

FACTIBILIDAD DEL USO DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN EL ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL VIENTO Y EDIFICIOS

José A. Cataldo, Gabriel Narancio y Gabriel Usera

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Republica, Julio Herrera y Reaig 565, Uruguay, gnaranci@fing.edu.uy,
<http://www.fing.edu.uy/imfia>*

Palabras Clave: LES, condiciones de borde inmersas, capa límite atmosférica, edificios, campo de presiones, confort eólico.

Resumen. Este trabajo presenta la simulación numérica de grandes vórtices (LES) del flujo turbulento entorno a un edificio actualmente en construcción del complejo World Trade Center (Montevideo). La simulación fue llevada a cabo utilizando como base el modelo numérico Caffa3d.MB desarrollado en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

La primera parte de las simulaciones se hicieron con el objetivo de reproducir las condiciones de viento incidente sobre el complejo edilicio, esto es: una capa límite atmosférica, desarrollada en terreno “tipo mar”. Para ello se utilizó un método “precursor” con dominio periódico, donde la rugosidad del terreno fue incorporada al modelo mediante la adición de un término de arrastre proporcional al volumen ocupado por el elemento de rugosidad presente dentro de la celda. En la segunda parte se simula la capa límite en presencia de los edificios. Se utiliza una malla ortogonal estructurada y el método de condiciones de borde inmersas para fijar la geometría de los edificios. Finalmente se comparan los resultados con los obtenidos en el estudio hecho en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería sobre el mismo edificio, principalmente los referidos al campo de presiones sobre la fachada y las velocidades de viento a una altura de 2 m en escala de prototipo.

Para el campo de velocidad se obtuvieron concordancias importantes, salvo en un punto ubicado sobre un fuerte gradiente de velocidad. Los campos de presión media y máxima resultaron correctos en la mayoría de las fachadas. Solo en una cara se obtuvieron discrepancias, atribuibles a la imposibilidad de la malla de resolver las estructuras de flujo que se forman sobre una de las aristas. El modelo tuvo dificultades para reproducir el campo de presiones mínima sobre las fachadas, esto también se puede atribuir a la dificultad que el modelo tiene (con la malla utilizada), en reproducir los vórtices de menor escala, que son los responsables de las presiones mínimas.

En consecuencia se plantea realizar nuevas simulaciones refinando el paso de la malla, en todo el dominio y en el entorno del edificio de interés; además es necesario mejorar la estrategia de interpolación utilizada para fijar la geometría de las edificaciones usando el método de condiciones de borde inmersas.

1 INTRODUCCIÓN

La Ingeniería del Viento es una disciplina que estudia la interacción entre el viento, que se desarrolla en la capa límite atmosférica, o baja atmósfera, y los diferentes obstáculos que se encuentran sobre el suelo o próximo al mismo. Esta interacción da lugar a diferentes procesos como son la producción de turbulencia, la producción de vorticidad y contracciones y difusiones. Como consecuencia de dichos procesos se producen acciones sobre los obstáculos que se manifiestan en el establecimiento de un campo de presiones sobre el mismo, la realización de fuerzas, la deformación de las estructuras, intercambio de calor entre la corriente de aire y el objeto.

Los flujos, en la zona de la atmósfera de interés para la Ingeniería del Viento, resultan altamente turbulentos y por lo tanto presentan estructuras vorticosas de diversas escalas temporales y de longitud. Por tal motivo, los procesos que antes se mencionan resultan no estacionarios y las diferentes magnitudes características presentan valores extremos que pueden ser significativamente distintos al valor medio que presenta la misma magnitud. La descripción de las magnitudes significativas suele hacerse, como es usual en la descripción de flujos turbulentos, separando la componente media de la componente fluctuante (Tennekes et al, 1972, Pope, 2000). Usualmente, la componente media de las magnitudes significativas (presión, fuerza, deformación, temperatura, etc.) suelen depender, básicamente, de las propiedades medias del flujo y de las fluctuaciones de mayores escalas. Por otro lado, la descripción de componentes fluctuantes de las diferentes magnitudes de pequeña escala depende de las componentes de flujo de menor escala. Además, en la medida que se busca describir componentes fluctuantes de menor escala espacial, es necesario registrar la magnitud en intervalos de tiempo cada vez menores.

La técnica de la modelación física suele ser una herramienta usual que se utiliza en la descripción de este tipo de situaciones. Tal técnica implica la modelación del flujo atmosférico y de la situación objeto de estudio. En el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental se dispone de un túnel de viento que fue diseñado con el objeto de estudiar este tipo de situaciones.

Como es sabido, no existe una solución general de las ecuaciones de Navier-Stokes que describen los flujos turbulentos salvo en casos particulares como son el caso de chorros y estelas isotérmicos (Schlishting et al, 2000). Aparece entonces como herramienta alternativa al estudio de flujos turbulentos, y en especial en situaciones de interés para la Ingeniería del Viento la técnica de la modelación numérica. La utilización de esta técnica busca resolver uno de los problemas abiertos de la mecánica clásica que es lo que se denomina el cierre de las ecuaciones que describen el desarrollo de flujos turbulentos. Se han desarrollado diversas metodologías a los efectos de resolver las ecuaciones en forma numérica. Entre tales técnicas merecen ser destacados los esquemas integrales como el que se utiliza para describir las tensiones rasantes en flujos tipo capa límite, la utilización de la longitud de mezcla de Prandtl que da lugar a los llamados modelos-K, el desarrollo de ecuaciones para describir diferentes parámetros significativos de los flujos turbulentos como son la energía cinética (k), la disipación turbulenta (ϵ), las tensiones aparentes o de Reynolds, la disipación que producen las pequeñas escalas de la turbulencia lo que permite describir el desarrollo de los grandes vórtices del flujo turbulento, etc (Pope, 2000). Los diversos esquemas numéricos como las diferencias finitas, los elementos finitos, los volúmenes finitos, etc (Ferziger & Peric, 2002) que son utilizados para resolver las ecuaciones implican discretizar el espacio y el tiempo y determinar el valor de los parámetros significativos del flujo en cada nodo ubicado en el volumen de control definido y en cada instante analizado. En la medida que se busque

describir la estructura más finas de la turbulencia, se hace necesario discretizar el volumen utilizando nodos más próximos y el valor se debe estimar en períodos de tiempo cada vez menores.

Los modelos numéricos existentes para estudiar flujos turbulentos se pueden clasificar básicamente en tres: RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), DNS (Direct Numerical Simulation) y LES (Large Eddy Simulation). En los modelos RANS se resuelve el flujo medio modelando el efecto de la turbulencia sobre este. El problema principal de este tipo de modelos es que no se tiene un modelo de clausura universal, que pueda ser utilizado en todo tipo de flujos, además tiene la limitante de trabajar con valores medios y no poder resolver las componentes fluctuantes, que tienen gran importancia en el campo de la ingeniería. En el otro extremo del espectro está la DNS, en la cual se simula el flujo solamente usando las ecuaciones de Navier Stokes discretizadas y la ecuación de continuidad y reduciendo el paso de la malla de manera de resolver todas las escalas de la turbulencia. Este método tiene un costo computacional altísimo y sólo tiene sentido su utilización en casos de geometría muy simple y para estudios fundamentales en turbulencia. El método LES es un compromiso entre los dos anteriores, en él se resuelve las escalas de la turbulencia hasta cierto nivel y se modela el efecto de las escalas menores sobre las mayores. Este método está ganando terreno sobre los métodos RANS para aplicaciones de ingeniería, porque se utilizan métodos más generales de clausura y son capaces de resolver parte de las componentes fluctuantes.

En el IMFIA se trabaja desde algunos años en estos temas, y su principal resultado fue el desarrollo del modelo numérico *caffa3d.MB*, que está sirviendo de base a diversos proyectos. Este trabajo toma este modelo y busca adaptarlo a los requerimientos de la ingeniería del viento y encontrar el camino a seguir para llegar a obtener resultados prácticos que asistan el trabajo que se viene realizando en el túnel de viento de Facultad de Ingeniería.

Actualmente se realizan tres tipos de ensayos sobre construcciones en el túnel de viento: ensayos de confort eólico, de presiones en las fachadas y ensayos aeroelásticos. Todos ellos requieren previamente a las medidas, un estudio cualitativo de las estructuras del flujo presentes. Actualmente ese trabajo se hace a muy baja velocidad, inyectando vapor de propilenglicol e iluminando con un plano de manera de apreciar las estructuras. La validación del modelo numérico permitirá asistirse con esta herramienta para describir el flujo, ya que mediante la simulación numérica se obtiene el campo de velocidad en gran cantidad de puntos de medición, a diferencia de lo que se puede hacer en el túnel de viento. En caso de obtener buenos resultados se puede en un futuro hacer ensayos completos bajando los costos, ya que la construcción de un modelo lleva mucho tiempo y dinero.

2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se comparan los resultados obtenidos en un ensayo realizado a un edificio actualmente en construcción del complejo World Trade Center Montevideo en modelo físico con los obtenidos por simulación numérica. El edificio en cuestión es la torre 4, que en la [Figura 1](#) se muestra en rojo. La torre 4 tiene una sección cuadrada de 30 m de lado y 120 de altura. Cuando el viento incide desde la dirección SSE, no hay ningún edificio importante a barlovento, lo que hace que las condiciones de viento incidente dependan principalmente de las características de la capa límite. Este aspecto fue determinante en la selección de la dirección a estudiar.

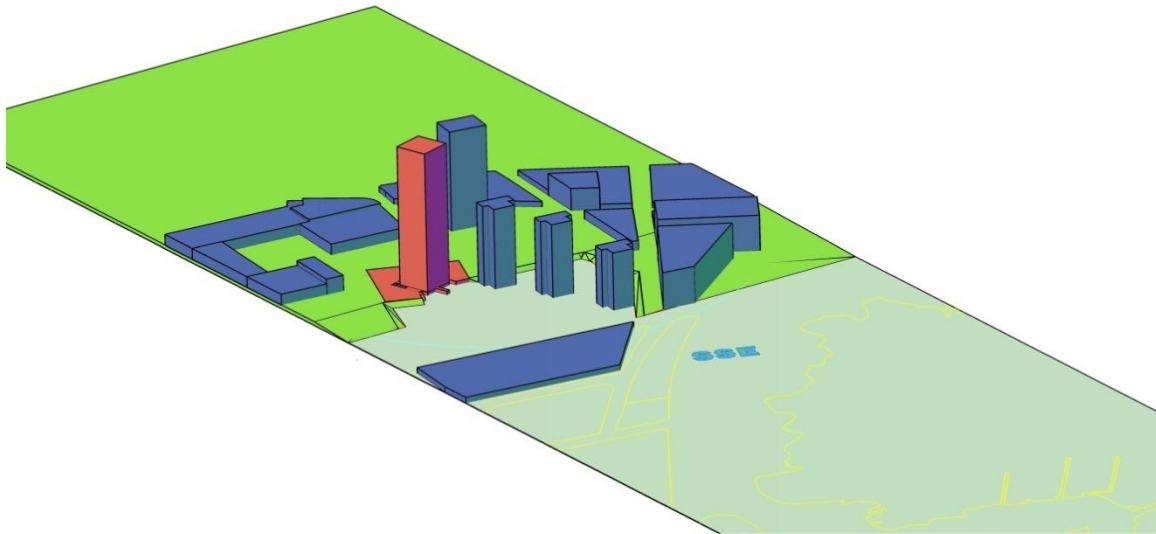


Figura 1: Configuración de Edificios.

3 MODELO NUMÉRICO

El modelo *caffa3d.MB* es un modelo numérico de volúmenes finitos para la simulación numérica de flujos viscosos y turbulentos en geometrías complejas (Usera et al, 2008). Este modelo opera con mallas estructuradas por bloques, curvilíneas, no ortogonales y ajustadas a las fronteras sólidas. Incorpora técnicas avanzadas como solvers multigrilla algebraicos (Mora Acosta, 2001), interpolación basada en desarrollos de Taylor multidimensionales (Lehnhauser & Schafer, 2002), modelos de turbulencia LES, y modelos de rugosidad de terreno. Asimismo explota el paralelismo en computadoras multiprocesadores, mediante el modelo de programación paralela OpenMP. Las simulaciones fueron hechas utilizando el modelo *caffa3d.MB* adaptado a la situación estudiada.

Un modelo LES se enfoca en resolver los campos de velocidad y presión de las grandes escalas de la turbulencia, para ello se utiliza un filtrado espacial de los campos relevantes, por ejemplo el de velocidades u , de la siguiente manera:

$$\bar{u}(P) = \int_{\Omega} G(P - P') \cdot u(P') \cdot dV' \quad (1)$$

Siendo $G(r)$ una función que pondera con un peso mayor los valores de $u(P')$ cercanos al punto P , y decae a medida que nos alejamos de P .

El filtrado se hace en general, promediando el campo dentro de la celda, lo que es igual a aplicar un filtro uniforme, aunque pueden aplicarse otros filtros, por ejemplo uno gaussiano. Se aplica este filtro a las ecuaciones de balance mecánico y de continuidad, obteniendo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j) &= F - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{R_{ij}}{\rho} \right) \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde R_{ij} son los términos de tensiones de sub grilla y se define:

$$R_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i \cdot u_j} - \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j \right) \quad (3)$$

Estos términos no se pueden resolver a partir del flujo resuelto (el filtrado), y entonces se modelan. El principal método de modelación de estos términos es el método de Smagorinsky, en el cual se relaciona los términos de tensiones de subgrilla con el campo de velocidades filtrado, de la siguiente manera:

$$R_{ij} = 2 \cdot \mu_T \cdot S_{ij} + \frac{1}{3} R_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

En la expresión anterior se introduce el concepto de viscosidad turbulenta μ_T que toma en cuenta el efecto de las escalas menores sobre las resueltas.

El modelo de Smagorinsky establece la siguiente expresión para calcular la viscosidad turbulenta:

$$\mu_T = (C_s \cdot \Delta)^2 \cdot \left(2 \cdot S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Donde C_s es una constante que tiene un valor teórico calculado en base a la hipótesis de turbulencia isotrópica de aproximadamente $C_s=0,2$. La hipótesis de que la turbulencia es isotrópica no es razonable en muchos casos, sobre todo cerca de las superficies con lo cual se debe corregir el valor de C_s . Ferziger (2002) postula que C_s depende del valor del Reynolds de subgrilla (Re_{SGS}) y propone una expresión para calcularla:

$$C_s = 0,128 \cdot \left(1 + \frac{24,5}{Re_{SGS}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Con

$$Re_{SGS} = \frac{(S_{ij} S_{ij})^{1/2} \cdot \Delta^2}{\nu} \quad (8)$$

ν es la viscosidad cinemática del fluido y Δ es el ancho del filtro utilizado, que puede asociarse al diámetro de la celda.

El campo obtenido a partir de la ecuación de balance mecánico no satisface la ecuación de balance de masa y debe ser corregido. Para ello se adopta el llamado método SIMPLE para el acople de la velocidad y la presión.

El tratamiento de problemas de interacción solido-fluido han sido históricamente abordados usando mallas ajustadas a las superficies o mallas no estructuradas, lo que hace que el costo computacional y la complejidad de los algoritmos sea cada vez más alta. El tratamiento de la interacción entre las superficies solidas en este trabajo fue hecho usando el método de las condiciones de borde inmersas, el cual permite el uso de mallas ortogonales y estructuradas, lo que simplifica el problema y disminuye los requerimientos computacionales. El método se basa en la introducción de un campo de fuerzas externas que actúan de la misma manera que lo haría el cuerpo sólido.

Para ello se utilizó el enfoque utilizado en Liao et al. (2010). En él se estima la fuerza por unidad de masa necesaria f como la aceleración que experimentaría el fluido si fuera retirado

el obstáculo:

$$f^{n+1} = \frac{v_F - \hat{v}}{\Delta t} \quad (9)$$

Donde f_{n+1} es el forzante en el paso temporal $n+1$, v_F es la velocidad en presencia del obstáculo y \hat{v} es la velocidad estimada cuando se elimina el forzante.

La rugosidad del terreno se impuso utilizando el método utilizado por Fischer et al. (2001), para simular vegetación sumergida. En este método no se simulan los elementos de rugosidad geoméricamente, sino que se modela su efecto sobre el flujo. La fuerza de arrastre sobre el objeto sumergido se incorpora a la ecuación de Navier Stokes como un sumidero de momento. La fuerza por unidad de volumen aplicada a cada celda se puede calcular como:

$$F_D = C_D \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{A}{V} \quad (10)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, v es la velocidad, A es el área proyectada del elemento de rugosidad y V es el volumen de la celda. Los elementos de rugosidad utilizados en este trabajo tienen forma cónica, con altura H_0 , diámetro de la base D_0 y espaciamiento L modificable como muestra la Figura 2. Variando estos parámetros de la rugosidad se obtienen diferentes flujos incidentes.

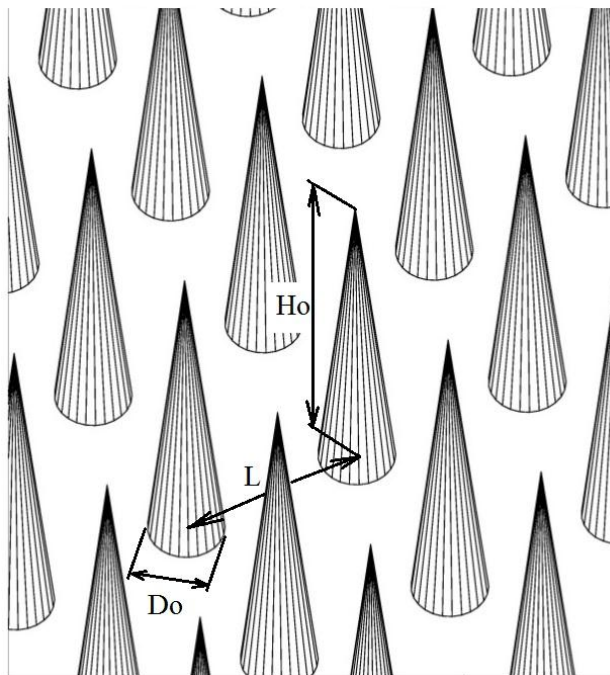


Figura 2: Esquema de los elementos de rugosidad.

4 SIMULACIÓN DE LA CAPA LÍMITE

La modelación física en un túnel de viento atmosférico, requiere la simulación del viento atmosférico en escala de modelo, para ello, se utilizan técnicas de simulación artificial. Estas técnicas han sido ampliamente estudiadas y existe suficiente literatura al respecto; ellas permiten modificar las condiciones del viento que incide sobre el modelo. Ejemplos de estos sistemas son: el método de los generadores elípticos de Counihan, el método de las agujas

planas de Standen, etc. Utilizando estas herramientas se simuló el viento incidente sobre el complejo WTC cuando el viento sopla desde la dirección SSE en el ensayo en modelo físico. El viento que incide sobre el edificio, tiene características de una capa límite turbulenta desarrollada sobre la superficie del mar.

En la mayoría de los problemas de Ingeniería del viento a los que se aplica el método de simulación numérica LES, el modelado de la turbulencia de entrada es de mucha importancia. Es por ello que en primera instancia se intentó reproducir las condiciones presentes en el modelo físico estudiado en el Túnel de viento, es decir: una capa límite turbulenta desarrollada sobre un terreno tipo mar.

Existen básicamente 2 métodos para simular la turbulencia en el flujo de entrada al dominio, estos son: generación de turbulencia “sintética” y los métodos “precursores” (Tabor, 2010).

En los primeros se superpone al perfil de velocidad media una componente fluctuante aleatoria sujeta a algunas restricciones. Las fluctuaciones se descomponen en series de Fourier, y los coeficientes de estas series, se determinan de manera que verifiquen el espectro de potencia de la componente fluctuante de la velocidad previamente fijado. Es claro que esto debe hacerse para cada una de las componentes de la velocidad y los coeficientes deberían relacionarse de manera de mantener las correlaciones cruzadas correctas, esto último no ha sido hecho. Otra deficiencia importante del método es la dificultad para generar un campo de velocidades que verifique la ecuación de continuidad y el balance mecánico. Por otro lado tiene como ventaja principal el bajo costo computacional.

En los métodos “precursores”, se genera en un dominio auxiliar un flujo con las características de una capa límite turbulenta. Esto tiene la ventaja de que las condiciones de entrada al dominio principal, son tomadas de una simulación genuina de turbulencia, y debería tener la mayoría de las propiedades requeridas, incluida una correcta correlación temporal y espacial y un adecuado espectro de potencia de la componente fluctuante. La generación de una capa límite turbulenta requiere de un dominio de extensión muy importante, lo que hace prohibitivo hacerlo directamente. Una manera de subsanar esta dificultad es reintroducir el flujo que sale del dominio en la entrada; esto da origen a los métodos “precursores” con dominios cíclicos. En algún lugar del dominio auxiliar, se muestrea y se guarda (instante a instante) el perfil de velocidad que va a ser utilizado en el dominio principal. Estos métodos tienen la ventaja de generar un perfil de velocidad realista, pero tienen un costo computacional superior a la generación de turbulencia sintética.

En este trabajo se utilizó un método “precursor” con dominio cíclico para generar la capa límite, aunque no se utilizaron 2 dominios diferentes. Las simulaciones para obtener el perfil de velocidad deseado fueron hechas en un dominio al que luego se le introdujeron los edificios.

El dominio es una “caja” (tipo “túnel de viento”) de 16 m de largo, 1.4 m de ancho y 1.2 m de altura. En él, se fuerza un gradiente de presión en el sentido longitudinal del túnel y se imponen condiciones de borde periódicas en las paredes laterales (permeables), en el piso se impone la condición de adherencia y en el techo también, pero a una superficie que se mueve en el sentido del viento a una velocidad dada. Además, las condiciones de borde de la “entrada” del túnel coinciden con las condiciones de la “salida” del paso temporal anterior. El “túnel” está dividido en 4 bloques de 4 metros de largo, uno a continuación del otro. Cada bloque está subdividido en celdas generadas por una malla estructurada regular. Cada bloque contiene 66x130x130 celdas, lo que hace un total de 4461600 celdas.

5 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA CAPA LÍMITE

En la descripción de la capa límite atmosférica, se identifican 3 zonas (Simiu & Scanlan, 1985). La zona más próxima al suelo, conocida como Subcapa rugosa, en la cual el flujo depende fuertemente de la geometría de los obstáculos y tiene una altura que oscila entre 1 a 2 veces la altura de los elementos de rugosidad. La zona que sigue es la Subcapa logarítmica, cuyo nombre proviene del hecho de que la velocidad media sigue una distribución del tipo logarítmica, de la forma:

$$U = \frac{u^*}{k} L \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (11)$$

Donde u^* es la velocidad de fricción, k es la constante de Von Karman, d es la altura del plano de desplazamiento nulo y z_0 es la longitud de rugosidad. Esta subcapa tiene una altura típica de aproximadamente 15 % de la altura total de la capa límite. La longitud de rugosidad es un parámetro que identifica el tipo de terreno. La tercera zona es la Subcapa de la estela, que completa la altura de la capa límite. El perfil de velocidad media se puede expresar en la forma simplificada que sigue:

$$\frac{U}{U_R} = \left(\frac{z}{z_R} \right)^n \quad (12)$$

En este caso U_R es la velocidad a la altura z_R de referencia, es usual elegir esta altura igual a la altura de la capa límite. El exponente n depende del tipo de terreno en que se desarrolla la capa límite.

El parámetro más simple para describir la turbulencia, es la intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia de la componente longitudinal de la velocidad, se define como:

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \quad (13)$$

Donde u' es la componente fluctuante de la velocidad, entonces se define a la intensidad de turbulencia como el cociente de la RMS de la velocidad y la velocidad media. Se asume que la media cuadrática de la velocidad puede ser escrita como:

$$\overline{u'^2} = \beta \cdot u^{*2} \quad (14)$$

En donde β no varía con la altura cuando se está en presencia de una capa límite. Entonces si admitimos que el perfil de velocidad sigue una ley logarítmica, se tiene que el perfil de intensidad de turbulencia en altura se puede expresar como sigue:

$$I(z) = \frac{k \cdot \sqrt{\beta}}{L \left(\frac{z-d}{z_0} \right)} \quad (15)$$

Otro parámetro de interés en la descripción de un flujo turbulento, como lo es la capa límite atmosférica, es la escala integral de la turbulencia. Esta se relaciona con el tamaño medio de los vórtices presentes en el flujo. Existen diferentes escalas según que componente de la velocidad se considere; en este caso se usa la componente longitudinal. Se puede estimar su valor del espectro de potencia de la componente fluctuante (S), por los siguientes dos

métodos:

$$L_u^x = \frac{U}{2\pi \cdot f_{pico}} \quad (16)$$

Donde f_{pico} es la frecuencia en la que se da el máximo del espectro adimensionado.

$$L_u^x = \frac{U \cdot S(0)}{4 \cdot u'^2} \quad (17)$$

$S(0)$ es el valor del espectro cuando la frecuencia tiende a 0.

Se sugiere la siguiente expresión empírica para describir el perfil de escala integral en altura:

$$L_u^x = C \cdot z^m \quad (18)$$

Donde C y m son funciones de z_0 (longitud de rugosidad).

En base a los parámetros antes presentados, se puede hallar diversas escalas de longitud. En general, las escalas no coinciden, de manera que no se puede establecer una similitud completa entre el flujo que se da en el túnel de viento y en la atmosfera. Principalmente se intenta establecer similitud con el perfil de velocidad media y después con los otros parámetros: intensidad de turbulencia y escala integral.

6 RESULTADOS

6.1 Capa límite

El objeto de la modelación numérica es simular un flujo atmosférico correspondiente a una exposición al viento tipo mar y a una escala geométrica de 1/200.

Se efectuaron simulaciones variando los diferentes parámetros de la rugosidad, las cuales de aquí en más identificaremos como Tun00X. En la [Tabla 1](#) se presentan los parámetros de rugosidad (ver [Figura 2](#)) y el paso temporal Δt , utilizados en cada simulación.

	Tun001	Tun004	Tun005	Tun006
Ho (m)	0,01	0,005	0,005	0,002
Do (m)	0,002	0,001	0,001	0,001
L (m)	0,005	0,004	0,008	0,008
Cd	1	1	1	1
Δt (s)	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabla 1: Parámetros de rugosidad utilizados para las diferentes simulaciones.

A cada perfil obtenido se lo analizó utilizando las técnicas antes descriptas obteniéndose los parámetros de ajuste que se indican en la [Tabla 2](#):

	Tun001	Tun004	Tun005	Tun006
d (mm)	21	18	33	24
Zo (mm)	0,0174	0,0094	1,72E-05	0,001
u* (m/s)	0,537	0,508	0,313	0,412

Tabla 2: Parámetros de ajuste de las distintas simulaciones.

Entonces considerando la longitud de rugosidad típica de una capa límite tipo mar en escala de prototipo ($Z_o=2\text{mm}$) la escala de longitud queda:

	Tun001	Tun004	Tun005	Tun006
e_U^{-1}	115	212	116279	163934

Tabla 3: Escalas de longitudes obtenidas del perfil de velocidad media en altura.

Se aprecia grandes diferencias entre las escalas obtenidas por el ajuste de la velocidad media (Tabla 3), destacándose que las capas límites resultantes de las simulaciones Tun001 y Tun004 tienen valores adecuados.

Del ajuste de la escala integral resultan las siguientes escalas (Tabla 4):

	Tun001	Tun004	Tun005	Tun006
e_{Lu}^{-1}	249	255	228	233

Tabla 4: Escalas de longitud obtenidas del perfil de escala integral en altura.

En este caso todos los valores de las escalas geométricas presentan valores adecuados. Para la intensidad de turbulencia no se pudo obtener un ajuste que permitiera hallar una escala realista, pero se aprecia de los gráficos de intensidad de turbulencia, que cualitativamente se acercan a la realidad (ver Figura 4).

Como resultado de este análisis se elige para la simulación los parámetros de rugosidad de terreno usados en la simulación Tun004 con una escala de longitud 1:200.

A continuación se presentan los perfiles de velocidad media (Figura 3), intensidad de turbulencia (Figura 4) y escala integral (Figura 5), para cada una de las simulaciones realizadas.

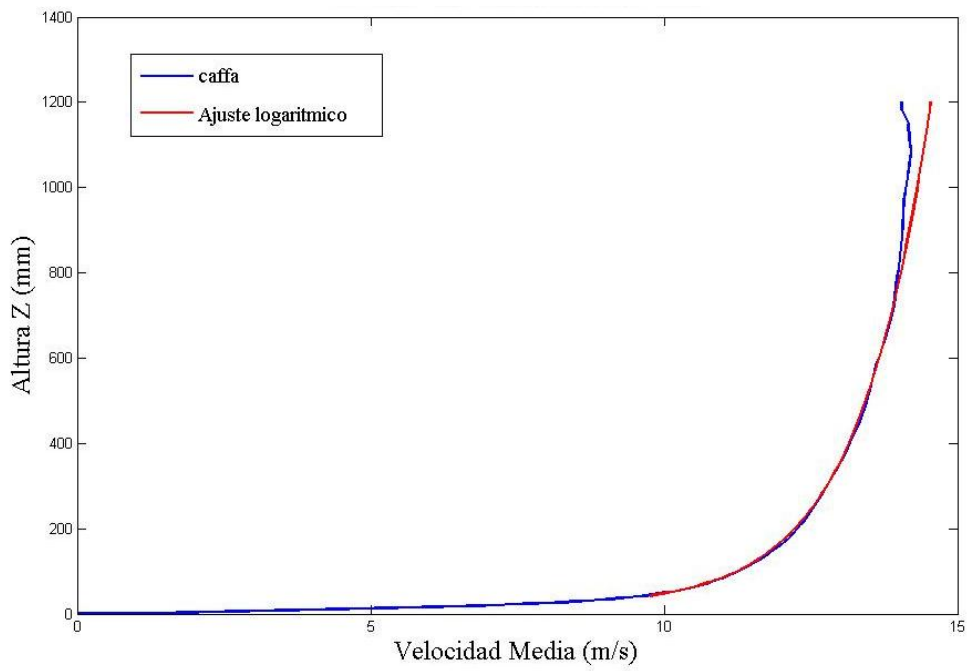


Figura 3: Perfil de velocidad media en altura obtenido de la simulación Tun004.

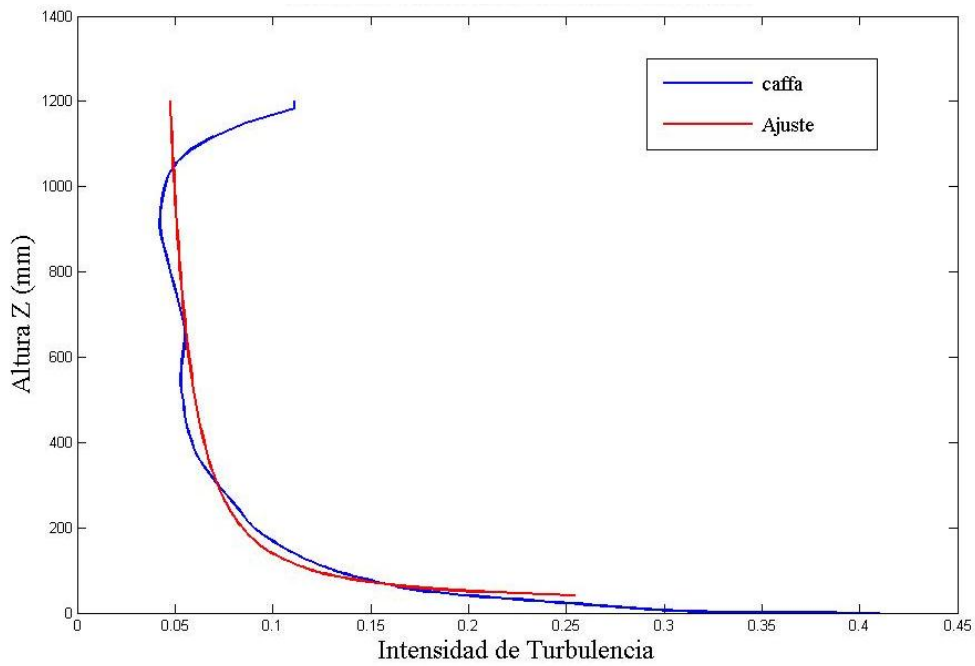


Figura 4: Perfil de intensidad de turbulencia en altura obtenido de la simulación Tun004.

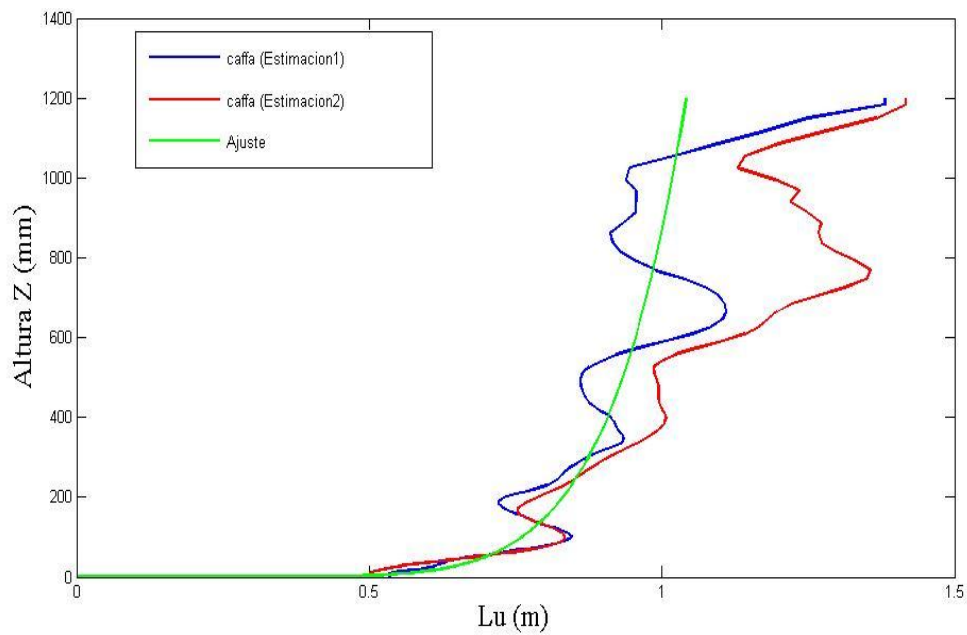


Figura 5: Perfil de escala integral en altura obtenido de la simulación Tun004.

A continuación (Figura 6) se muestra el perfil de velocidad media en altura para la capa límite tipo mar utilizada en los ensayos en modelo físico.

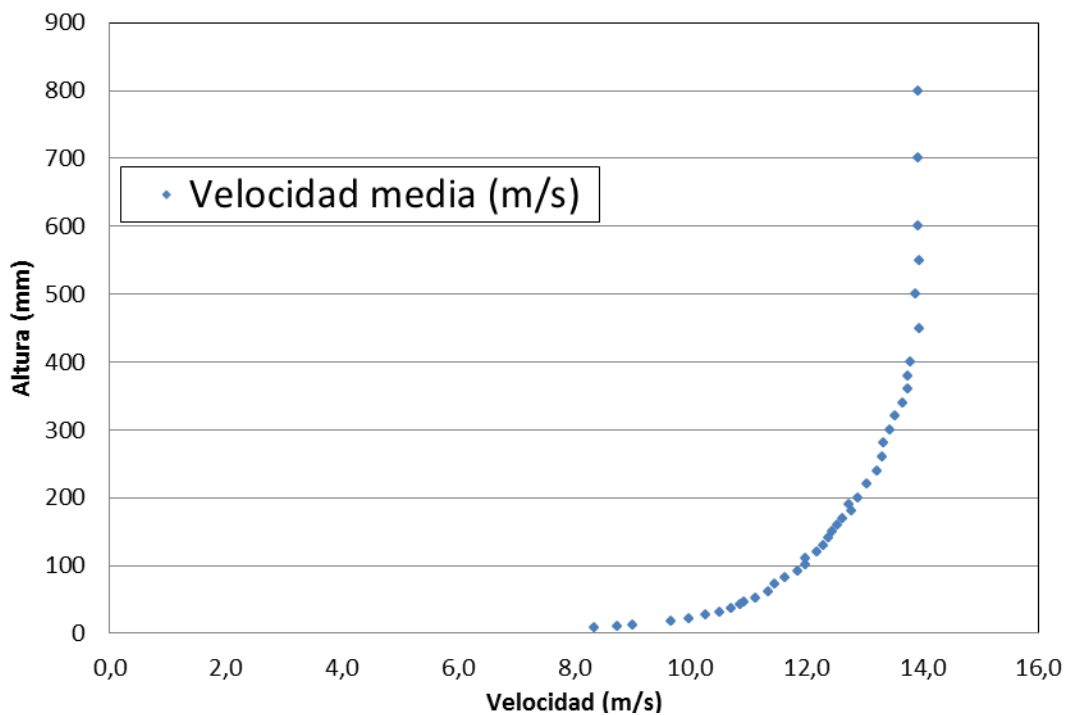


Figura 6: Perfil de velocidad en altura utilizado en el modelo físico.

Los parámetros de ajuste fueron (Tabla 5):

u^* (m/s)	0,53
Z_0 (mm)	0,009

Tabla 5: Parámetros de ajuste de la capa limite utilizada en el modelo físico.

6.2 Campo de velocidad

La **Figura 7** muestra líneas de corriente medias (promediadas en 4 s de simulación). Las líneas de flujo comienzan a 20cm en todo el ancho del túnel. Esta técnica permite visualizar el flujo y analizar sus estructuras: contracciones, difusiones, formación de vórtices estacionarios, desprendimientos de capa limite, etc.

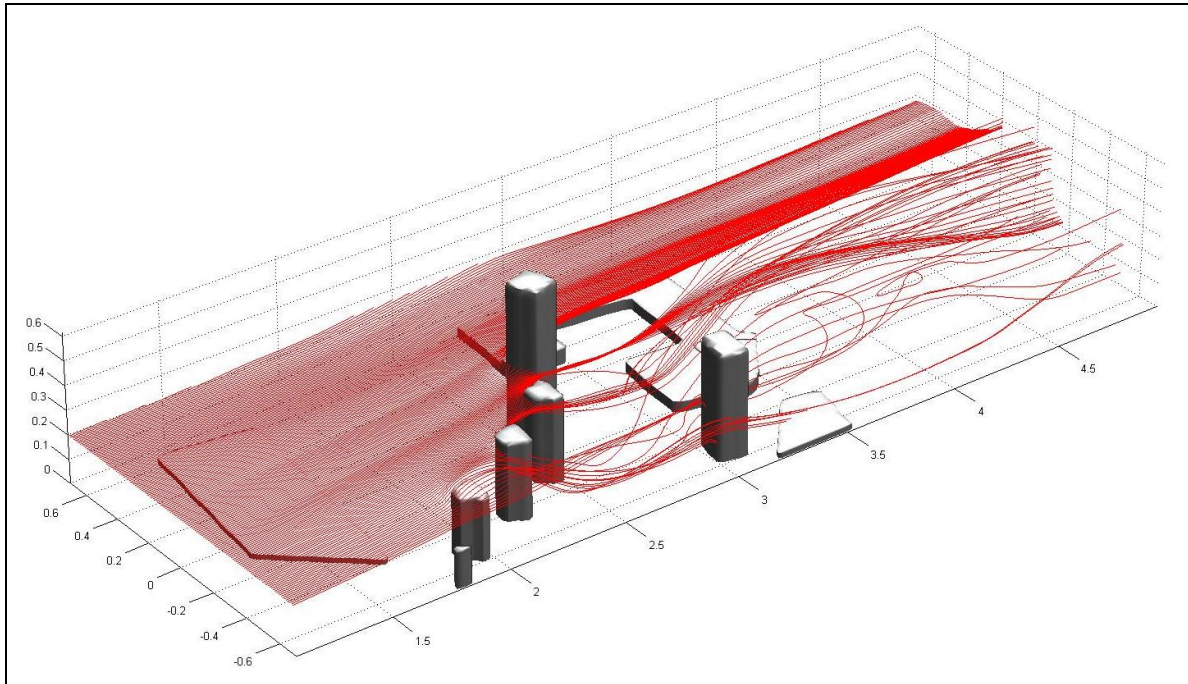


Figura 7: Líneas de corriente medias con origen a 20 cm de altura (flujo de izquierda a derecha).

La imagen siguiente (**Figura 8**) permite visualizar la formación del vórtice de herradura en la base del edificio principal.

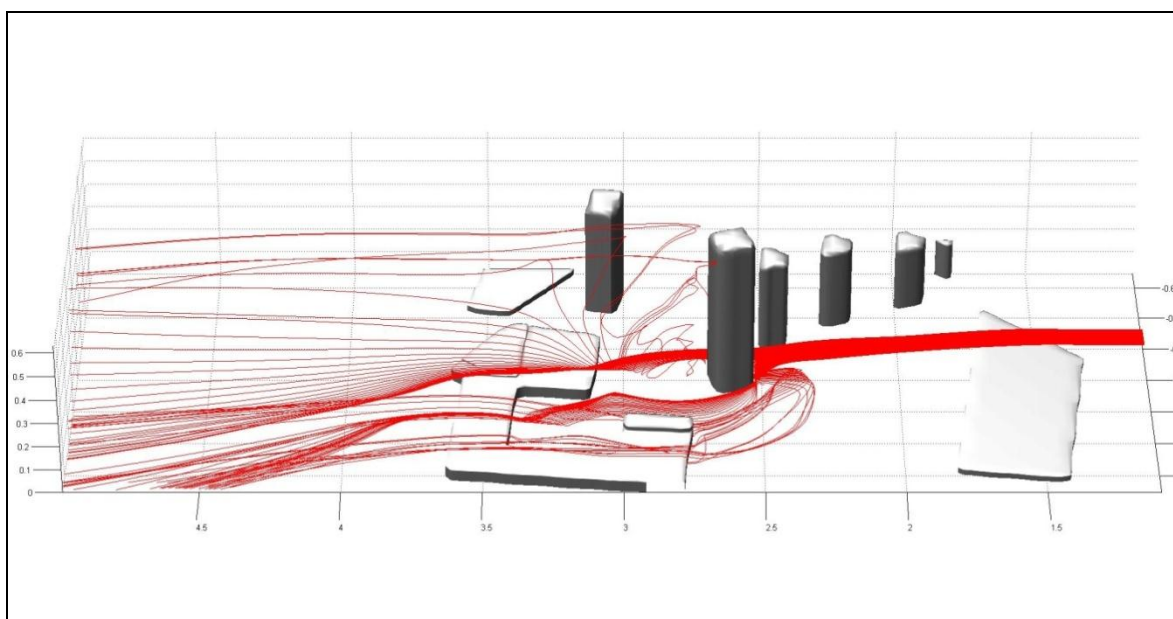


Figura 8: Vórtice tipo herradura (flujo de derecha a izquierda).

6.3 Confort eólico

A continuación se analiza la capacidad del modelo en predecir los valores medios de velocidad a 2m del suelo en escala de prototipo.

Estos valores son relevantes en el análisis de confort eólico de personas. En la Figura 9 se presenta el campo de velocidades deducido a partir de los resultados obtenidos con el modelo numérico y en la Figura 10 el patrón de flujo deducido a partir de la visualización del modelo físico.

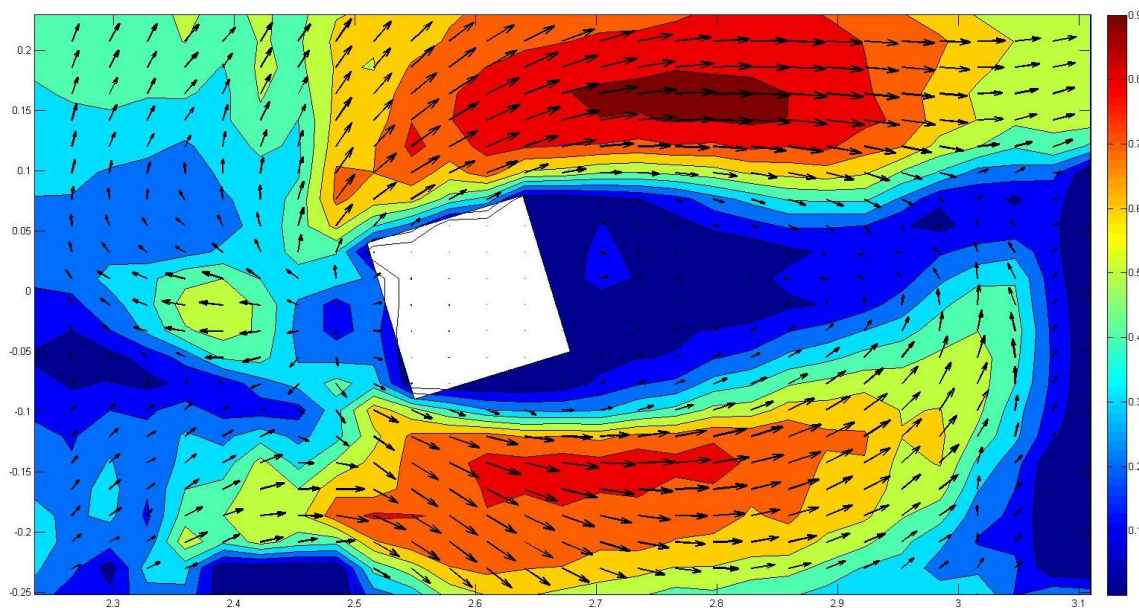


Figura 9: Curvas de igual velocidad a 2m del suelo en escala de prototipo.

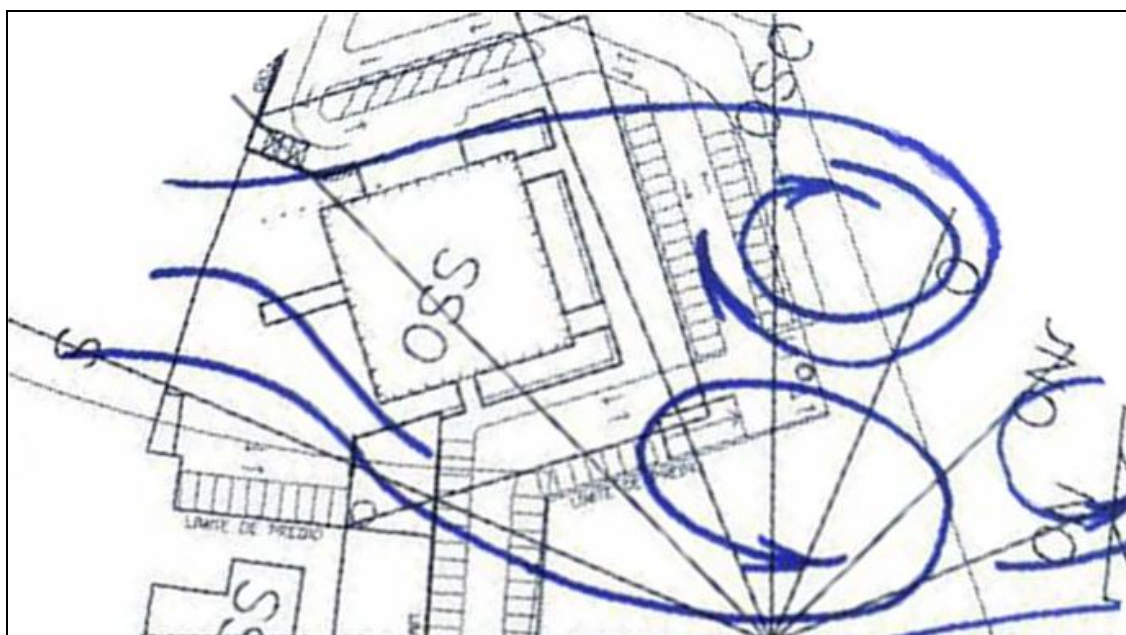


Figura 10: Patrón de flujo observado en el túnel de viento.

La visualización que permite determinar el patrón de flujo se hace a muy baja velocidad

(aproximadamente 1 m/s). A esta velocidad los vórtices son de mayor escala que a la velocidad que se hace los ensayos, por lo tanto es razonable la extensión de la estela que se muestra en la [Figura 9](#).

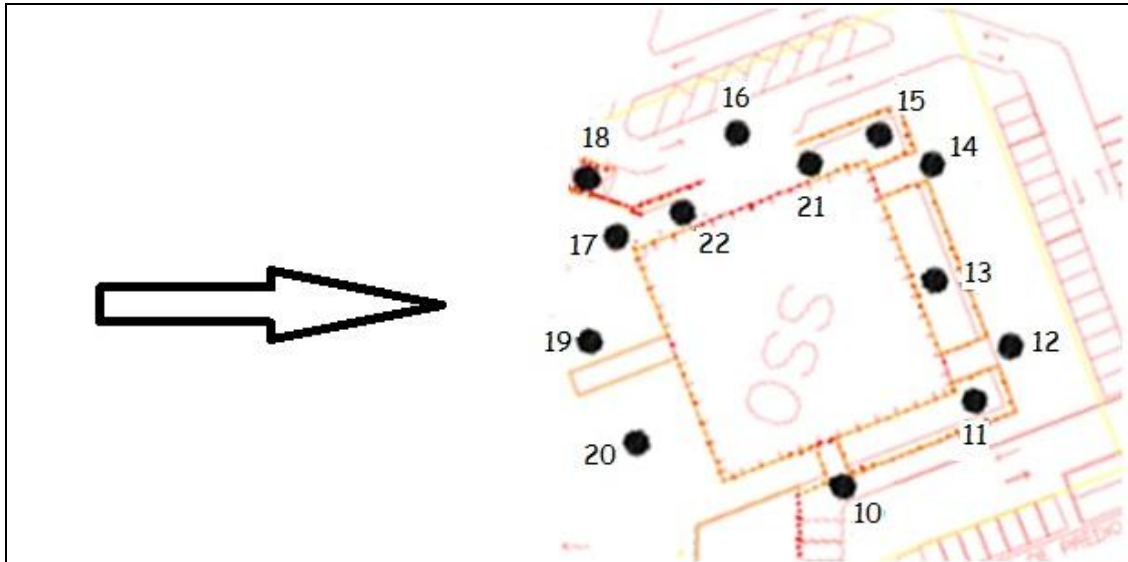


Figura 11: Puntos de medición en el modelo físico.

La tabla indica el cociente de la velocidad en los puntos marcados en la [Figura 11](#) y la velocidad de referencia (velocidad en la capa límite a la altura del edificio).

Punto	Túnel de viento	Simulación
10	0.3	0.2
14	0.55	0.1
16	0.73	0.6
12	0.18	0.1
11	0.24	0.1
13	0.25	0.1
15	0.24	0.3
17	0.53	0.5
19	0.27	0.2
20	0.27	0.2
21	0.27	0.3
22	0.43	0.3
18	0.32	0.5

Tabla 6: Velocidad adimensionada medida en modelo físico y simulación.

En la base del edificio hay estructuras que no son simuladas por el modelo. Por ejemplo los puntos 11, 13, 15, 21 y 22 están dentro del foso que se muestra en la [Figura 11](#) y los puntos 18, 19 y 20 están en otro nivel que los restantes. En la simulación numérica todos los puntos están en un mismo nivel y no hay ningún obstáculo. En todos los puntos se encuentra una correlación razonable, salvo en el punto 14 que está sobre un gradiente importante de

velocidad y una variación mínima de la posición puede hacer que el valor concuerde. Los puntos 10, 11, 12 y 13 están ubicados en la zona de “aguas muertas”, donde esto sucede, entonces es de esperar que los valores de velocidad sean menores a los medidos, lo que concuerda con la simulación.

6.4 Presiones sobre fachadas

A continuación se muestran gráficos de igual valor de coeficientes de presión medios, máximos y mínimos en las fachadas del edificio. Los coeficientes de presión se definen:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{REF}^2} \quad (19)$$

Donde P_0 es la presión en la capa límite, V_{REF} es la velocidad de referencia (en este caso la velocidad en la capa límite a la altura del edificio) y ρ es la densidad.

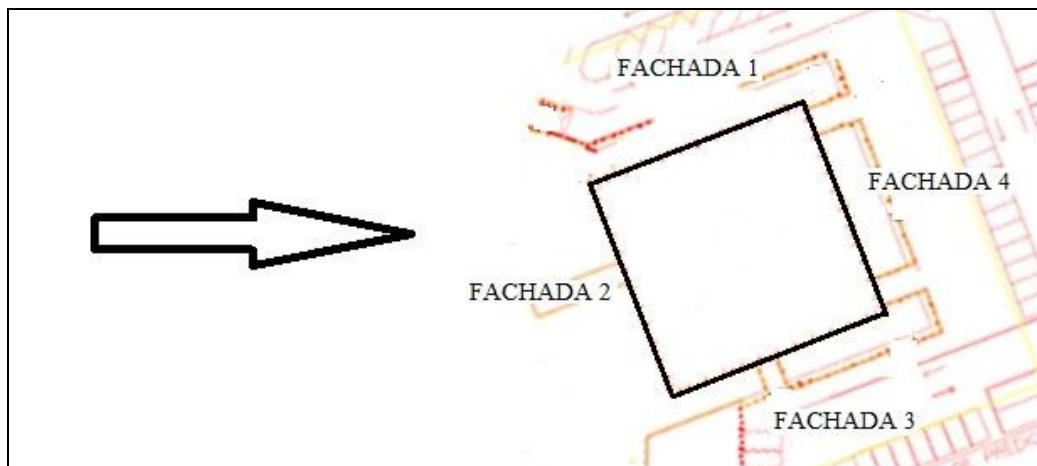


Figura 12: Fachadas.

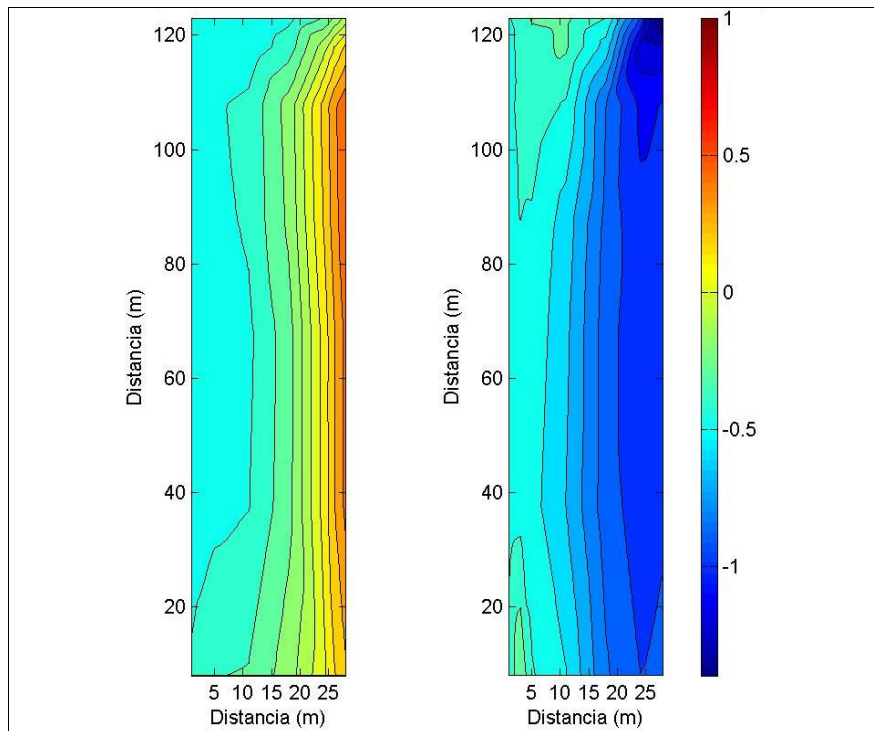


Figura 13: Coeficientes de presión medios en la fachada 1, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

En la Fachada 1 (Figura 13) se encuentra discrepancias sobre el lado derecho de la cara, donde el modelo predice un gradiente de derecha a izquierda, con un valor máximo sobre la arista derecha de alrededor de 0,5, mientras que el ensayo en el túnel indica un gradiente opuesto, con un valor medio en la arista derecha de -1. Sobre la arista izquierda los valores alcanzan un mismo valor.

Este problema parece estar asociado a la imposibilidad del modelo de reproducir con precisión la geometría con el paso de la malla utilizado en este trabajo. Al no poder reproducir las aristas se pierde la capacidad de simular el desprendimiento de la capa límite que se produce en todo el largo de la arista derecha que produce la depresión observada, por el contrario el flujo permanece pegado y se observa un gradiente opuesto al obtenido en el ensayo en modelo físico.

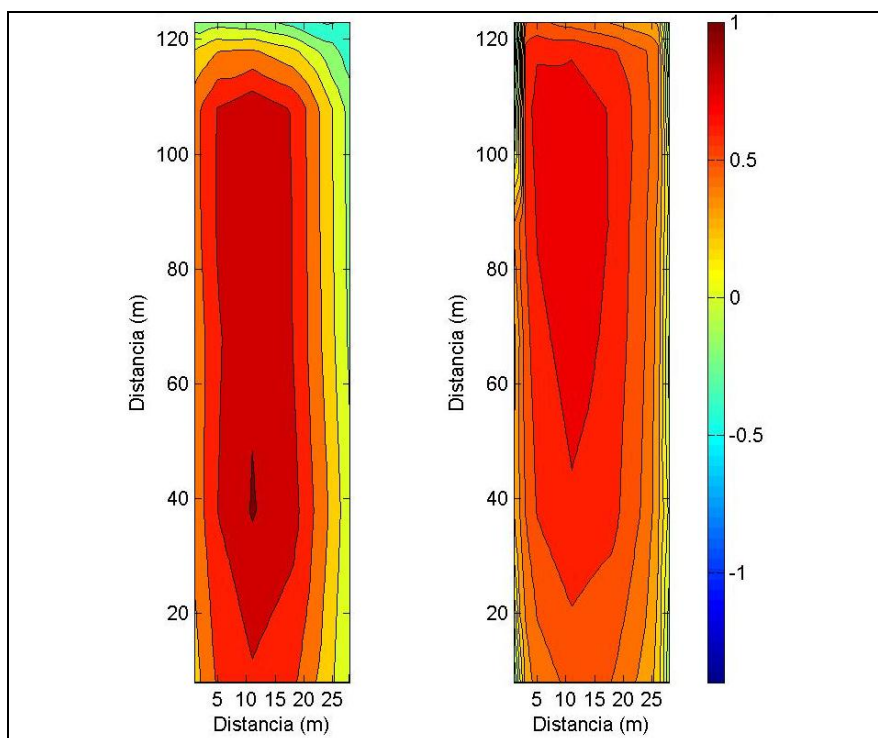


Figura 14: Coeficientes de presión medios en la fachada 2, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

En la fachada 2 (Figura 14) se encuentran concordancias tanto cualitativas como cuantitativas. Los coeficientes de presiones medios en gran parte de la fachada coinciden. En esta fachada se encuentra el punto de estancamiento, o sea donde el coeficiente de presión medio es 1. Los gradientes de presiones sobre las aristas son menos pronunciados en la simulación numérica que en el ensayo en el túnel, esto también puede deberse a problemas relacionados con el paso de la malla.

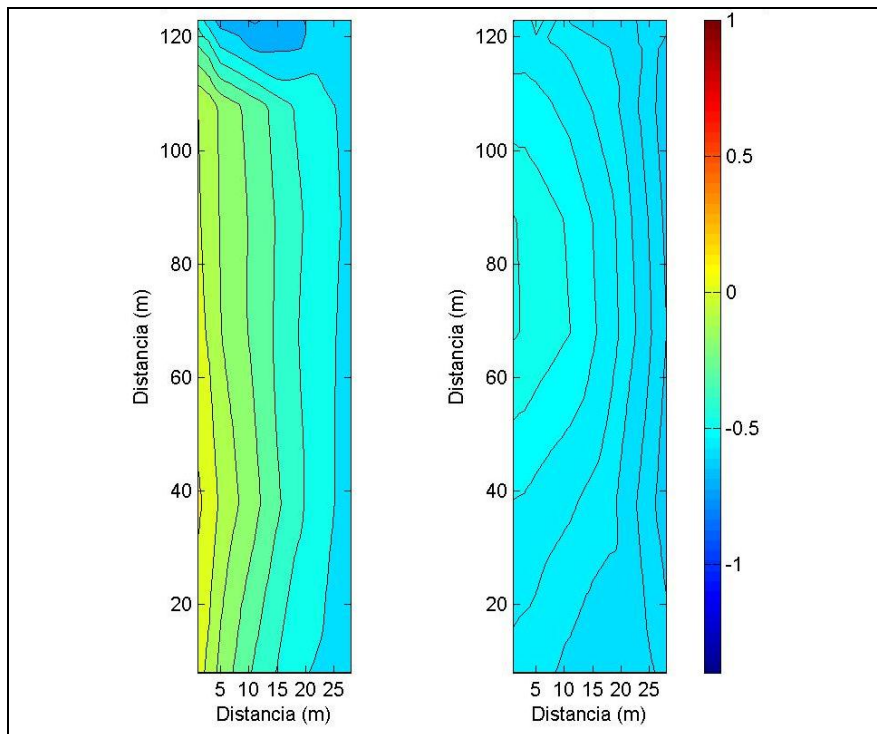


Figura 15: Coeficientes de presión medios en la fachada 3, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

Sobre la fachada 3 (Figura 15) se verifica un patrón similar en ambos ensayos aunque el gradiente es levemente mayor en la simulación al observado en el ensayo en el túnel de viento.

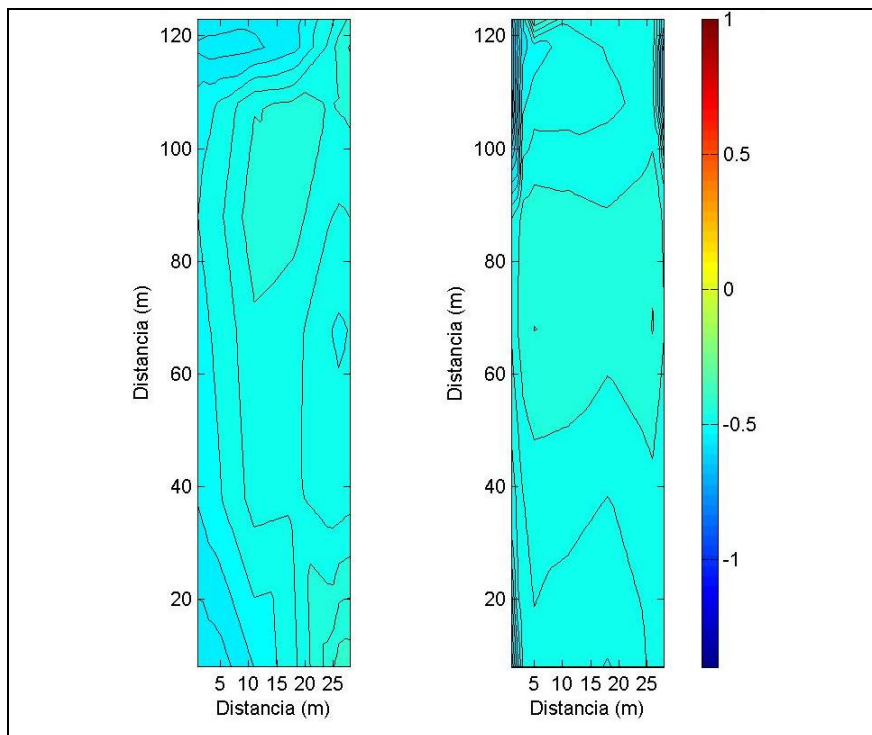


Figura 16: Coeficientes de presión medios en la fachada 4, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

En la fachada 4 (Figura 16) la simulación obtiene resultados que concuerdan casi totalmente con los resultados del modelo físico.

A continuación se muestran, en la Figura 16 y Figura 17, la comparación entre los coeficientes de presiones máximos registrados en la simulación numérica y en el modelo físico, para las fachadas 1 y 2.

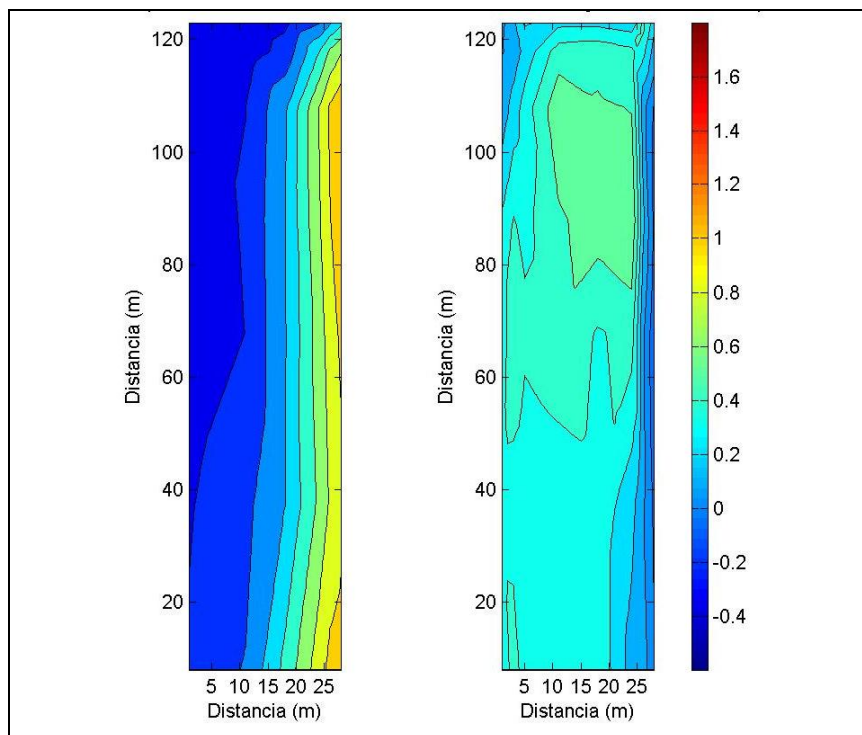


Figura 17: Coeficientes de presión máximos en la fachada 1, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

Al igual que para los coeficientes de presiones medias se obtiene el mismo tipo de discrepancia para los coeficientes de presiones máximas en la fachada 1 (Figura 17).

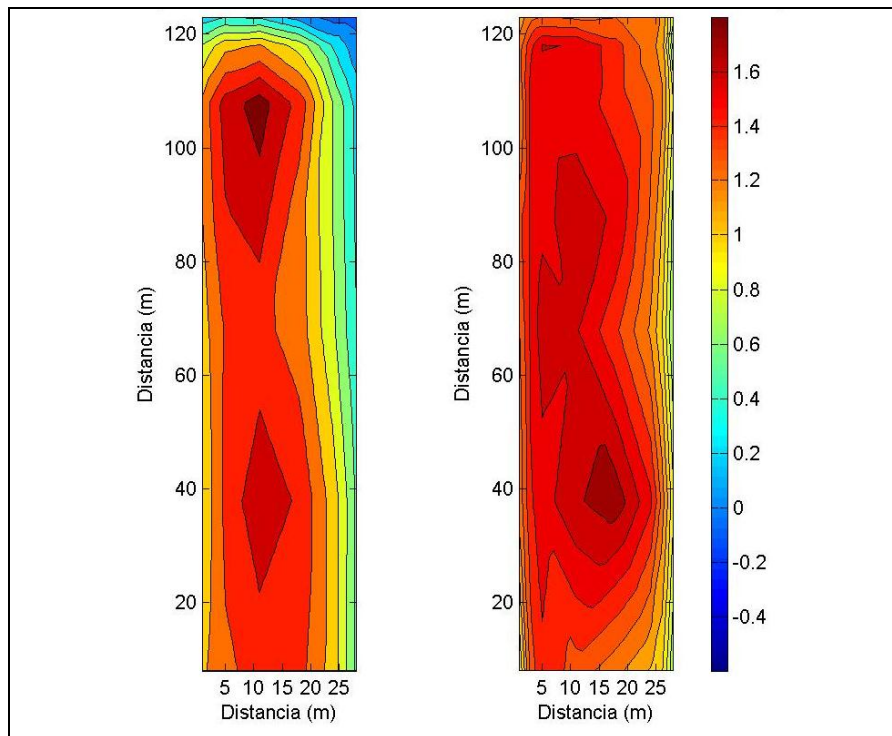


Figura 18: Coeficientes de presión máximos en la fachada 2, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

También en la fachada 2 (Figura 18) se obtienen concordancias en los coeficientes máximos. Aunque los gradientes sobre las aristas son más suaves en la simulación numérica. Hay dos zonas donde se dan los valores máximos (a 40 y 100m en escala de prototipo) y una zona central a 60 m de altura en escala de prototipo, donde los coeficientes de presión son algo menores. Esto también es captado por la simulación.

Los coeficientes de presión mínima en las Fachadas 1 y 2 se muestran en la Figura 19 y la Figura 20.

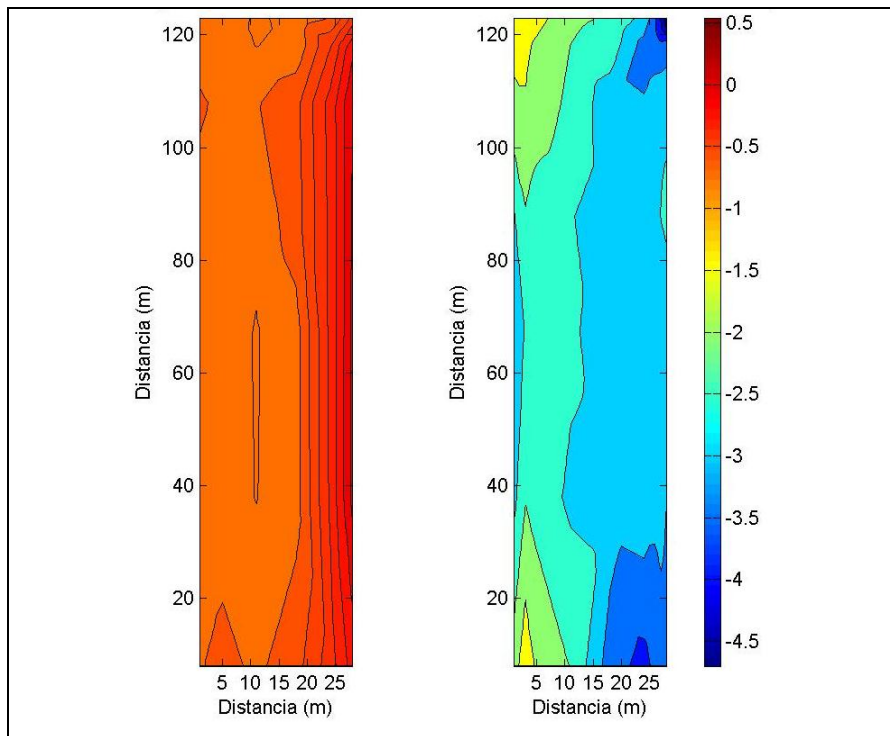


Figura 19: Coeficientes de presión mínimos en la fachada 1, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

Los coeficientes de presión mínima tienen discrepancias muy importantes en la fachada 1 (Figura 19). La simulación obtuvo valores entre -0,5 y -1 y en el túnel de viento se obtuvieron valores entre -1,5 y -4,5. Anteriormente habíamos explicado que las discrepancias en los coeficientes medios y máximos sobre la fachada 2 (Figura 20) podían estar relacionadas con el paso de la malla, y que esta no permitía resolver el desprendimiento de la capa límite que se da sobre la arista derecha, esto también parece ser la causa de las importantes diferencias obtenidas en esta cara.

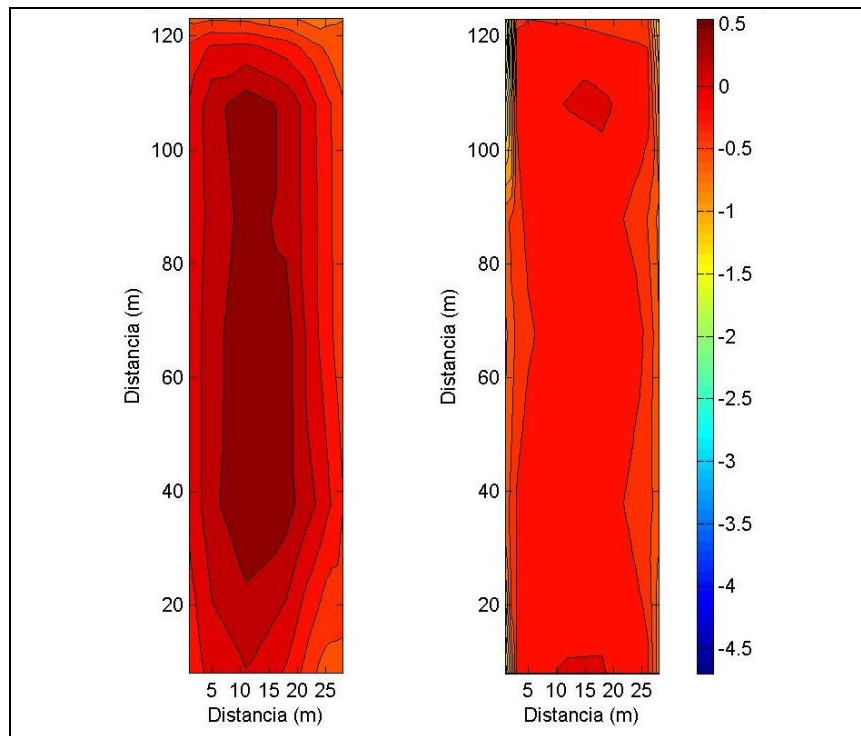


Figura 20: Coeficientes de presión mínimos en la fachada 2, modelo numérico (izquierda) y túnel de viento (derecha).

Los valores de los coeficientes de presión mínima en la fachada 2 concuerdan razonablemente: la simulación arroja valores de coeficientes de presión mínima entre 0,5 a -0,5 y en el túnel de viento se obtuvieron valores entre 0 y -0,5 en casi toda la cara, aunque se dan valores menores en los vértices superiores. Los valores en los vértices se deben a estructuras de escala menor al paso de la malla por lo que es razonable que no sean reproducidos por la simulación.

7 CONCLUSIONES

El sistema de simulación de la capa límite permitió obtener un flujo turbulento que tiene características de capa límite. Las diferentes configuraciones de rugosidad impuestas lograron distintas características pero todavía no se tiene un método que permita actuar sobre el flujo modificando los parámetros de rugosidad obteniendo resultados previsibles. Se hicieron diferentes simulaciones y se escogió la que mejor se adaptaba a las características deseadas. Existe la necesidad de desarrollar un método para actuar sobre el flujo y modificarlo de la manera que se necesite.

El modelo fue capaz de reproducir cualitativamente el flujo en torno al complejo edilicio planteado. Cuantitativamente pudo establecer concordancias razonables aun cuando la geometría de la base no fue reproducida totalmente, lo que puede afectar los resultados. La mayor discrepancia se obtuvo en el punto 14, que está ubicado sobre un fuerte gradiente de velocidad, lo cual hace que los resultados sean muy sensibles a la posición.

Los campos de presiones medias fueron reproducidos cualitativamente y cuantitativamente bien, salvo en la fachada 1, en la que se encuentran diferencias importantes. Se entiende que estas diferencias se deben a la incapacidad del modelo de simular el desprendimiento de capa límite que se produce en la arista de la derecha de la fachada 1. Esto puede ser corregido refinando la malla de forma que se pueda resolver las escalas involucradas en este proceso. Es

necesario que el modelo reproduzca el “filo” de las aristas.

Los campos de presiones máximas básicamente siguieron el comportamiento de las presiones medias; las discrepancias más importantes se dan también en la fachada 1. Se encontraron concordancias especialmente fuertes en la fachada 2.

Salvo en la fachada 2, los campos de presión mínima fueron muy diferentes a los observados en el túnel de viento. Las discrepancias se pueden deberse a que las presiones mínimas se deben a estructuras de flujo de menor escala de lo que puede resolver la malla.

En consecuencia se plantea realizar nuevas simulaciones refinando el paso de la malla, en todo el dominio y en el entorno del edificio de interés. En el mismo sentido, es necesario mejorar la estrategia de interpolación utilizada para fijar la geometría de las edificaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Chuan-Chieh Liao, Yu-Wei Chang, Chao-An Lin, J.M. McDonough, Simulating flows with moving rigid boundary using immersed-boundary method. *Computers & Fluids*, 39:152-167, 2010.
- Ferziger J. H., Peric M, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, 2002.
- Fischer-Antze T., Stoesser T., Bates P., Olsen N. R. B., 3D numerical modeling of open-channel flow with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 39 N3, 2001.
- Lehnhauser T. and Schafer M., Improved linear interpolation practice for finite-volume schemes on complex grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 38:625-645, 2002.
- Mora Acosta J., *Numerical algorithms for three dimensional computational fluid dynamic problems*. PhD Thesis, Universidad Politecnica de Catalunya.
- Pope, S. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- Schlichting, H., Gersten, K., *Boundary Layer Theory*. Springer, 2000.
- Simiu, E., Scanlan, R., *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.
- Tabor G. R., Baba-Ahmadi M. H., Inlet Conditions for large eddy simulations: A review. *Computers & Fluids*, 39:553-567, 2010.
- Tennekes, H. & Lumley, J., *A First Course in Turbulence*. The MIT press, Cambridge, MA, 1972.
- Usera G., Vernet A., Ferre J. A., A Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81:471-495, 2008.