

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL VIENTO SOBRE UNA CUBIERTA ABOVEDADA**

**Gustavo C. Balbastro<sup>1</sup>, Victorio E. Sonzogni<sup>1,2</sup>, Gerardo Franck<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> GIMNI, Facultad Regional Santa Fe, UTN  
y Facultad Regional Rafaela, UTN  
Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina.  
Tel: 54-342-4750140  
e-mail: gbalbastro@yahoo.com

<sup>2</sup> CIMEC, INTEC, UNL-CONICET  
Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina.  
Tel: 54-342-4511594 Fax: 54-342-4550944  
e-mail: sonzogni@intec.unl.edu.ar

**Palabras claves:** viento – CFD – simulación.

**Resumen:** *Se realiza la simulación numérica de la acción del viento sobre una cubierta abovedada aislada, procurando reproducir los resultados de ensayos sobre modelos llevados a cabo en túnel de viento de capa límite sobre modelos de este tipo de construcciones, ampliamente difundidas en la República Argentina.*

*La presente comunicación forma parte de un trabajo de tesis cuyo objetivo es determinar los coeficientes de presión sobre este tipo de construcciones, dado que el reglamento de cálculo vigente aporta escasa información para el diseño de este tipo de estructuras.*

*Se reproduce el flujo en 3-D y el perfil de velocidades medias del viento, mediante el método de elementos finitos.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Las construcciones del tipo cubiertas abovedadas aisladas, sin cerramiento perimetral, son de uso frecuente en la República Argentina y otros países del Cono Sur, tanto en zonas urbanas como rurales, ya sea por requisitos funcionales como es el caso de instalaciones deportivas, o bien por modificaciones a lo largo de la vida útil, como así también durante la etapa constructiva de una construcción destinada a ser cerrada total o parcialmente, etapa que puede durar un tiempo prolongado motivos ajenos al proyecto. El ingeniero estructural se vale del auxilio de tablas de coeficientes de presión para evaluar las acciones sobre la estructura, contenidas usualmente en los códigos. En el caso de la República Argentina, tanto reglamento vigente<sup>1</sup> como el proyecto de reglamento<sup>2</sup> que actualmente está próximo a reemplazarlo no aportan datos específicos para el cálculo de acciones sobre este tipo de cubiertas. En el primer caso se propone asimilar la cubierta abovedada a una cubierta de faldones planos, inscrita en el arco, analogía que no resulta apropiada, ya que las características del flujo alrededor de una cubierta a dos aguas, que presenta una arista viva en la cumbre, son sustancialmente diferentes de las del flujo alrededor de una cubierta curva, que depende fuertemente del número de Reynolds, tal como pusieran de manifiesto Marighetti et al.<sup>3</sup> mediante ensayos en el Túnel de Viento de Capa Límite de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). En el segundo caso, sólo se cuenta con valores para edificios con cubiertas curvas cerrados total o parcialmente. También en este caso el flujo alrededor de este tipo de construcciones es diferente del correspondiente a la cubierta aislada, según muestran los trabajos sobre este tema realizados por Natalini et al.<sup>4</sup> y Natalini<sup>5</sup>.

Los ensayos en túnel de viento de capa límite son una metodología bien conocida para determinar los coeficientes de presión para el estudio de las obras civiles, pero sin embargo presentan algunas limitaciones al momento de cumplir estrictamente las leyes de semejanza de modelos, ya que resulta sumamente difícil alcanzar en los ensayos el mismo número de Reynolds que en el prototipo a escala real. Esta limitación cobra importancia al tratar con formas geométricas cuyo comportamiento aerodinámico resulta muy sensible al número de Reynolds, como es el caso de las cubiertas curvas. Para salvar esta limitación, se emplean determinadas técnicas experimentales, como las analizadas por Ribeiro<sup>6</sup>. En los ensayos tomados como referencia se recurrió a una de estas técnicas experimentales, produciendo cierta rugosidad superficial sobre la cubierta de los modelos, adhiriéndole arena de distintas granulometrías, con el fin de forzar el régimen transcrito con un número de Reynolds menor.

El estudio de los coeficientes de presión sobre las cubiertas abovedadas aisladas mediante métodos computacionales es tema de un trabajo de tesis, y este trabajo constituye la continuación de los presentados en comunicaciones anteriores<sup>7,8,9,10</sup>, en los que se analizó el escurrimiento 2-D, reproduciendo las condiciones de los ensayos en túnel de viento realizados en la UNNE<sup>11,12</sup>, mediante un programa comercial GID-Tdyn 7.1, así como resultados iniciales en 3-D mediante el programa PETSc-FEM<sup>13,14</sup>, con procesamiento en paralelo.



Figura 1: Vista de una construcción típica.

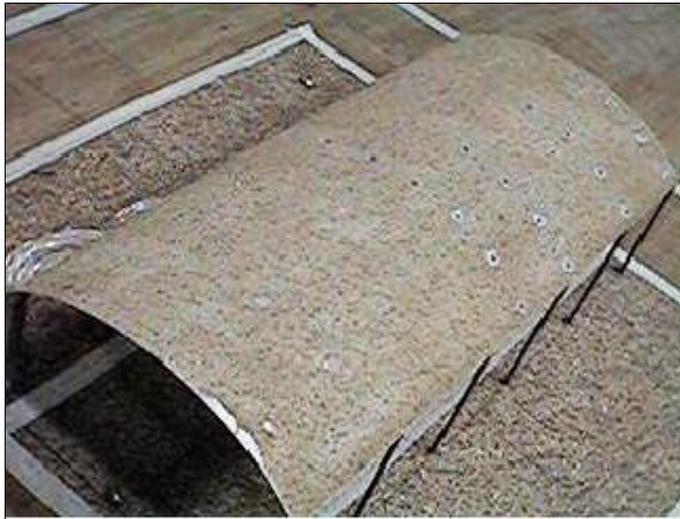


Figura 2: Vista de uno de los modelos de referencia, con rugosidad superficial.

## 2 MODELO ANALIZADO

Se analizó un modelo tridimensional, como el que se muestra en la figura 3. El espesor de la cubierta es de 1,5 mm, el radio de curvatura de la misma es de 118 mm y el diámetro de las columnas es de 4 mm. El dominio representa una porción de la sección de ensayo del túnel de viento. La malla se generó con MeshSuite y GiD 7.1, y el análisis se realizó con el programa PETSc-FEM, en el cluster “Gerónimo” del CIMEC<sup>15</sup>. Para el postproceso de los resultados se empleó GiD 7.1 y Matlab 6.

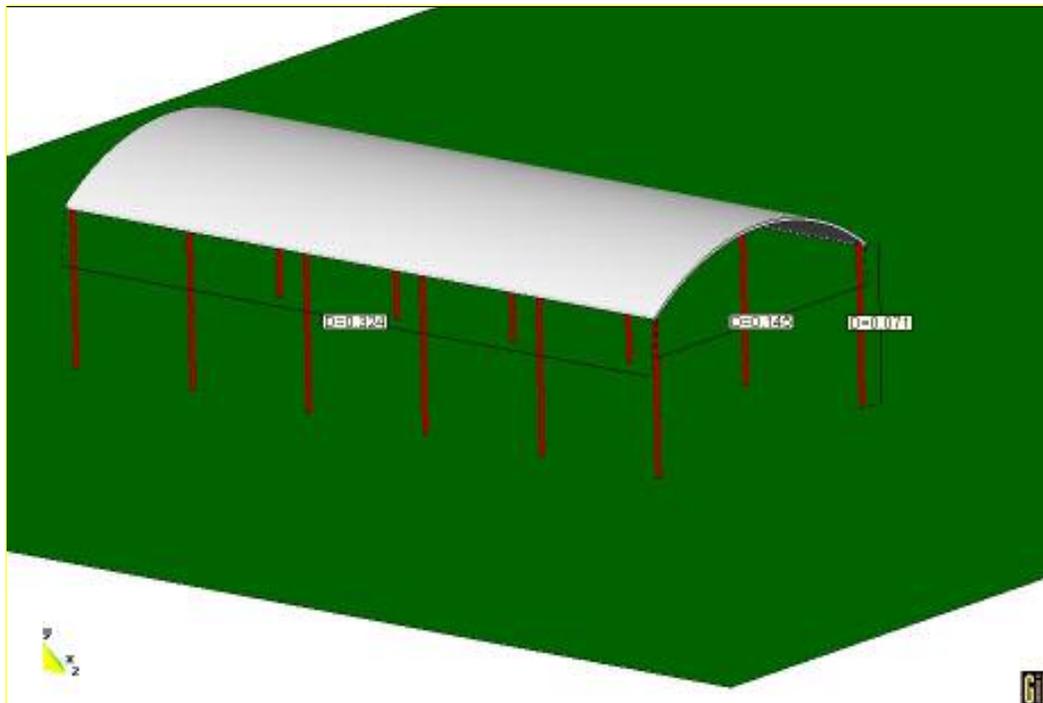


Figura 3: Geometría del modelo. Dimensiones en metros

El programa PETSc-FEM, desarrollado en el CIMEC, está orientado principalmente a la resolución numérica de problemas de mecánica de fluidos, se basa en la librería de cálculo científico PETSC<sup>16</sup> (Portable Extensible Tool for Scientific Computations) y la librería de paso de mensajes MPI<sup>17</sup> (Message Passing Interface). El código PETSC-FEM es ventajoso en su flexibilidad y capacidad de paralelizar en forma eficiente el proceso de resolución, permitiendo además utilizar diferentes estrategias para la misma.

El volumen se discretiza con  $1,09 \times 10^6$  tetraedros, tal como se muestra en la Figura 4. La malla generada es de  $2,18 \times 10^5$  nodos, de los cuales  $4 \times 10^4$  se ubican sobre la cubierta. La malla se refinó en proximidad de la superficie de la cubierta y del piso del túnel. Con esta malla la dimensión de los elementos en la superficie del cuerpo de  $1,75 \times 10^{-3}$  m. Analizando las escalas asociadas el flujo, de acuerdo con Tennekes y Lumley<sup>18</sup>, es decir la microescala de Taylor, asociada a los movimientos a escala integral, definida por  $\lambda = (15/A)^{1/2} R_i^{-1/2} l$ , y la microescala de Kolmogorov, definida por  $\eta = A^{-1/4} R_i^{-3/4} l$ , siendo  $R_i$  el número de Reynolds a escala integral,  $l$  la longitud característica adoptada, que como en (4) se adoptó  $l$  igual al doble del radio de curvatura de la cubierta, y  $A$  una constante de orden 1 que supondremos igual a 0,5.

Con estos valores se obtuvo  $\lambda \approx 2,7 \times 10^{-3}$  m y  $\eta \approx 2,68 \times 10^{-5}$  m. Las condiciones de contorno aplicadas se indican en la Tabla 1. En la misma se designó con  $u_i$  a la velocidad según la coordenada  $i$ -ésima, en m/s, y  $p$  es la presión en Pa. Para el caso de  $u_x$  en la sección de entrada,  $f(y)$  es la expresión con que se ajustó el perfil de velocidades medias

relevado en el túnel de viento que ya se empleó en trabajos anteriores<sup>7</sup> y es reproducida en (1).

Tabla 1 : Condiciones de contorno de la simulación numérica.

SUPERFICIE	CONDICIÓN
PISO TÚNEL	$u_x = u_y = u_z = 0$
PAREDES LATERALES TÚNEL	$u_y = u_z = 0$
SECCIÓN DE SALIDA	$p = 0$
SECCIÓN DE ENTRADA	$u_x = f(y) ; u_y = u_z = 0$
TECHO TÚNEL	$u_y = u_z = 0$
CUBIERTA CURVA	$u_x = u_y = u_z = 0$

$$\overline{u_x} = 4,2772 \ln y + 24,522 \quad (1)$$

La expresión anterior vale para  $y > 0$ , ingresando  $y$  en m, se obtiene  $\overline{u_x}$  en m/s. Este perfil de velocidades medias del viento reproduce el correspondiente a zonas suburbanas.

Las simulaciones realizadas con PETSc-FEM se hicieron con un paso de tiempo inicial de  $1 \times 10^{-4}$  s, finalizando con  $1 \times 10^{-3}$  s, con un total de 5000 pasos, que para la velocidad de referencia representa una distancia recorrida por el fluido de más de 300 veces la cuerda del modelo. Para esta resolución se aplicó un modelo de turbulencia LES (large eddy simulation), por los que el código resuelve las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento con una viscosidad cinemática “efectiva”  $\nu_e = \nu + \nu_t$ , donde  $\nu$  es la viscosidad molecular y  $\nu_t$  es la viscosidad “turbulenta”. Esta última se estima por medio del modelo de subgrilla de Smagorinsky<sup>19</sup>, que está dada por (2)

$$\nu_t = C_S^2 h_e^2 \sqrt{\underline{\underline{S}} : \underline{\underline{S}}} \quad (2)$$

Donde  $C_S$  es la constante de Smagorinsky, que en este caso se tomó igual a 0,15,  $h_e$  es el tamaño típico del elemento, que cerca de la superficie de la cubierta es de  $1,75 \times 10^{-3}$  m, es decir menor que la microescala de Taylor  $\lambda$  calculada, y  $\underline{\underline{S}}$  es el tensor simétrico tasa de deformación. Por otra parte, el número de onda es  $k = \pi/h_e \approx 1800$ .

Los parámetros físicos del aire, densidad y viscosidad, se tomaron en todos los casos iguales a los ensayos de referencia, siendo  $\rho = 1,185 \text{ Kg/m}^3$  y  $\mu = 1,795 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s}$ , igual que en los trabajos citados. Si bien en los ensayos de referencia se emplearon dos tipos de flujo, uno suave, donde la intensidad de turbulencia de la componente longitudinal del flujo  $I_{u,x}$  es menor del 2%, y otro turbulento donde  $I_{u,x} \approx 20\%$ , para el presente trabajo el perfil de velocidades aplicado no incluye componente fluctuante, sino solamente las velocidades medias dadas por (1). A su vez, los ensayos de referencia se llevaron a cabo sobre un modelo de superficie lisa y dos con distintos grados de rugosidad. El parámetro que caracteriza la rugosidad es  $k/d$ , siendo  $d$  igual a dos veces el radio de curvatura de la cubierta. Para el modelo de rugosidad moderada resulta ser  $k/d = 1,69 \times 10^{-3}$ , mientras que para el de rugosidad

alta es  $k/d = 3,30 \times 10^{-3}$ . En la simulación numérica no se consideró rugosidad superficial, que exigiría una malla mucho más detallada o bien una ley de pared a tal efecto. De todas maneras, podría pensarse que la poligonal que aproxima el arco es de alguna manera una forma de rugosidad, si bien de un valor mucho menor que la provocada en los modelos experimentales.

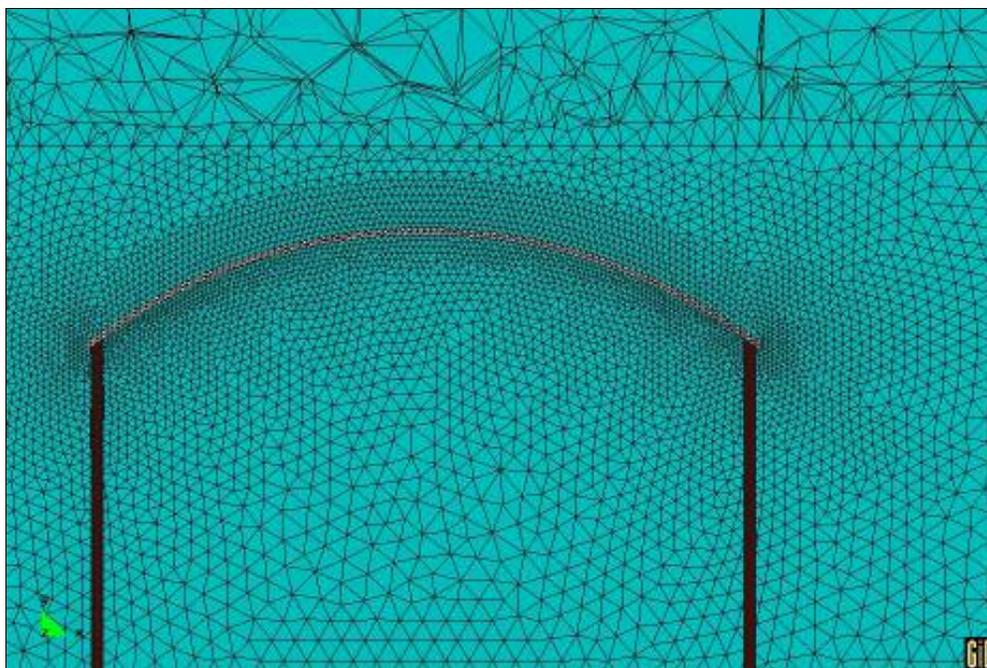


Figura 4: Detalle de un corte de la malla.

A los fines de la comparación se tomará el modelo 2-II, ya que se disponen valores de coeficientes de presión sobre ambas caras del mismo, en toda la superficie, mientras que de los otros modelos se tienen datos parciales.

Tabla 2 : Denominación de los modelos de referencia.

MODELO	SUPERFICIE	FLUJO
1-I	Lisa	Suave
1-II	Lisa	Turbulento
2-II	Rugosidad Moderada	Turbulento
3-I	Rugosidad Alta	Suave
3-II	Rugosidad Alta	Turbulento

### 3 RESULTADOS

A partir de la simulación se obtuvieron los campos de velocidad y presión para cada paso

de tiempo. Con los valores de presión sobre la superficie de la cubierta curva se calcularon los coeficientes de presión externa  $c_{pe}$ , e interna  $c_{pi}$ , en cada punto y para cada paso de tiempo, según la ecuación (3).

$$c_{pe,i} = \frac{\Delta p}{q_{ref}} \quad (3)$$

En la ecuación (3) se denomina:

$\Delta p$  = a la diferencia entre la presión en un punto sobre la cubierta y la presión estática de referencia.

$q_{ref}$  = es la presión dinámica de referencia, siendo:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho u_{ref}^2 \quad (4)$$

Donde:

$u_{ref}$  = es la velocidad de referencia.

Las presiones y velocidades de referencia se toman en la ubicación de la antena de Pitot-Prandtl adoptada en el ensayo de referencia, que fue a un costado del modelo, en la zona no perturbada de la corriente de aire, y a la altura de la cúspide de la bóveda. El número de Reynolds se definió según la expresión (5).

$$Re = \frac{u d}{\nu} \quad (5)$$

$u = u_{ref}$

$d$  = el doble del radio de curvatura del modelo

$\nu$  = viscosidad cinemática del aire,  $\mu/\rho$

El valor alcanzado fue  $Re = 2,3 \times 10^5$ .

Se determinaron valores máximos, medios, mínimos y desvío estándar de los  $c_{pe}$  y  $c_{pi}$ . Estos resultados se presentan en las figuras 5 a 11, junto a campos de velocidad en secciones del dominio, para distintos pasos de tiempo. En todos los casos, el escurrimiento es de izquierda a derecha, y las velocidades se expresan en m/s.

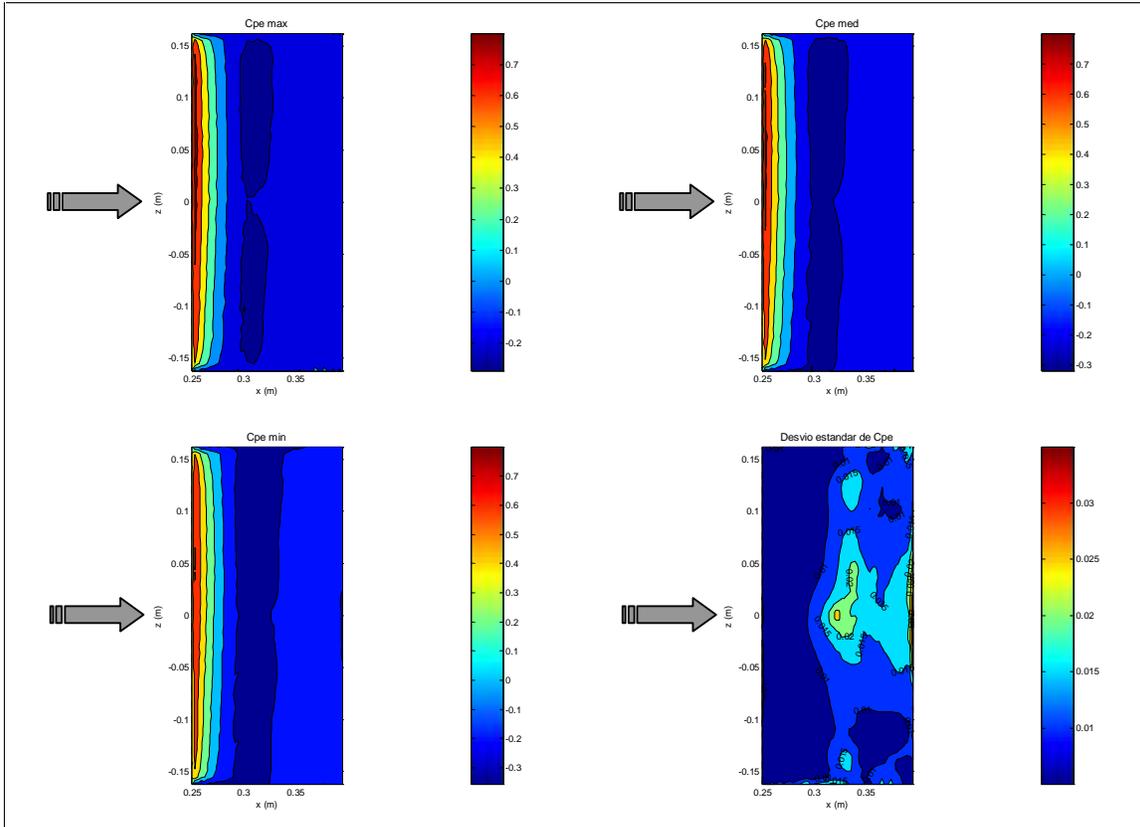


Figura 5: Resultados PETSc-FEM / LES:  $c_{pe}$  máximo, medio y mínimo. Desvío estandar de  $c_{pe}$

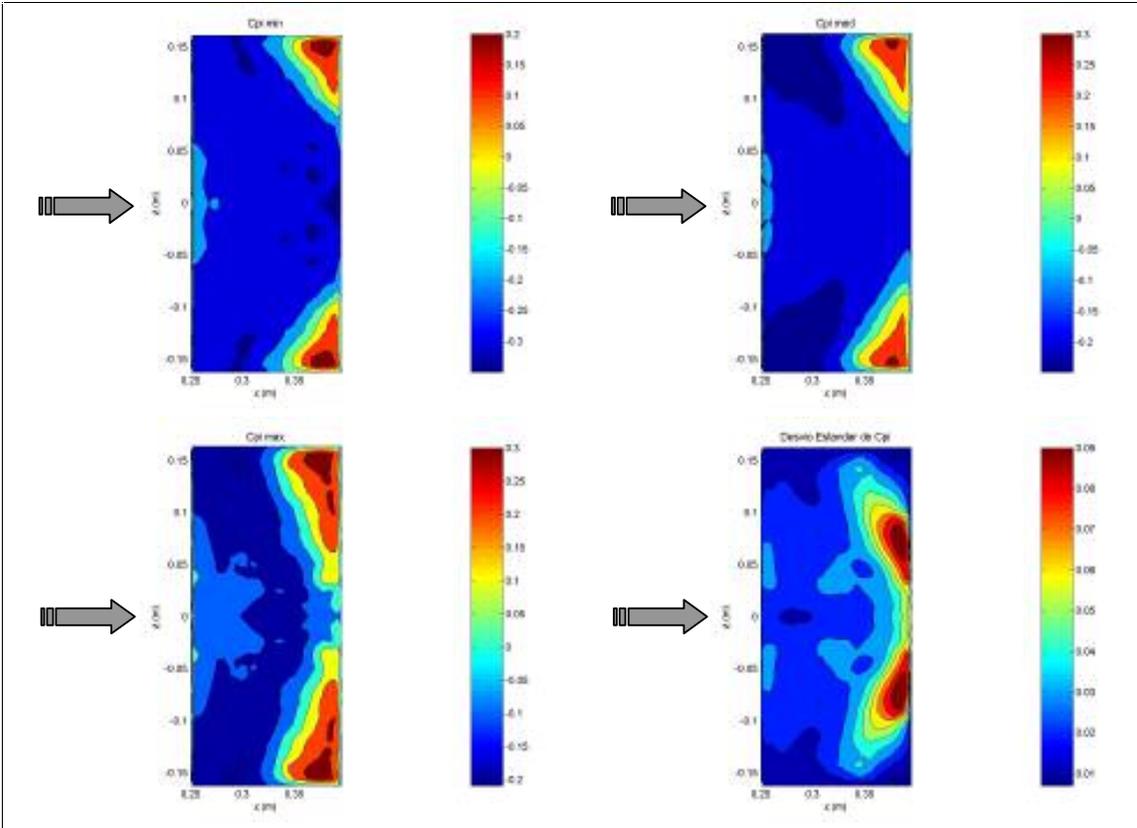


Figura 6: Resultados PETSc-FEM / LES.  $c_{pi}$  máximo, medio y mínimo. Desvío estándar de  $c_{pi}$

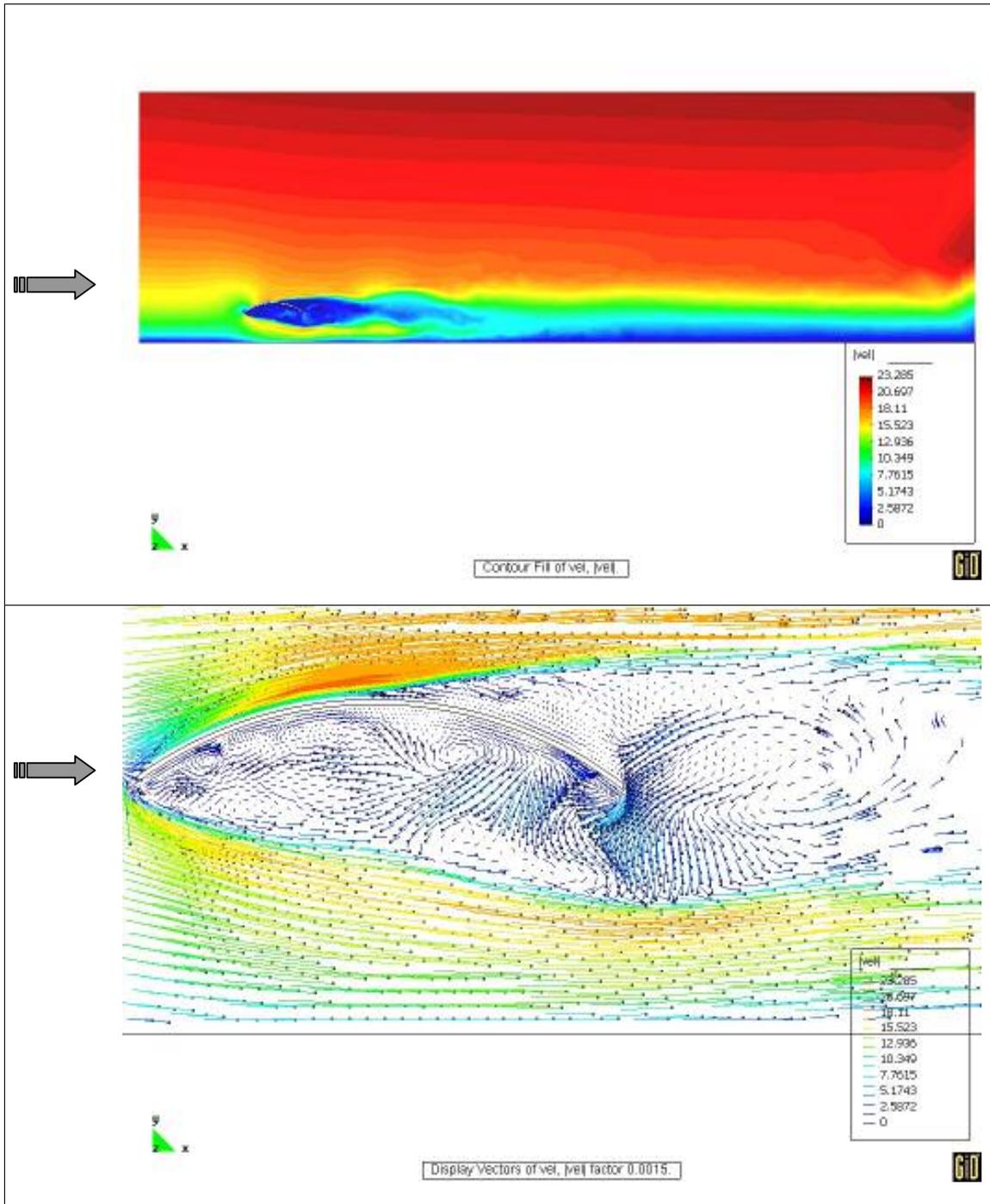


Figura 7: Campo de velocidades en el plano de simetría de la cubierta, para  $t = 0,515$  s. General y detalle

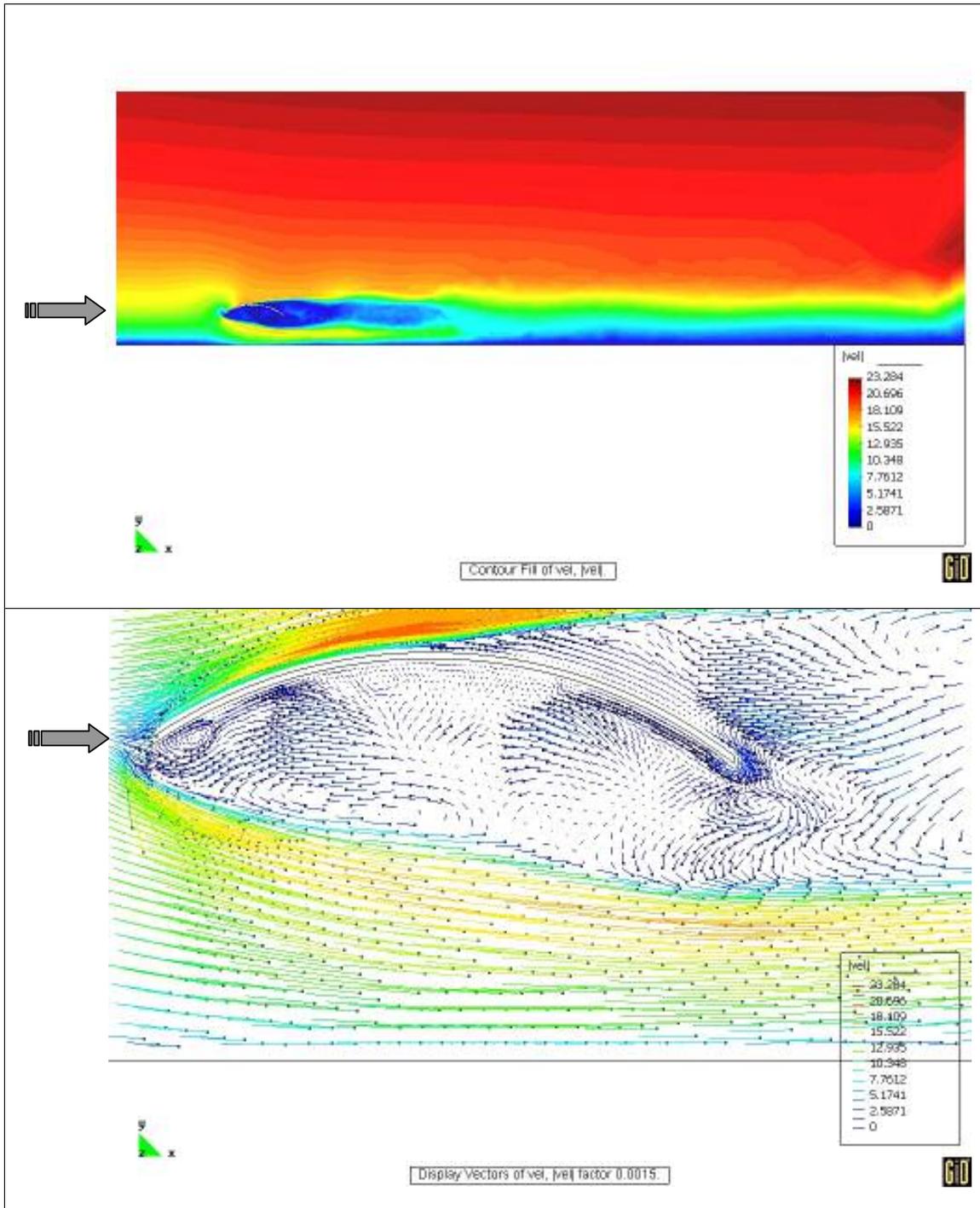


Figura 8: Campo de velocidades en el plano de simetría de la cubierta, para  $t = 1,539$  s. General y detalle

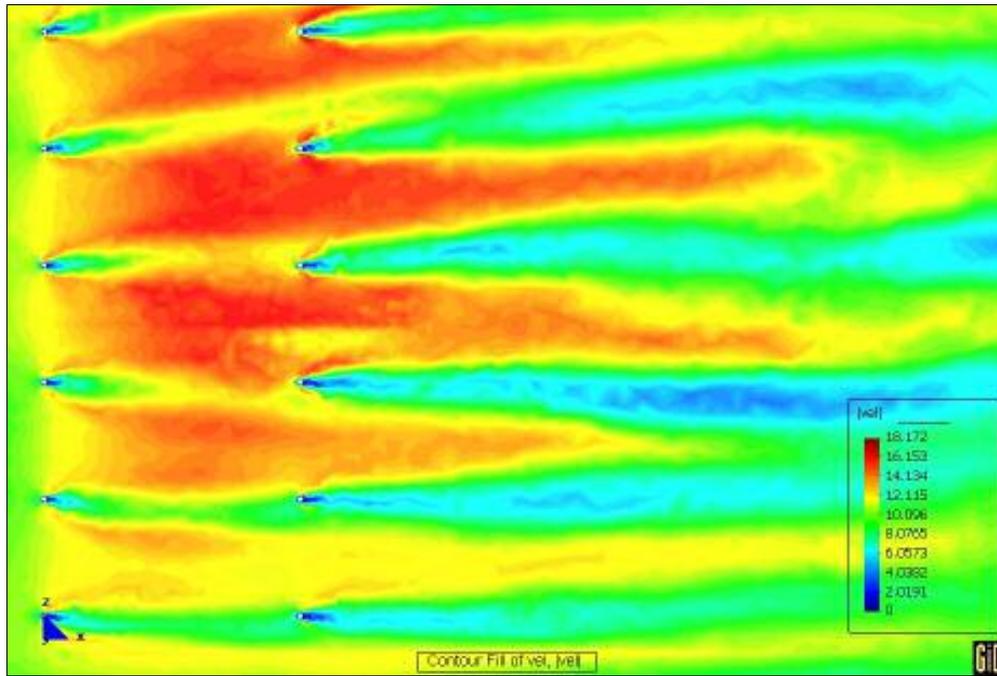


Figura 9: Estelas producidas por las columnas bajo la cubierta, en  $y = 0,035$  m,  $t = 1,539$  s

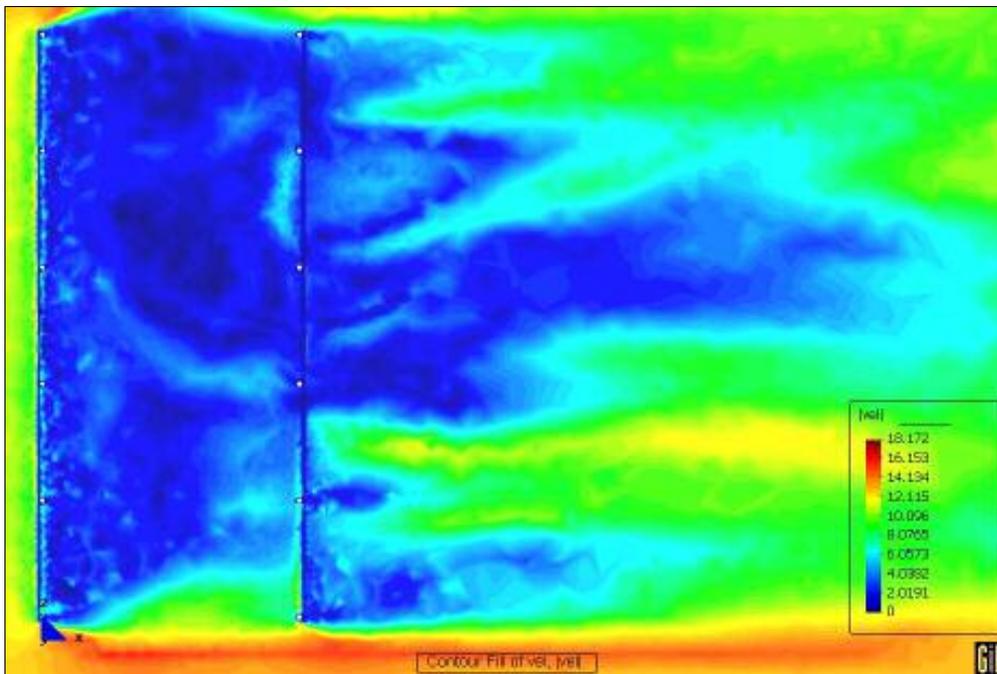


Figura 10: Velocidades bajo la cubierta, en  $y = 0,071$  m (altura del filo de la placa),  $t = 1,539$  s

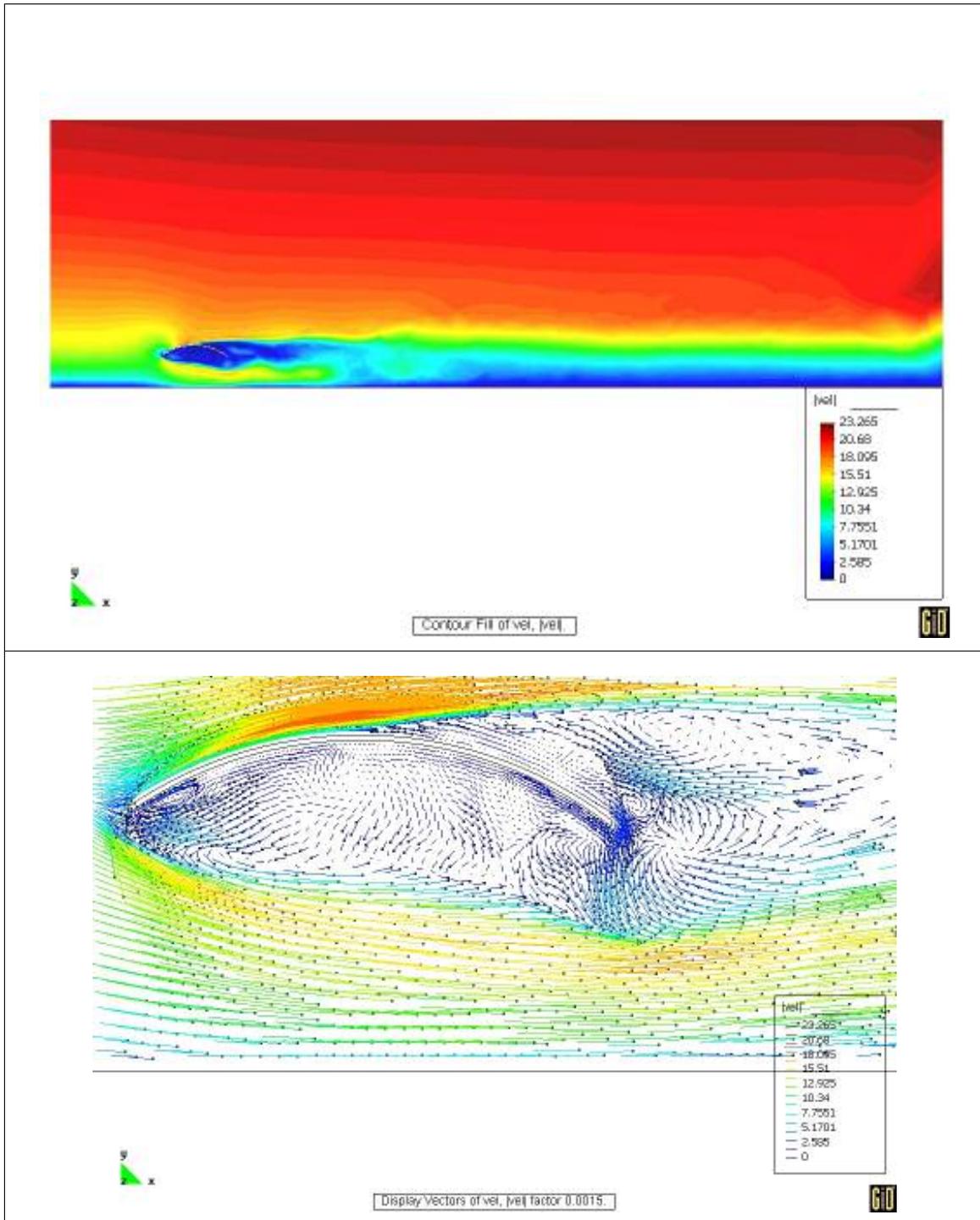


Figura 11: Campo de velocidades en el plano de simetría de la cubierta, para  $t = 1,715$  s. General y detalle

#### 4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de la observación de los resultados de la simulación numérica, y comparándolos con los valores del ensayo de referencia pueden hacerse algunas apreciaciones.

Es importante señalar que en los trabajos previos realizados en 2-D se habían obtenido resultados con un razonable ajuste a los valores experimentales para los  $c_{pe}$ , mientras que los  $c_{pi}$  habían mostrado una dispersión inadmisibles.

Antes de realizar comparaciones entre los valores de referencia y la simulación, es importante señalar que existe una diferencia importante en la cantidad de puntos registrados con uno y otro método, así como en la duración del registro. Para el caso de los datos experimentales, los datos fueron obtenidos de 12 tomas de presión ubicadas en un cuadrante del modelo, más 6 tomas sobre el arco central, correspondiendo el reporte al promedio de un registro de 55 segundos, mientras que para la simulación la cantidad de puntos registrados es mucho mayor, más de 78.000 entre ambas caras, mientras que la duración del registro es menor, según se consignó más arriba. Además, en la simulación realizada el flujo de entrada no tiene componente fluctuante, mientras que en el túnel esta componente está presente.

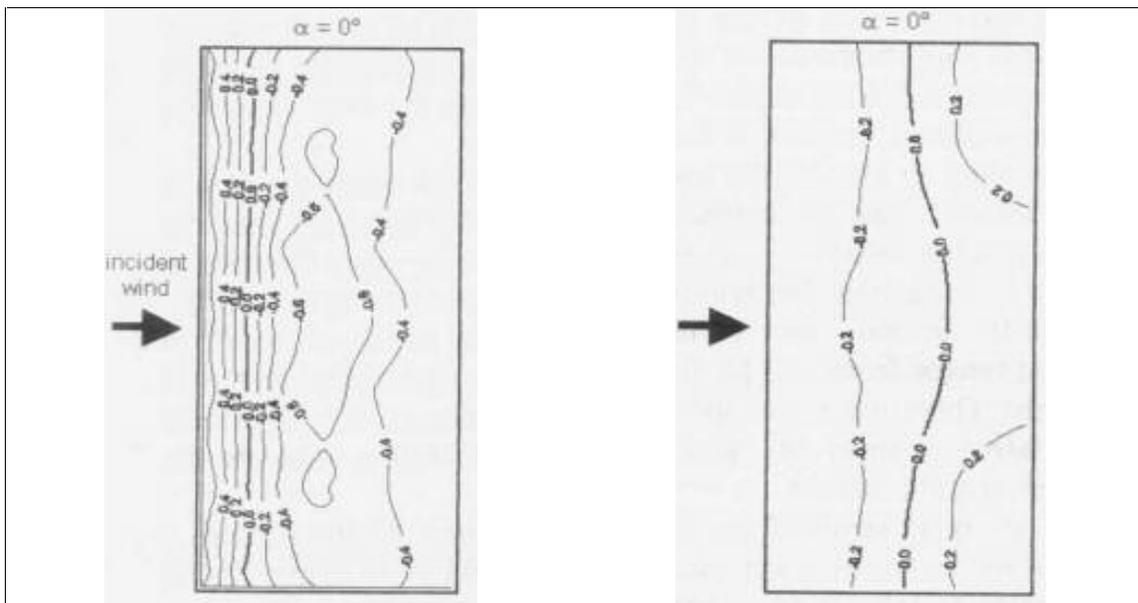


Figura 15:  $c_{pe}$  y  $c_{pi}$  medios experimentales<sup>20</sup>

Analizando los coeficientes de presión externa  $c_{pe}$  se observa que en la zona de  $c_{pe}$  positivos, a barlovento, el ajuste de la simulación a los datos experimentales es muy bueno, tanto en distribución como en valores. La ubicación de la línea donde se producen los valores

nulos es próxima a la experimental, si bien algo desplazada a sotavento y presentando en la simulación una curvatura hacia barlovento, lo que puede deberse a que los puntos de toma de presión usados para obtener los valores experimentales son muchos menos que en la simulación numérica, y se encuentran más alejados de los bordes. La ubicación del punto de separación de la capa límite permanece estable a lo largo de la simulación, según puede observarse en los distintos campos de velocidades. En cuanto a la zona de  $c_{pe}$  negativos, se observan succiones de menor valor absoluto en la simulación que en la referencia experimental. Las succiones obtenidas numéricamente son aproximadamente 50% del valor experimental en la zona más a sotavento. Además, la distribución de los resultados numéricos es en forma de franjas paralelas a la cumbrera, mientras que en los valores experimentales se puede observar un bulbo concentrado a ambos lados del plano de simetría.

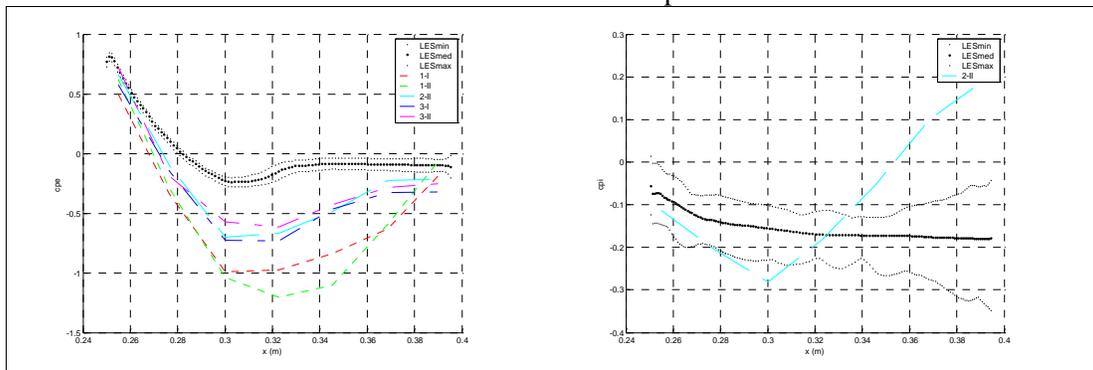


Figura 16:  $c_{pe}$  y  $c_{pi}$  simulados vs. experimentales en el eje de la cubierta

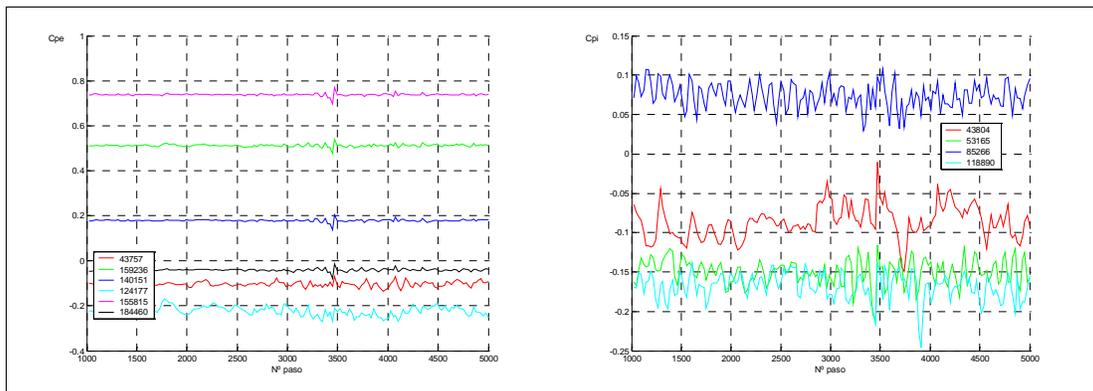


Figura 17: Variación de  $c_{pe}$  y  $c_{pi}$  durante la simulación en distintos puntos de la cubierta

En cuanto a los coeficientes de presión en el intradós,  $c_{pi}$ , la simulación capta los lóbulos de sobrepresiones a sotavento, próximos a los bordes laterales, cuya forma y valor se aproximan a los datos experimentales. La franja de  $c_{pi}$  nulos, que en la referencia experimental es continua en todo el largo de la cubierta, con un arranque coincidente con la cumbrera y una cierta concavidad hacia barlovento, en la simulación aparece cortada, rodeando a ambos

lóbulos. En la simulación prácticamente toda la cara inferior aparece con succiones, salvo los lóbulos mencionados. En cambio, en los valores experimentales se observan succiones en el faldón a barlovento, mientras que la parte a sotavento se encuentra con sobrepresiones. El ajuste entre los valores experimentales y la simulación es mejor en las zonas más alejadas del eje de simetría de la cubierta, mientras que sobre el eje los valores obtenidos no parecen representativos de los experimentales disponibles.

Algunos factores que podrían originar estas diferencias son las mayor cantidad de puntos donde se registra la presión en la simulación numérica, la duración del registro sobre el que se promedian los valores, que es mayor en el ensayo en el túnel de viento, y a la ausencia de la componente fluctuante en la simulación, que de estar presente seguramente induciría una mayor inestabilidad del flujo.

Un cuarto factor que seguramente incide en las diferencias encontradas es el hecho de que la técnica experimental introduce necesariamente perturbaciones en el escurrimiento, por la presencia de las tomas de presión conectadas al instrumental por medio de tubitos flexibles cuyo diámetro interno es de 1,2 mm. Estos tubitos se ubican en el extradós para realizar mediciones de presiones en el intradós y viceversa, y su tamaño no es despreciable con respecto a las dimensiones de la cubierta, hecho que no es de importancia en modelos con paredes cerradas, pero que puede no ser despreciable en estos modelos sin paredes y por lo tanto introducir alteraciones al flujo con respecto a la geometría teórica de la cubierta. Por tal motivo, al momento de la redacción de este trabajo se propuso la realización de un ensayo con otro tipo de modelo con los conductos contenidos en el espesor de la cubierta y que por lo tanto no introduzca estas alteraciones al flujo.

Por otra parte, si bien el modelo generado para la simulación no incorpora *ex-profeso* la rugosidad superficial de algunos de los modelos experimentales de referencia, su comportamiento parece más cercano a estos que a los modelos de superficie lisa. Esto puede deberse a que el modelo simulado es una aproximación de la geometría teórica que bien podría interpretarse como una “rugosidad”, si bien menor que la incorporada en el modelo experimental.

## 5 CONCLUSIONES

Se simularon ensayos en túnel de viento sobre una cubierta abovedada aislada. Los resultados obtenidos para algunos sectores del modelo presentan un ajuste razonable con respecto a los datos tomados como referencia, mientras que en otros sectores existen diferencias que deben ser analizadas.

Las mayores diferencias aparecen en la zona de succiones a sotavento del extradós y a barlovento del intradós.

Se obtuvieron mejores valores en el intradós que los obtenidos en las simulaciones 2-D reportadas anteriormente.

Los valores de la simulación presentaron una baja dispersión con respecto a los valores medios en el extradós, aunque esta variabilidad es mayor en el intradós, a sotavento y cerca de los bordes laterales, lo que resulta esperable.

Es necesario realizar estudios complementarios para determinar o corregir las diferencias halladas. Para mejorar la simulación se buscará obtener un mayor refinamiento de la malla se prevé la colocación de una capa estructurada de elementos prismáticos sobre la cubierta, procedimiento que se mostró como promisorio en la simulación del flujo sobre el modelo de Ahmed, en los trabajos llevados a cabo por Franck et al.<sup>21</sup>. Además se incluirá la componente fluctuante superpuesta al perfil de velocidades medias, para simular con mayor exactitud el viento natural. Por último, para evaluar la incidencia del factor debido a la técnica experimental, se prevé realizar en breve un nuevo ensayo con un modelo de nuevo diseño, que elimine este factor, y se introducirá una “rugosidad” superficial en la malla mediante la aplicación de un “ruido” en las coordenadas de los nodos de la superficie.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Néstor Calvo, del CIMEC, por su colaboración en la aplicación del generador de malla MeshSuite.

Gustavo Balbastro es becario de posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional.

## 7 REFERENCIAS

- [1] INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. *Reglamento CIRSOC 102 – Acción del viento sobre las construcciones*. Buenos Aires, 1982.
- [2] INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. *Proyecto de Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102*. INTI. Buenos Aires, 2001.
- [3] J.O. Marighetti, O.F. Canavesio, B. Natalini, M.B. Natalini, “*Comparación entre coeficientes de presión media en cubiertas aisladas planas y curvas*”, XVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, CD-ROM, Rosario, (2002)
- [4] M.B. Natalini, O.F. Canavesio, B. Natalini, M.J. Paluch, “*Wind tunnel modelling of mean pressures on curved canopy roofs*”, Proc. American Conference on Wind Engineering, CD-ROM, Clemson, (2001)
- [5] M.B. Natalini, “*Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas*”, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, (2005)
- [6] J.L. Ribeiro, “*Efeitos da rugosidade superficial sobre as pressões medias e flutuantes em cilindros circulares fixos em fluxo bidimensional*”, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (1989)
- [7] G.C. Balbastro, V.E. Sonzogni, “*Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: resultados numéricos preliminares*”, Mecánica Computacional Vol. XXII, Proc. ENIEF 2003, CD-ROM, Bahía Blanca, (2003)
- [8] G.C. Balbastro, V.E. Sonzogni, G. Franck, “*Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: ajuste de parámetros computacionales*”, Proc. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, CD-ROM, Mendoza, (2004)
- [9] G.C. Balbastro, V.E. Sonzogni, G. Franck, “*Wind action on isolated curved canopy roofs*

- using *GiD-Tdyn*”, 2<sup>nd</sup> Conference on advances and applications of GiD. <http://gid.cimne.upc.es/2004/papers.subst>, Barcelona, (2004)
- [10] G.C. Balbastro, V.E. Sonzogni, G. Franck, M. Storti, “*Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: simulación numérica*”, Mecánica Computacional Vol. XXIII, Proc. ENIEF 2004, CD-ROM, Bariloche, (2004)
- [11] M.B. Natalini et al., op. cit.
- [12] M.B. Natalini, O.F. Canavesio, B. Natalini, M.J. Paluch, “*Pressure distribution on curved canopy roof*”, Proc. 2<sup>nd</sup> Intl. Symp. on Advances in Wind and Structures (AWAS’02), 21-23, Pusan, (2002)
- [13] V.E. Sonzogni, A. Yommi, N.M. Nigro, M. Storti. “*Cfd finite element parallel computations on a beowulf cluster*”. In European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000, (11-14 September 2000).
- [14] PETSc-FEM: A general purpose, parallel, multi-physics FEM program. GNU General Public License (GPL), <http://www.cimec.org.ar/petscfem>.
- [15] The Geronimo Cluster at CIMEC,  
<http://venus.ceride.gov.ar/twiki/bin/view/Cimec/GeronimoCluster>
- [16] S. Balay, W. Gropp, L.C. McInnes, B. Smith. “*Petsc 2.0 users manual. Technical Report UC-405*”, Argonne National Laboratory. Math. and Computer Sc., (1997).
- [17] Message passing interface (MPI). <http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>.
- [18] H. Tennekes, J.L. Lumley, “*A First Course in Turbulence*”. Cambridge, MA: MIT Press, (1994).
- [19] J. Smagorinsky, “*General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment*”. Month. Weath. Rev. 91(3), 99-165, (1963)
- [20] M.B. Natalini et al., op. cit.
- [21] G. Franck, N. Nigro, M. Storti, J. D'Elía, “*Modelización del flujo de viento sobre el modelo de Ahmed*”, Mecánica Computacional Vol. XXII, Proc. ENIEF 2003, CD-ROM, Bahía Blanca, (2003)