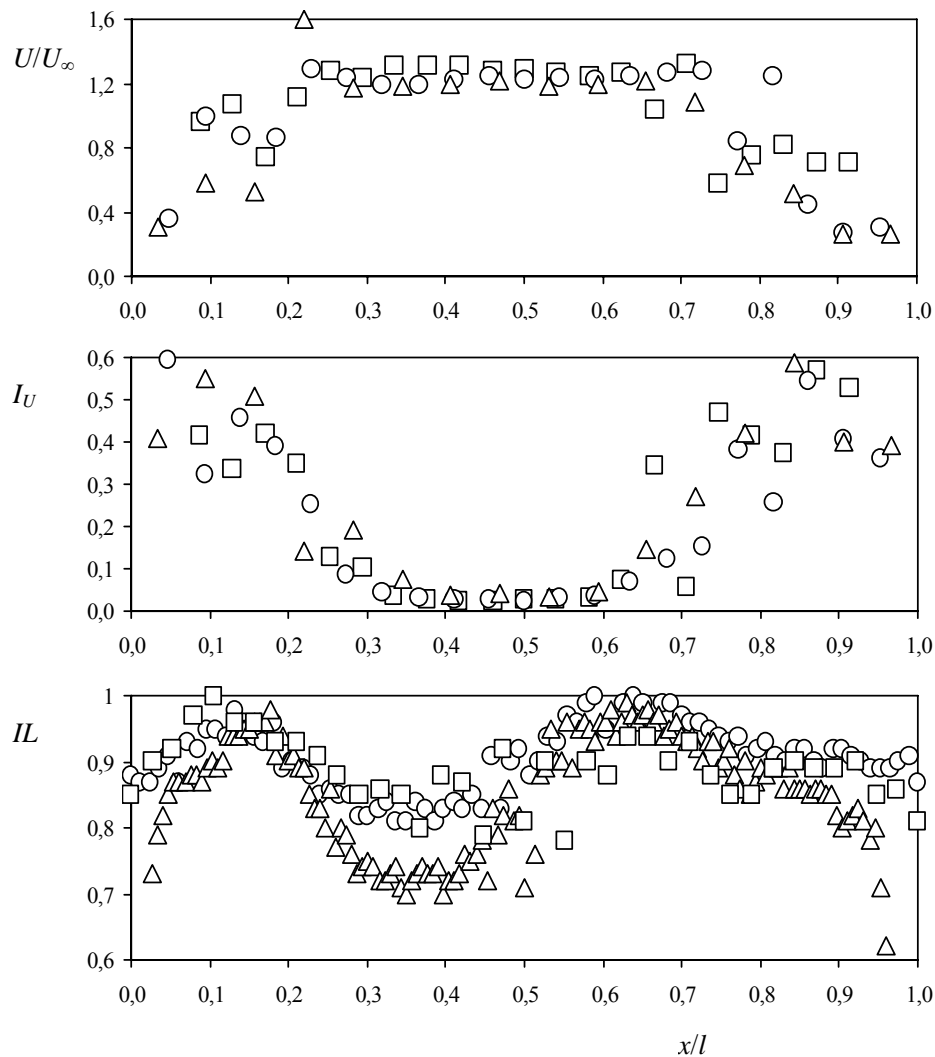
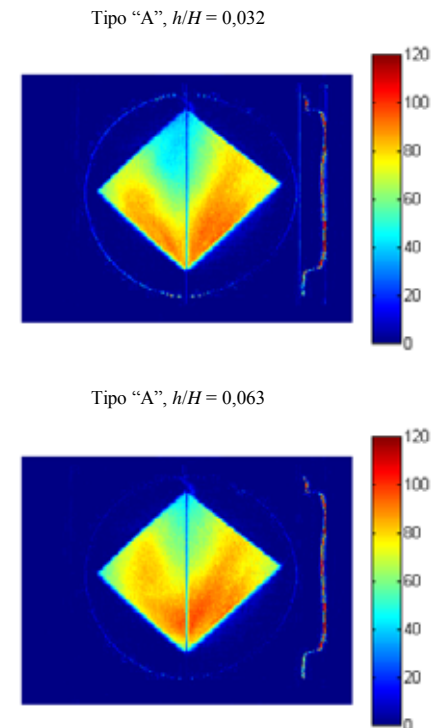


Figura B6.3. Variación con la distancia adimensional x/l de la velocidad, U/U_∞ , la intensidad de la turbulencia, I_U , y la intensidad de la luz visualizada, IL , a lo largo de las líneas de la cubierta del modelo MTERM definidas en la figura B6.2. Los cuadrados corresponden a la línea EF, los círculos a la línea CD, y los triángulos a 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 B6.4, 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

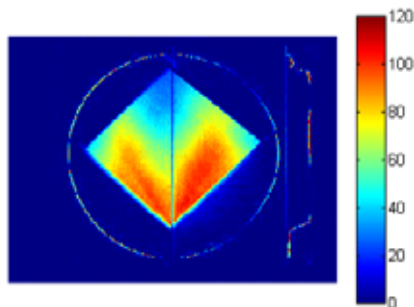
o con los parapetos de menor altura ($h/H = 0,032$). Esto no puede ser achacado a un mayor nivel de turbulencia ya que la configuración es muy similar en los tres casos y, dado que la porosidad de los parapetos es nula, no existe ningún elemento que introduzca vorticidad de pequeña escala en el flujo 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.

Figura B6.4. Calor transmitido en la cubierta del modelo de ensayos MTERM con parapetos tipo "A", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido: el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

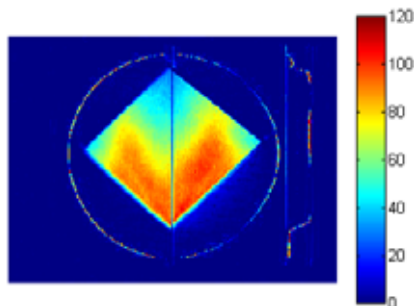


Las imágenes correspondientes a la transmisión de calor en la cubierta del modelo de ensayos con los parapetos porosos (tipos "B", "C" y "D"), incluidas en las figuras B6.5, B6.6 y B6.7, son muy semejantes entre sí, observándose levemente una mayor transmisión de calor en los parapetos de mayor porosidad (tipo "B"). Esto está de acuerdo con las medidas de presión hechas en el modelo de ensayos M3PRE, ya que estos parapetos son, de entre los parapetos porosos ensayados con el modelo MTERM, los que menos disminuyen la succión provocada por los torbellinos cónicos en la

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



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



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.

Figura B6.5. Calor transmitido en la cubierta del modelo MTERM con parapetos tipo "B", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido: el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

La variación, con la altura de los parapetos, de la distribución de calor en el caso de los parapetos en voladizo (tipo "W1"), indica, como se observa en la figura B6.8, un comportamiento muy similar al analizado mediante el estudio de la distribución de presión en el modelo de ensayos M3PRE. 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.

Figura B6.6. Calor transmitido en la cubierta del modelo MTERM con parapetos tipo "C", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido: el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

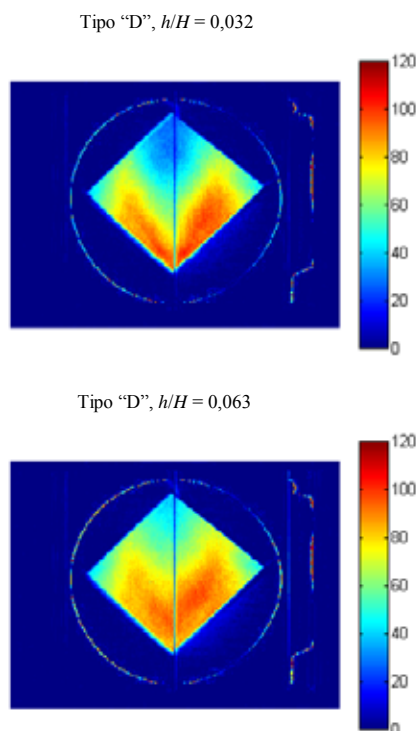
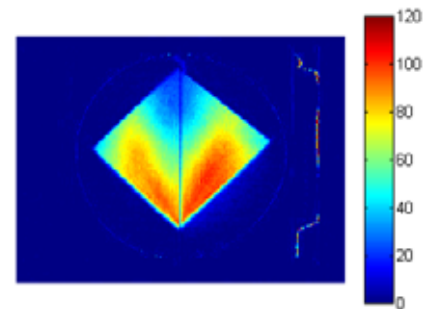


Figura B6.8. Calor transmitido en la cubierta del modelo MTERM con parapetos tipo "W1", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido: el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

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



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

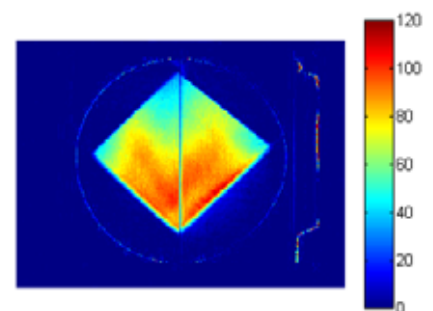
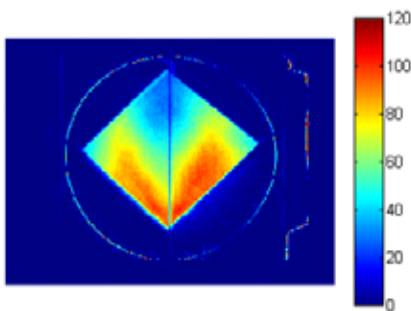
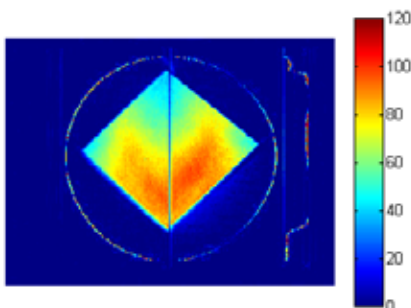


Figura B6.7. Calor transmitido en la cubierta del modelo MTERM con parapetos tipo "D", de alturas $h/H = 0,032$ y $h/H = 0,063$. La escala de colores es proporcional al calor transmitido: el azul oscuro indica una transmisión de calor nula y el rojo oscuro una transmisión de calor alta.

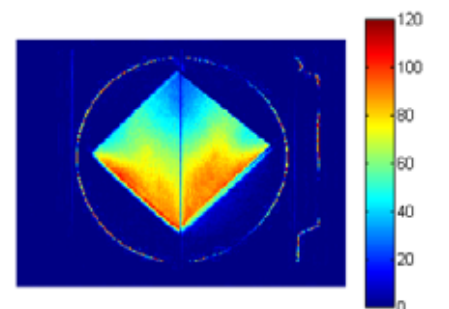
Tipo "D", $h/H = 0,032$



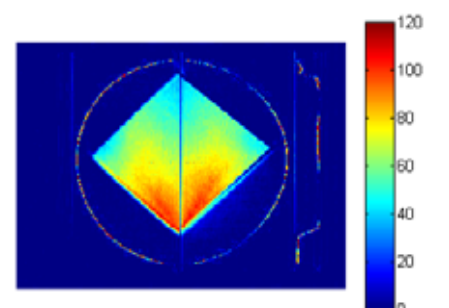
Tipo "D", $h/H = 0,063$



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



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



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.

En Yamada y otros (1996), y en Sasaki y otros (1997) se establece 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 al 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.

B7. TORBELLINOS CÓNICOS EN UNA CUBIERTA CURVA

En este apartado se presentan los resultados relativos a cubiertas curvas. 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, 2002 a), que se muestra en la figura B7.1. El modelo 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 (Pindado y otros, 2004, Franchini y otros, 2005).

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 B7.2 y B7.3. 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, las marcadas en negro en la figura B7.4; posteriormente se realizó una segunda serie de medidas con otras 57 tomas de presión adicionales para aumentar la resolución espacial, también instaladas en la cubierta (las marcadas en blanco en la figura B7.4).

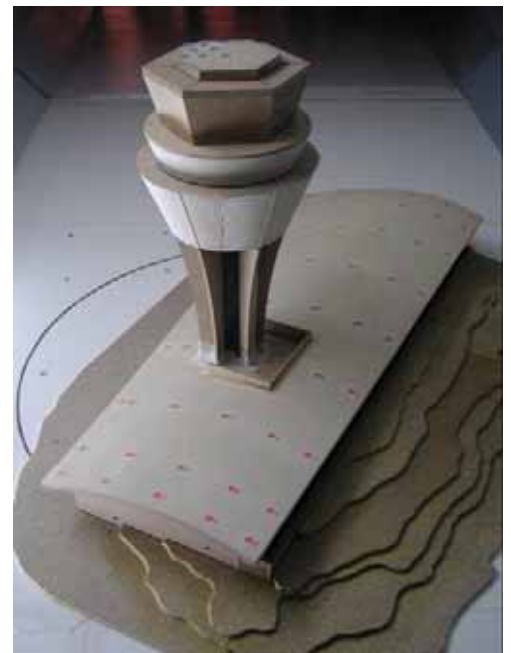


Figura B7.1. Modelo de ensayos utilizado para la medida de las cargas del viento en el conjunto de edificios de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte (Meseguer y otros, 2002).

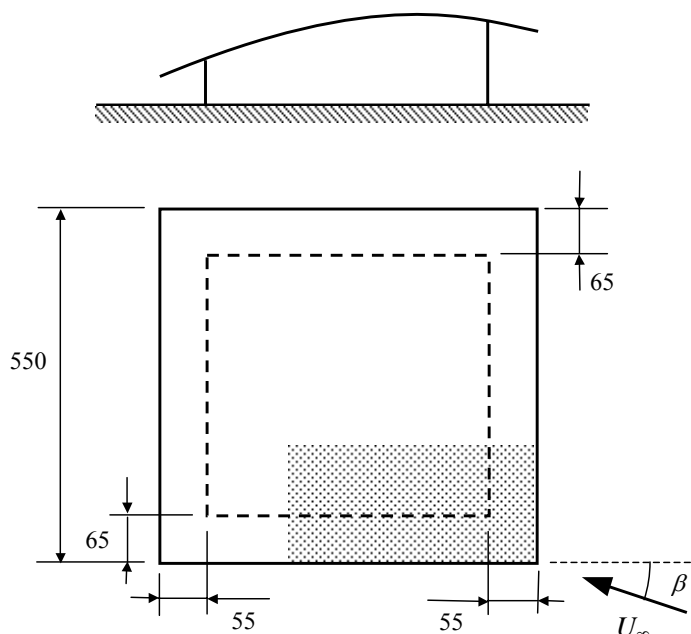


Figura B7.2. Esquema del modelo de ensayos. El área instrumentada de la cubierta está sombreada en la planta del dibujo. La curvatura de la cubierta se define en la figura A3.3. Cotas en milímetros.

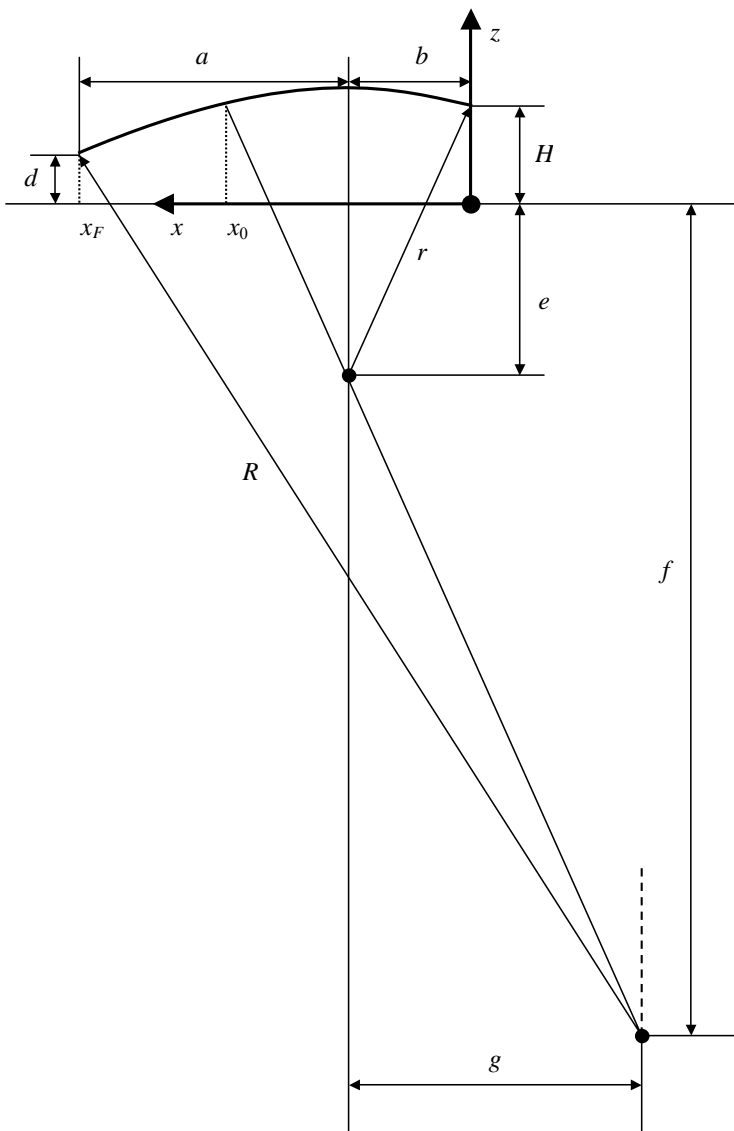
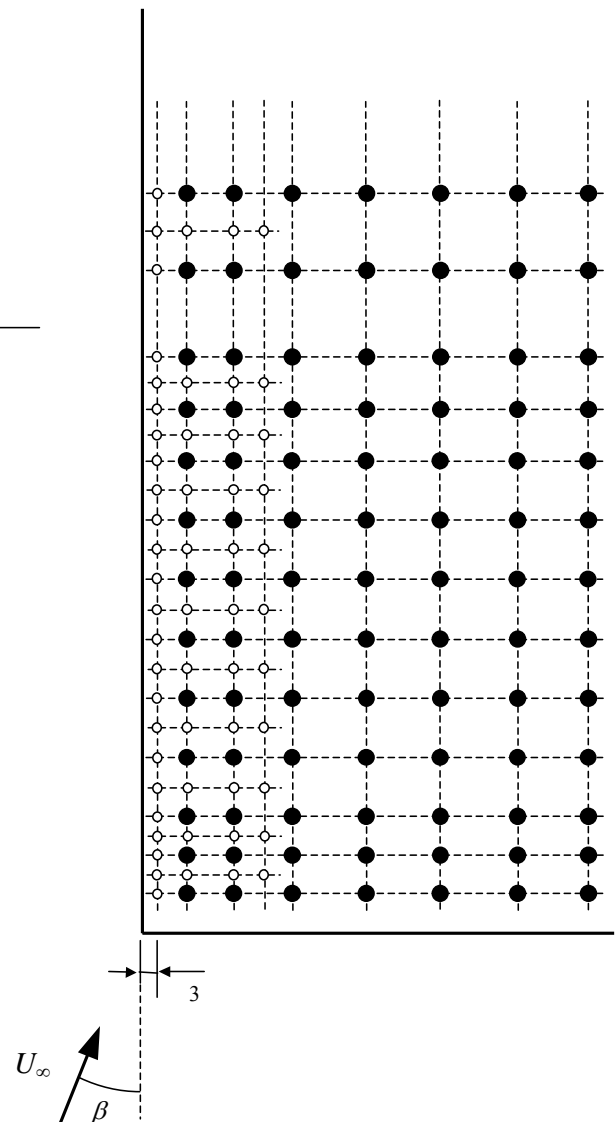


Figura B7.3. Definición de la cubierta del modelo de ensayos. Las cotas, en mm, son $a = 397,4$; $b = 150$; $H = 118,5$; $d = 37,6$; $e = 325$; $f = 1601,3$; $g = 293,2$; $R = 1778,5$; $r = 469$; $x_0 = 234,5$; $x_F = 547,5$.

Figura B7.4. Situación de las tomas de presión en la cubierta del modelo de ensayos. Las indicadas con círculos negros son las tomas iniciales, y con círculos blancos las añadidas posteriormente. Cotitas 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 B7.5 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 B7.3), 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".

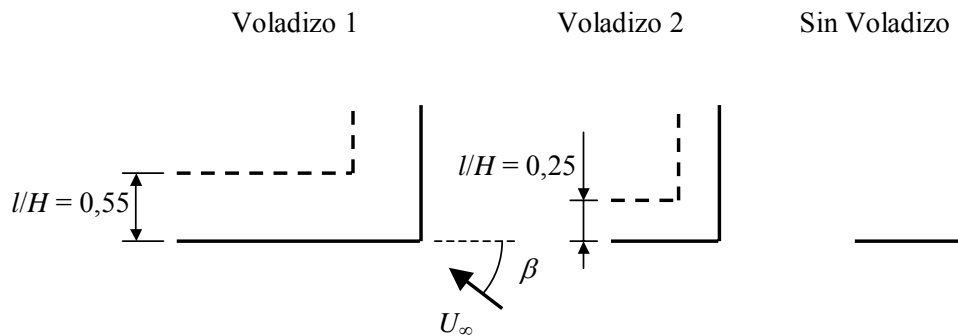


Figura B7.5. Planta de los tres casos de voladizo estudiados.

En la figura B7.6 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 B7.6 se pueden apreciar dos máximos, uno en torno a $\beta = 45^\circ$ y otro en torno a $\beta = 60^\circ$. Se puede ver 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 B7.7). 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.

En las figuras B7.8 y B7.9 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 B7.2. 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 B7.8 y B7.9.

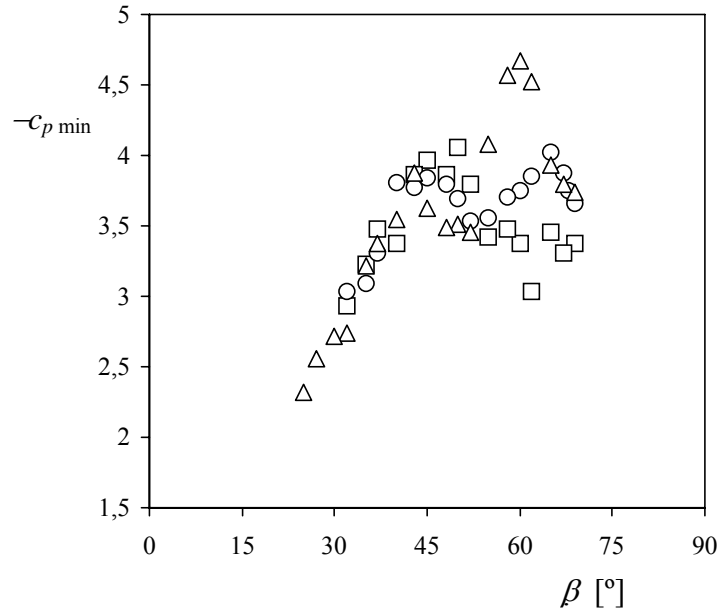


Figura B7.6. Máximas succiones, $-\text{c}_p \text{ min}$, medidas en la cubierta del modelo de ensayos en función del ángulo de incidencia de la corriente, β . Los símbolos representan los siguientes casos de ensayo: "Voladizo 1" (cuadrados), "Voladizo 2" (círculos), y "Sin Voladizo" (triángulos).

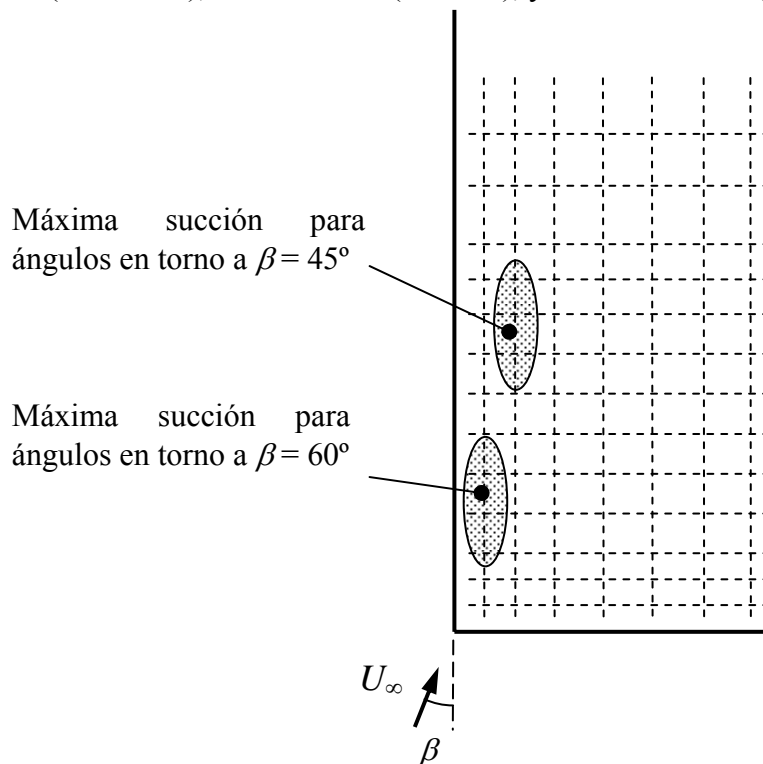


Figura B7.7. Zonas en de la cubierta del modelo en las que se han medido las succiones más altas.

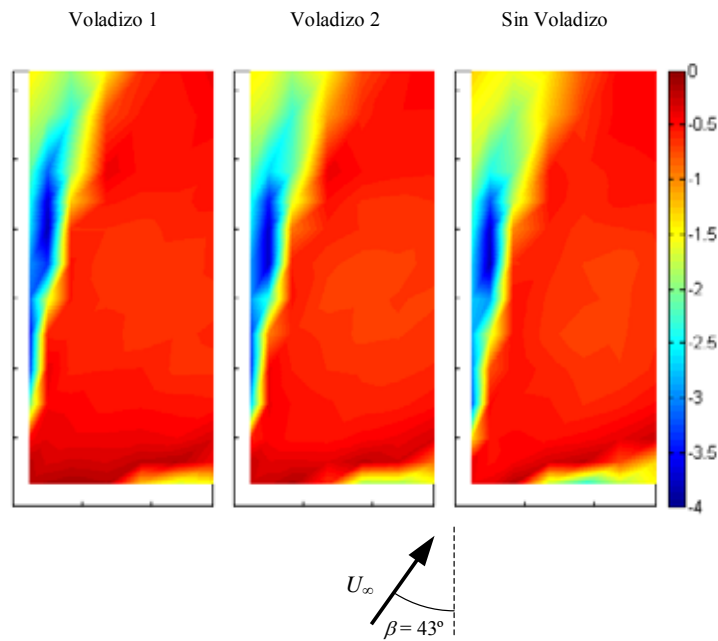


Figura B7.8. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos con las tres longitudes del voladizo de la cubierta (Voladizo 1: $l/H = 0,55$, Voladizo 2: $l/H = 0,25$ y Sin Voladizo: $l/H = 0$), con un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 43^\circ$.

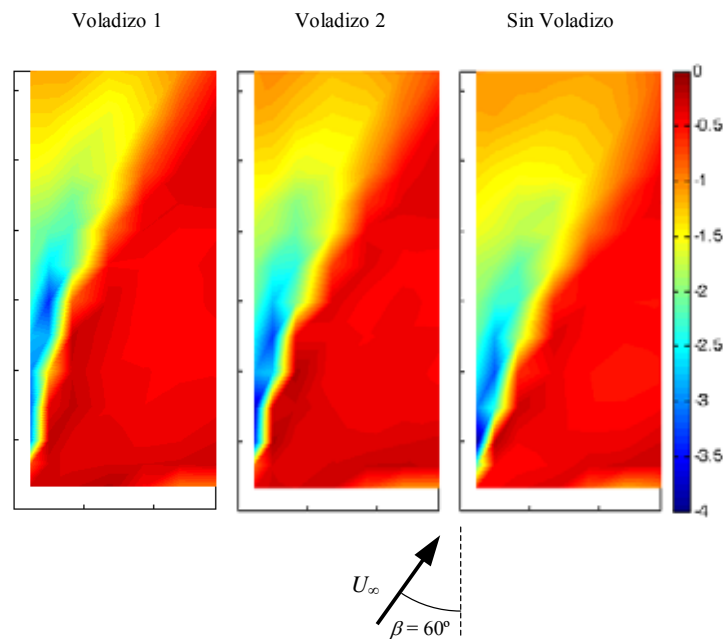


Figura B7.9. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos con las tres longitudes del voladizo de la cubierta (Voladizo 1: $l/H = 0,55$, Voladizo 2: $l/H = 0,25$ y Sin Voladizo: $l/H = 0$), con un ángulo de incidencia de la corriente $\beta = 60^\circ$.

En la figura B7.10 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 ($H = 118,5$ mm).

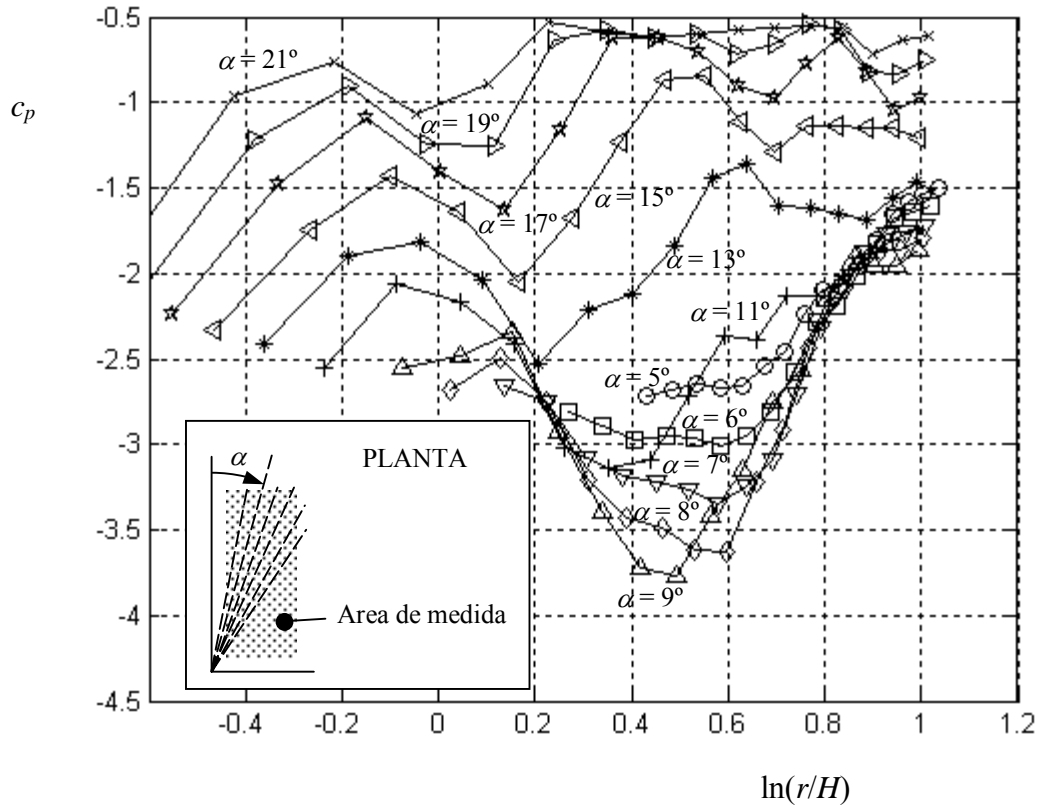


Figura B7.10. Variación del coeficiente de presión a lo largo de diversas líneas $\alpha = \text{cte.}$ trazadas en la vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido sin voladizo y con un ángulo de incidencia del viento igual a $\beta = 43^\circ$.

En la segunda serie de medidas, con mayor densidad de tomas de presión, 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 B7.11. Como se ha mencionado, en este caso se han situado tomas de presión adicionales en la cubierta para tener una mayor definición en 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 B7.12 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



Figura B7.11. Cubierta del modelo de ensayos con el parapeto en voladizo situado sobre el borde curvo de la cubierta del mismo.

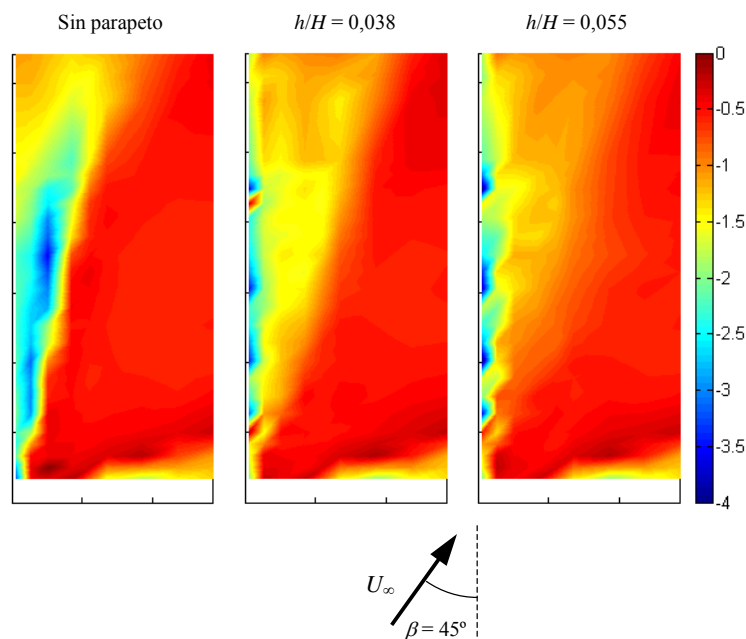


Figura B7.12. Vista en planta de la distribución del coeficiente de presión medido en el modelo de ensayos sin el parapeto en voladizo instalado, y con el mencionado parapeto instalado a las alturas $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,055$. Se ha marcado en trazo negro el contorno de la cubierta.

En la tabla B7.1 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.

Tabla B7.1. 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

Las conclusiones de los ensayos llevados a cabo con la cubierta curva son que, 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 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.

Véase también Franchini y otros (2005), donde se presenta información adicional sobre este tipo de parapetos en cubiertas curvas, considerando cubiertas de diferente curvatura.

B8. REFERENCIAS

- ASCE 7-98, 2000, Minimum design loads for buildings and other structures, Revision of ANSI/ASCE 7-95, American Society for Civil Engineers.
- Bächlin, W., Plate, E.J., Kamarga, A., 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*, Vol. 11, pp. 63-74.
- Balaras, C.A., Argiriou, A.A., 2002, Infrared thermography for building diagnostics, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 171-183.
- Banks, D., Meroney, R.N., 2001, A model of roof-top surface pressures produced by conical vortices: Model development, *Wind and Structures, An International Journal*, Vol. 4 N° 3.
- Banks, D., Meroney, R.N., Sarkar, P.P., Zhao, Z. Wu, F., 2000, Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 84, pp. 65-85.
- Baskaran, A., Stathopoulos, T., 1988, Roof corner wind loads and parapet configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 29, pp. 79-88.
- Castro, I.P., Robins, A.G., 1977, The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 79, pp. 307-335.
- Cook, N.J., 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*, Vol. 10, pp. 315-341.
- Cook, N.J., 1985, *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification*, Butterwords, London.
- Cook, N.J., 1990, *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures*, Butterwords, London.
- Cook, N.J., Chan, P., Wu, D., Holder M.A., 2002, Towards quantitative visualisation of transient surface flow on building models using infrared thermography, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp., 663-673.
- Crosby, C.P., Mathews, E.H., Du Plessis, J.P., 1990, The numerical prediction of air flow through and around permeable windbreaks ad buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 35, pp. 213-224.
- De Luca, L., Guglieri, G., Cardone, G., Carlomagno, G.M., 1995, Experimental analysis of surface flow on a delta wing by infrared thermography, *AAIA Journal*, Vol. 33 n° 8, August 1995.
- Deng, Q., Gursul, I., 1996, Effect of leading-edge flaps on vortices and vortex breakdown, *Journal of Aircraft*, Vol. 33, pp. 1079-1086.
- Dyrbye, C., Hansen, S.O., 1997, *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- 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.
- Franchini, S., Pindado, S., Meseguer, J., Sanz-Andrés, A., 2005, A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 639-650.
- Gumley, S.J., 1983, A detailed design method for pneumatic tubing systems, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 13, pp. 441-452.
- Haan Jr F.L., Kareem, A., Szewczyk, A.A., 1998, The effects of turbulence on the pressure distribution around a rectangular prism, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77-78, pp. 381-392.
- Hoxey, R., Robertson, A., Short, L., 1998, The role of corner vortices in the design of structures, *Structural Engineering International*, Vol. 1/98, pp. 50-55.
- Irwin, H.P.A.H., Cooper, K.R., Girard, R. 1979, Correction of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 5, pp. 93-107.
- Johnson, F.T., Tinoco, E.N., Lu, P., Epton, M.A., 1980, Three-dimensional flow over wings with leading-edge vortex separation, *AAIA Journal*, Vol. 18, pp. 367-380.
- Kawai, H., 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*, Vol. 69-71, pp. 579-588.
- Kawai, H., 2002, Local peak pressure and conical vortex on building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 251-263.
- Kawai, H., Nishimura, G., 1996, Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 60, pp. 211-225.
- Kind, R.J., 1986, Worst Suctions near edges of flat rooftops on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 25, pp. 31-47.
- Kind, R.J., 1988, Worst Suctions near edges of flat rooftops with parapets, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 31, pp. 251-264.
- Kopp, G.A., Surry, D., Mans, C., 2005 a, Wind effects of parapets on low buildings: Part 1. Basic aerodynamics and local loads, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 817-841.
- Kopp, G.A., Surry, D., Mans, C., 2005 b, Wind effects of parapets on low buildings: Part 2. Structural loads, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 843-855.
- Kopp, G.A., Surry, D., Mans, C., 2005 c, Wind effects of parapets on low buildings: Part 3. Parapet loads, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 857-872.

- Kopp, G.A., Surry, D., Mans, C., 2005 d, Wind effects of parapets on low buildings: Part 4. Mitigation of corner loads with alternative geometries, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 873-888.
- Kramer, C., Gerhardt, H.J., 1991, Wind pressures on roofs of very low and very large industrial buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 38, pp. 285-295.
- Kramer, C., Gerhardt, H.J., Scherrer, S., 1979, Wind pressure on block-type buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 4, pp., 229-242.
- Kumar, K.S., Stathopoulos, T., 1998, Power spectra of wind pressures on low building roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 665-674.
- Letchford, C.W., Marwood, R., 1997, On the influence of v and w component turbulence on roof pressures beneath conical vortices, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71, pp. 567-577.
- Li, Q.S., Melbourne, W.H., 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*, Vol. 54-55, pp. 313-323.
- Lin, J.-X., Surry, D., Tieleman, H.W., 1995, The distribution of pressure near roof corners of flat roof buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 56, pp. 235-265.
- Lythe, G., Surry, D., 1983, Wind loading of flat roofs with and without parapets, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 13, pp. 75-94.
- Meinders, E.R., Hanjalic, K., 1999, Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 255-267.
- Meseguer, J., Fairbanks, B., Montero, E., Pindado, S., 2002 a, La nueva torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, No. 2/2002, pp. 13-20.
- Meseguer, J., Pindado, S., 2002, Túneles aerodinámicos para medida de las cargas del viento, *Mundo Científico*, No. 235, pp.70-75.
- Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J. M., S. Pindado, 2002 b, Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil, *Revista de Obras Públicas*, Marzo 2002, No. 3419, pp. 35-43.
- Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J.M., Pindado, S., 2001, *Aerodinámica Civil. Cargas de viento en edificaciones.*, McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid.
- Michiels, K., Pindado, S., 1994, Flow visualization experiments in water tunnel W. T. 1, *Stagiaire Report 1994-43*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- Mitchell, A.M., Délerly, J., 2001, Research into vortex breakdown control, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 37, pp. 385-418.
- Okuda, Y., Katsura, J., Kawamura, S., 1997, Local severe suction on the side of a prism model on a field, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 72, pp. 23-32.

- Park, C.-W., Lee, S.-J., 2000, The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 84, pp., 237-244.
- Payne, F.M., Ng, T.T., Nelson, R.C., Schiff, L.B., 1988, Visualization and wake surveys of vortices flow over a delta wing, *AAIA Journal*, Vol. 26, pp. 137-143.
- Peterka, J.A., Hosoya, N., Dodge, S., Cochran, L., Cermak, J.E., 1998, Area-average peak pressures in a gable roof vortex region, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77-78, pp. 205-215.
- Pindado, S., Meseguer, J., 2003, Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 1133-1139.
- Pindado, S., Meseguer, J., Martínez, A., 2004, Franchini, S., Wind tunnel analysis on the influence of cantilever parapets on the wind loads of curved roofs, en "Advances in Fluid Mechanics V", V.A. Mendes, M. Rahman, C.A. Brebbia Eds., WIT Press, Wessex, pp. 405-413.
- Plate, E.J., Kiefer, H., 2001, Wind loads in urban areas, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 1233-1256.
- Sasaki, R., Uematsu, Y., Yamada, M., Saeki, H., 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*, Vol. 67-68, pp. 873-883.
- Smith, J.H.B., 1984, Theoretical modeling of three-dimensional vortex flows in aerodynamics, *Aeronautical Journal*, April 1984, 101-116.
- Stansby, P.K., Wootton, L.R., 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.
- Stathopoulos, T., Baskaran, A., Goh, P.A., 1990, Full-scale measurements of wind pressures on flat roof corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 36, pp. 1063-1072.
- Stathopoulos, T., Marathe, R., Wu, H., 1999, Mean wind pressures on flat roof corners affected by parapets: field and wind tunnel studies, *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 629-638.
- Tieleman, H.W., 1996, Full/model-scale comparison of pressures on the roof of the TTU experimental building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 65, pp. 133-142.
- Tieleman, H.W., Surry, D., Metha, D.K.C., 1996, Full/model-scale comparison of surface pressures on the Texas Tech experimental building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 61, pp. 1-23.
- Visser, K.D., Nelson, R.C., 1993, Measurements of circulation and vorticity in the leading-edge vortex of a delta wing, *AAIA Journal*, Vol. 31, pp. 104-111.
- Williams, C.W., Baker, C.J., 1997, Appraisal of a semi-empirical model for the pressure field beneath roof corner vortices, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 11, pp. 767-792.

Wu, F., Sarkar, P.P., Metha, K.C., Zhao, Z., 2001, Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 403-420.

Yamada, M., Uematsu, Y., Sasaki, R., 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*, Vol. 65, pp. 261-271.