

ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE CUBIERTAS ABOVEDADAS AISLADAS: SIMULACIÓN NUMÉRICA

Gustavo C. Balbastro¹, Victorio E. Sonzogni^{1,2}, Gerardo Franck², Mario Storti²

¹ 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

² CIMEC, INTEC, UNL-CONICET
Guemes 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 cubiertas abovedadas aisladas, procurando reproducir los resultados de ensayos sobre modelos llevados a cabo en túnel de viento de capa límite para 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 perfil de velocidades medias del viento natural, mediante el programa de elementos finitos PETSc-FEM y procesamiento en paralelo con una malla no demasiado refinada, como paso inicial en el estudio del problema en 3-D . Los resultados obtenidos presentan en algunos casos un cierto ajuste a los datos experimentales, no obstante se aprecia la necesidad de mejorar la simulación incorporando aspectos tales como un mayor refinamiento de la malla, entre otros, a fin de obtener resultados más próximos a los experimentales.

1 INTRODUCCIÓN

Es frecuente el uso de cubiertas abovedadas aisladas en la República Argentina, tanto en zonas urbanas como rurales, ya sea por requisitos funcionales, por modificaciones a lo largo de la vida útil o bien durante la etapa constructiva de una construcción destinada a ser cerrada total o parcialmente, etapa que a veces se prolonga en el tiempo por cuestiones ajenas al proyecto. El proyectista estructural se vale del auxilio de tablas de coeficientes de presión para evaluar las acciones sobre la estructura, contenidas usualmente en los códigos.



Figura 1: Vista de una construcción típica.

El reglamento vigente¹ en la República Argentina no aporta datos específicos para el cálculo de acciones sobre este tipo de cubiertas, y propone un 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. Las debilidades de esta suposición han sido puestas de manifiesto mediante ensayos en el Túnel de Viento de Capa Límite de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) por Marighetti et al².

Por otra parte, el Proyecto de Reglamento que actualmente se encuentra en proceso de aprobación³ tampoco aporta datos para el cálculo de este tipo de construcciones, y solamente cuenta con valores para edificios con cubiertas curvas cerrados total o parcialmente. Es preciso señalar que el flujo alrededor de este tipo de construcciones también es diferente del correspondiente a la cubierta aislada, según muestran los trabajos sobre este tema realizados por Natalini et al⁴.

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 Ribeiro⁵. En los ensayos tomados como referencia se recurrió a una de

estas técnicas experimentales, provocando 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. Además de estos modelos rugosos se ensayaron modelos de superficie lisa, comparando los resultados obtenidos en uno y otro caso.



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

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^{6,7,8}, en los que se analizó el escurrimiento bidimensional, reproduciendo las condiciones de los ensayos en túnel de viento realizados en la UNNE^{9,10}, mediante un programa comercial GID-Tdyn 7.1. En los trabajos mencionados se emplearon diversas condiciones de contorno y leyes de pared ofrecidas por el programa empleado, encontrándose que tanto la condición simple de velocidades nulas en la superficie del modelo como la aplicación de una ley de pared para superficie rugosa, denominada “roughwall” en el programa, producían aproximaciones razonables a los valores experimentales en el extradós de la cubierta, siendo algo mejor la última mencionada. En el intradós, mientras tanto, los resultados obtenidos presentaron una dispersión inaceptable. Se pretende ahora incursionar en el estudio del problema en 3-D, en una primera etapa con un mallado que no signifique un costo computacional demasiado elevado, reproduciendo el perfil de velocidades medias pero sin incorporar la componente fluctuante, para mejorar el conocimiento del problema antes de encarar simulaciones más detalladas. Estas simulaciones incluirán la realización de una malla más densa, incorporando además a la misma capas estructuradas delgadas de elementos prismáticos sobre la superficie del modelo, 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.¹¹

2 MODELO ANALIZADO

Se analizó un modelo tridimensional, cuya forma y dimensiones se muestran en la figura 3.

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^{12,13}, en el cluster “Gerónimo” del CIMEC. Para el posproceso de los resultados se empleó GiD 7.1 y Matlab 6.

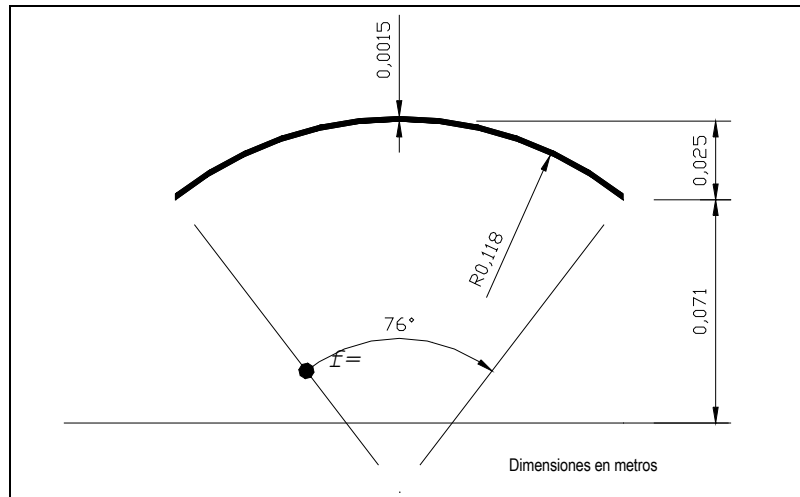


Figura 3: Geometría del modelo.

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 PETSC¹⁴ (Portable Extensible Tool for Scientific Computations) y la librería de paso de mensajes MPI¹⁵ (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 181.364 tetraedros, tal como se muestra en la Figura 4. La malla generada es de 36.000 nodos, de los cuales 4.186 se ubican en el intradós de la cubierta y 3.221 en el extradós de la misma, con mayor refinamiento en la zona a sotavento, donde se espera que se produzca separación de la capa límite. La malla se refinó en proximidad de la superficie de la cubierta y del piso del túnel. Con esta malla se obtiene una dimensión para los elementos en la superficie del cuerpo de $2,08 \times 10^{-3}$ m. Analizando las escalas asociadas al flujo, de acuerdo con Tennekes y Lumley¹⁶, se obtiene que la microescala de Taylor, asociada a los movimientos a escala integral, es $\lambda = (15/A)^{1/2} R_l^{-1/2} l$, mientras que la microescala de Kolmogorov es $\eta = A^{-1/4} R_l^{-3/4} l$, siendo R_l el número de Reynolds a escala integral, l la longitud característica adoptada, ambos definidos en (4), y A una constante de orden 1 que supondremos igual a 0,5. Con estos valores se obtuvo $\lambda \approx 2,8 \times 10^{-3}$ m y $\eta \approx 2,8 \times 10^{-5}$ 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 medido en el túnel de viento, que ya se empleó en trabajos

anteriores⁷ y 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	$u_x = u_y = u_z = 0$

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

para $y > 0$.

Este perfil de velocidades medias del viento reproduce el correspondiente a zonas suburbanas.

Las simulaciones fueron realizadas con un paso de tiempo de 10^{-4} s, con un total de 3050 pasos, que para la velocidad de referencia representa una distancia recorrida por el fluido de 35 veces la cuerda del modelo. Los parámetros físicos del aire, densidad y viscosidad, se tomaron 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. Para la resolución se aplicó un modelo de turbulencia LES.

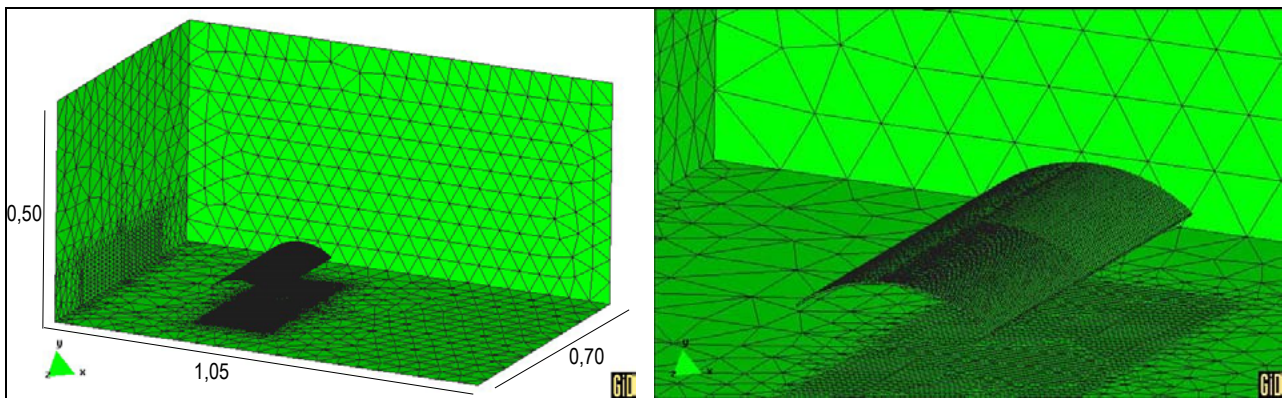


Figura 4: Vistas de la malla, dimensiones en metros, viento de izquierda a derecha

Si bien en los ensayos de referencia se emplearon dos tipos de flujo, uno suave ($I_u \leq 2\%$) y otro turbulento ($I_u \approx 20\%$), 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.

Tabla 2 : Denominación de los modelos de referencia.

MODELO	SUPERFICIE	FLUJO
1-I	Liso	Suave
1-II	Liso	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 (2).

$$c_{pe,i} = \frac{\Delta p}{q_{ref}} \quad (2)$$

En la ecuación (2) se denomina:

Δp = 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:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho u_{ref}^2 \quad (3)$$

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 (4).

$$Re = \frac{u d}{\nu} \quad (4)$$

$u = u_{ref}$

d = el doble del radio de curvatura del modelo

ν = viscosidad cinemática del aire, μ/ρ

El valor alcanzado fue $Re = 2,67 \times 10^5$.

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 14, junto a campos de velocidad en secciones del dominio, para distintos pasos de tiempo.

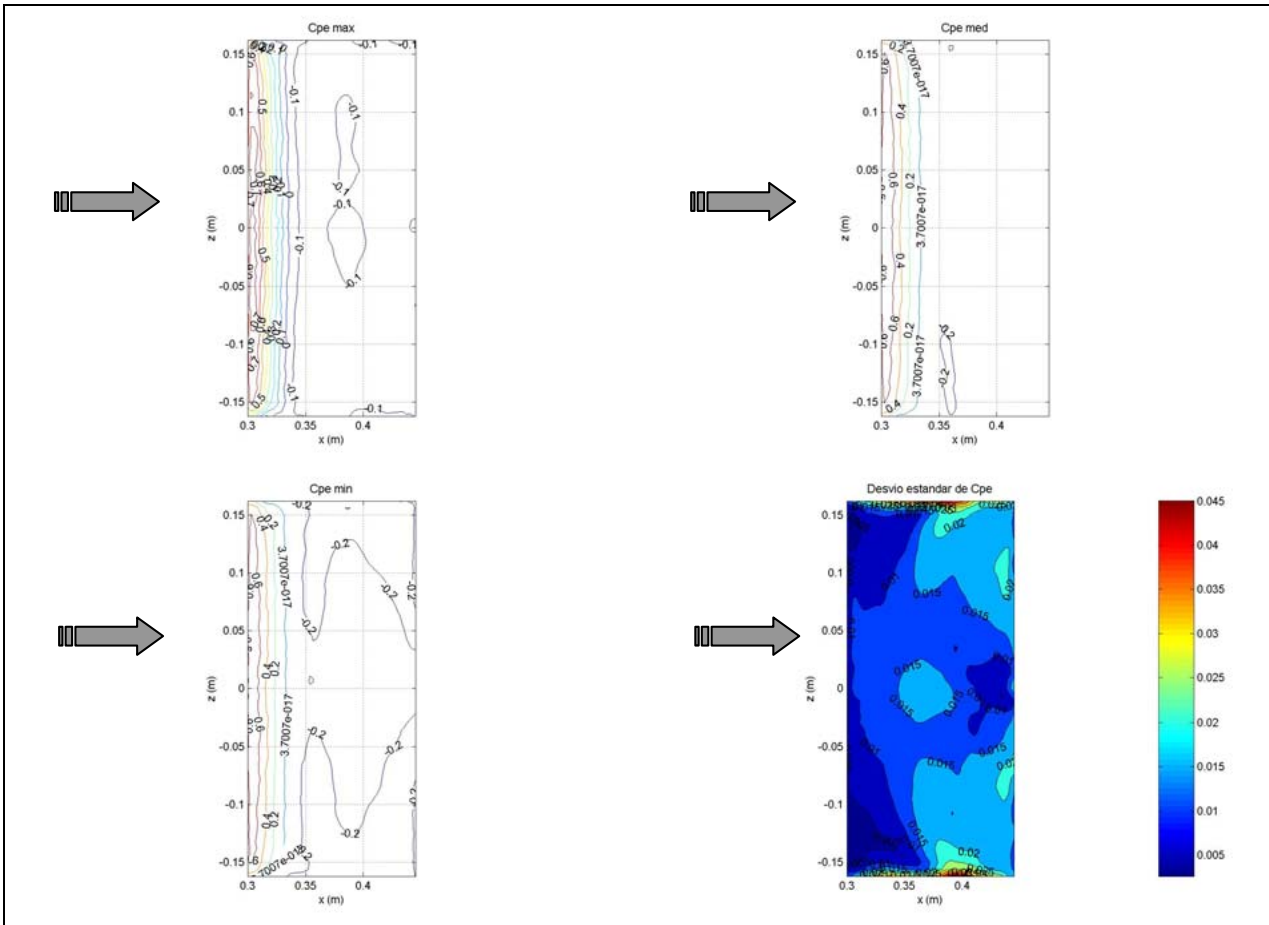


Figura 5: c_{pe} máximo, medio y mínimo. Desvío estándar de c_{pe}

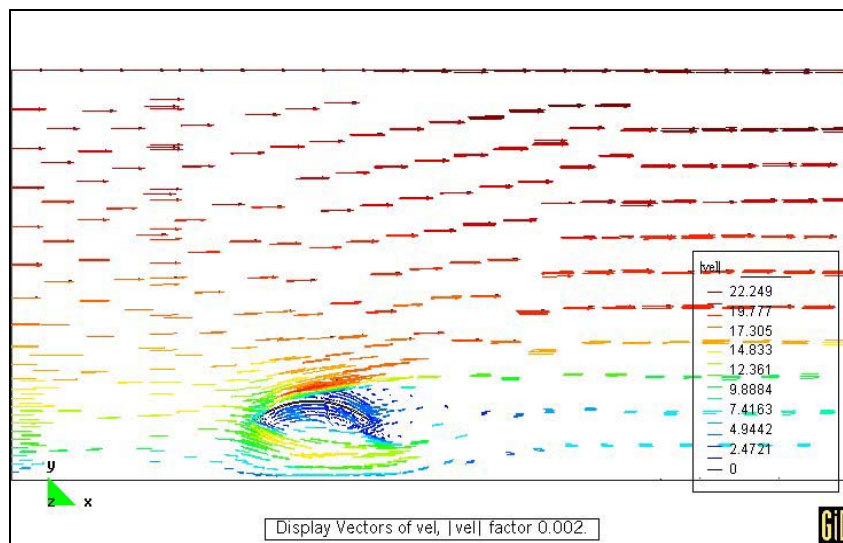


Figura 6: Campo de velocidades en el eje de la cubierta, para $t = 0,19$ s

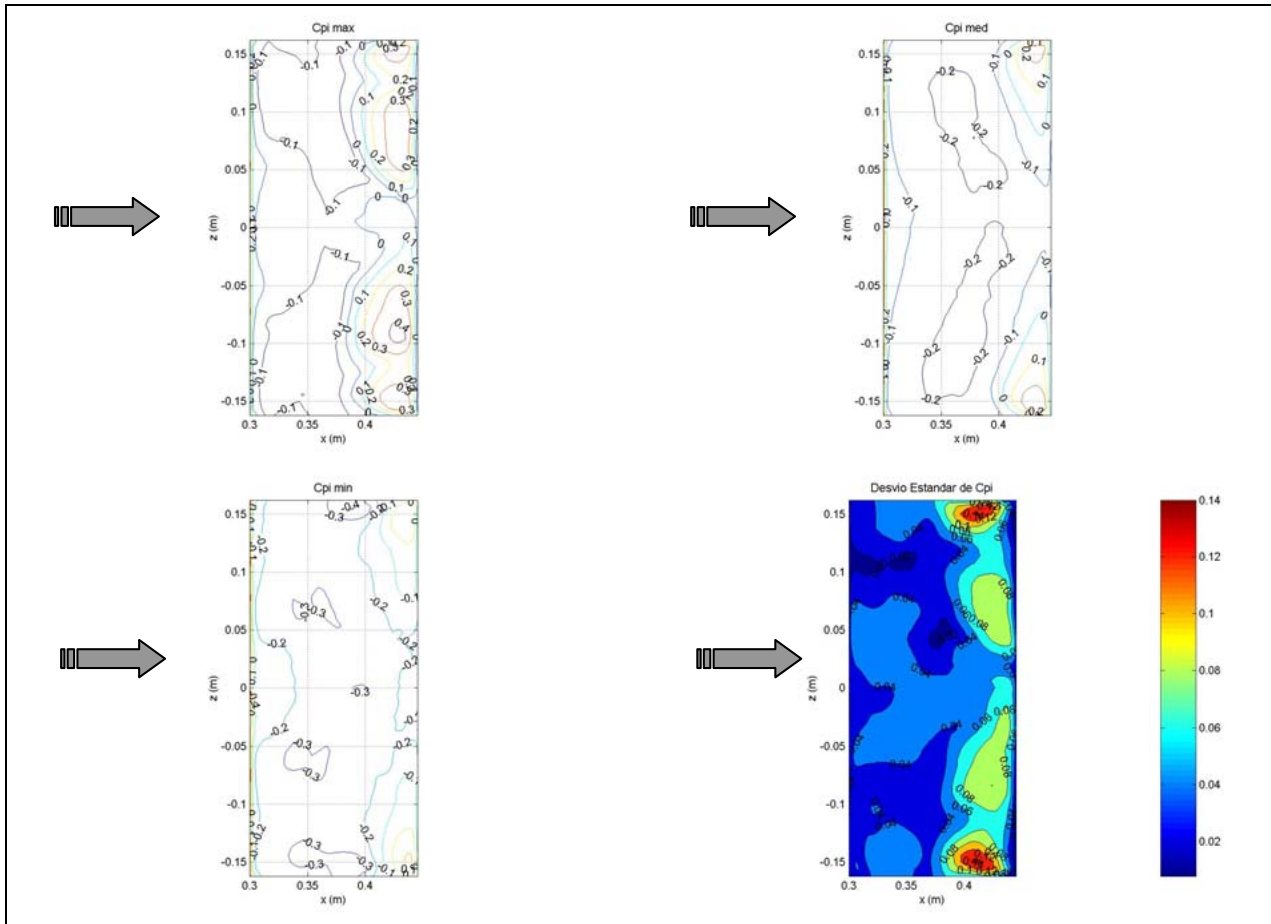


Figura 7: c_{pi} máximo, medio y mínimo. Desvío estándar de c_{pi}

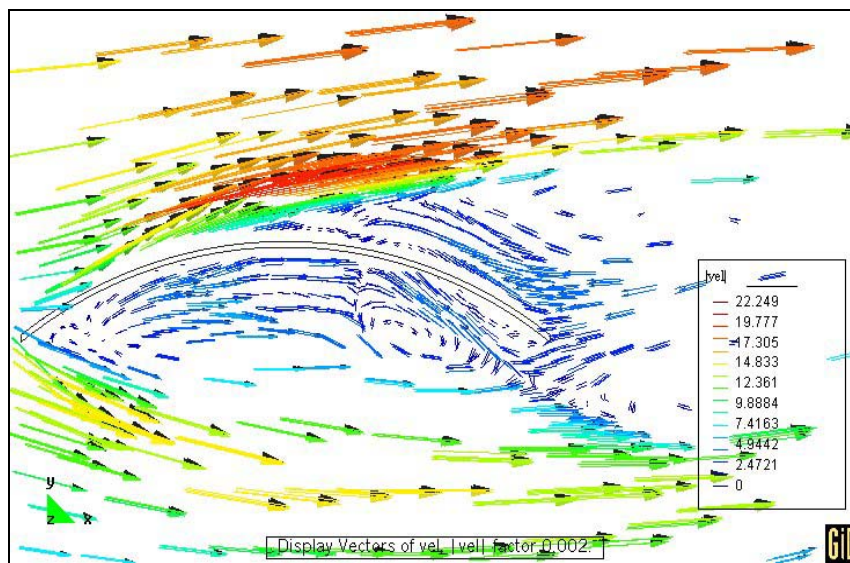


Figura 8: Detalle del campo de velocidades en $t = 0,19$ s

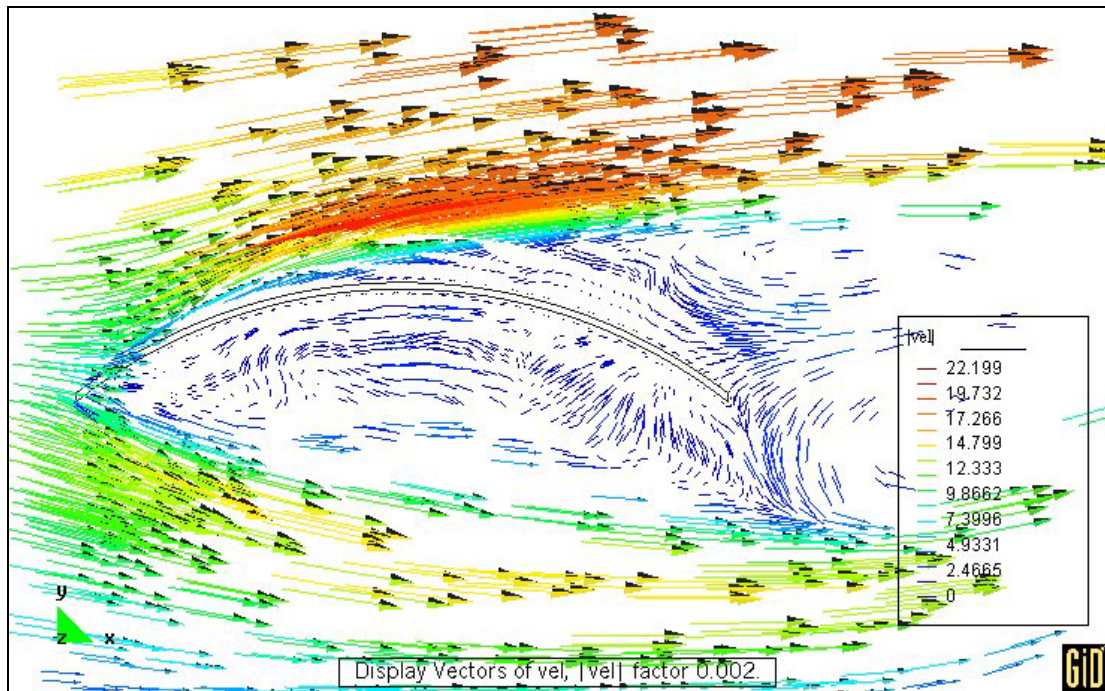


Figura 9: Detalle del campo de velocidades en $t = 0,101$ s

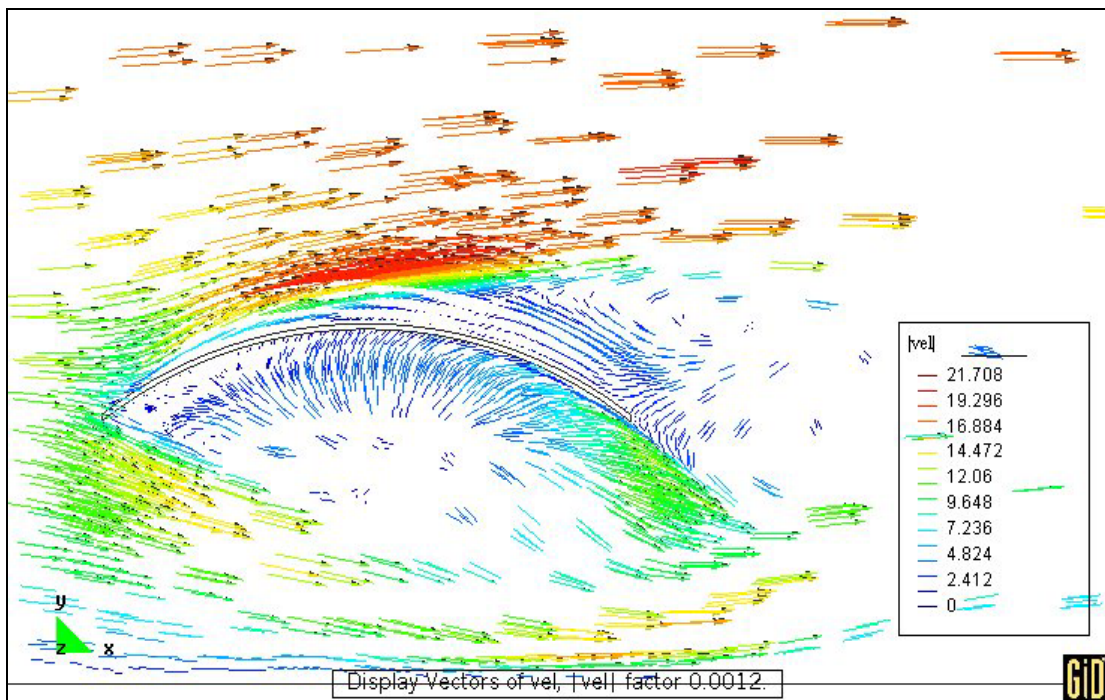


Figura 10: Detalle del campo de velocidades en $t = 0,34$ s

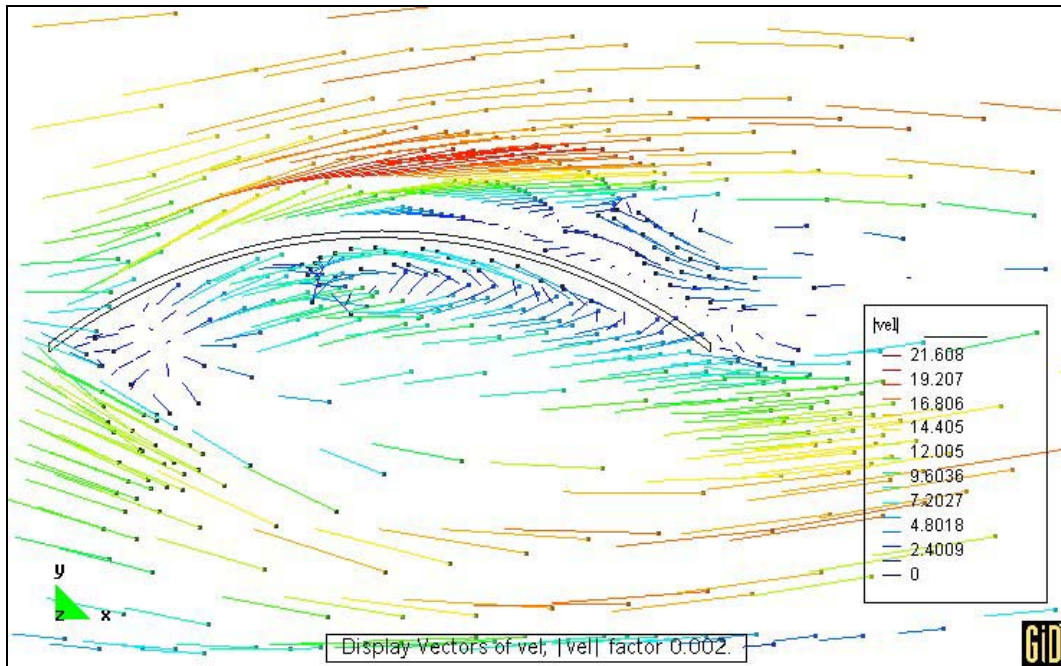


Figura 11: Detalle del campo de velocidades en $t = 0,246$ s

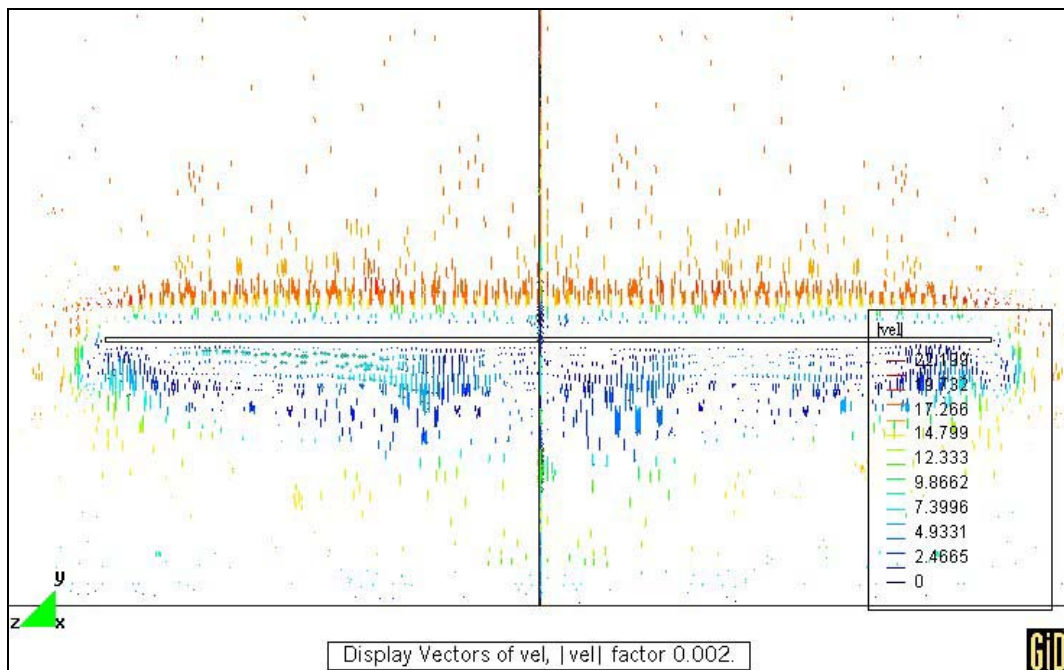


Figura 12: Campo de velocidades en un corte normal al escurrimiento, sobre la cumbrera, para $t = 0,101$ s

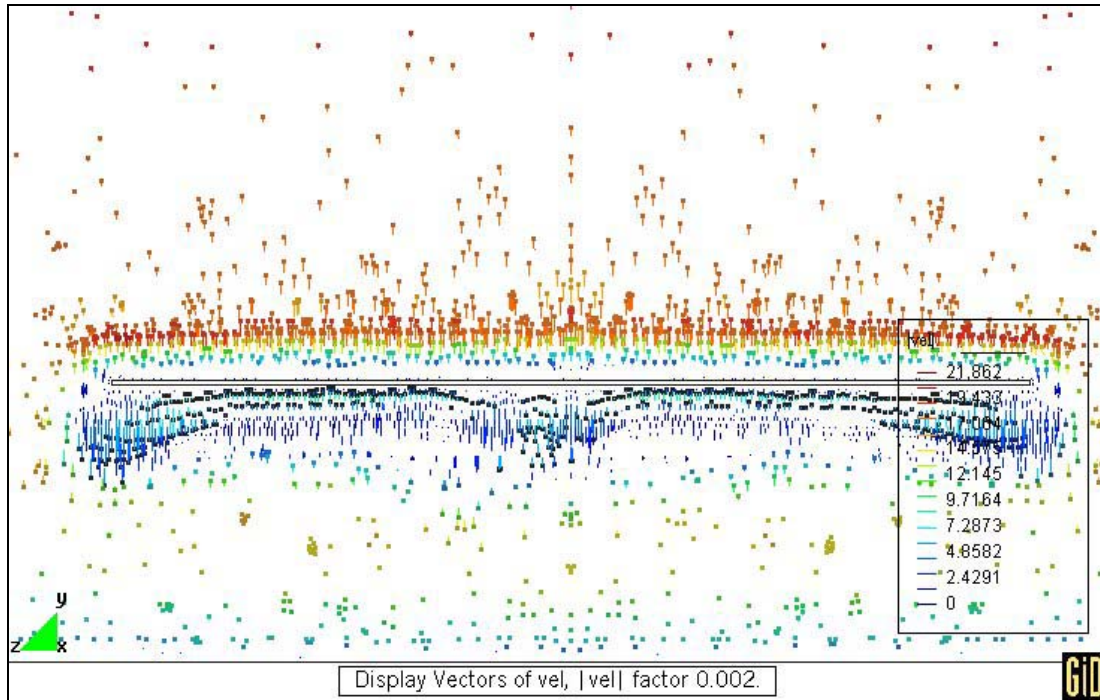


Figura 13: Campo de velocidades en un corte normal al escurrimiento, sobre la cumbrera, para $t = 0,15$ s

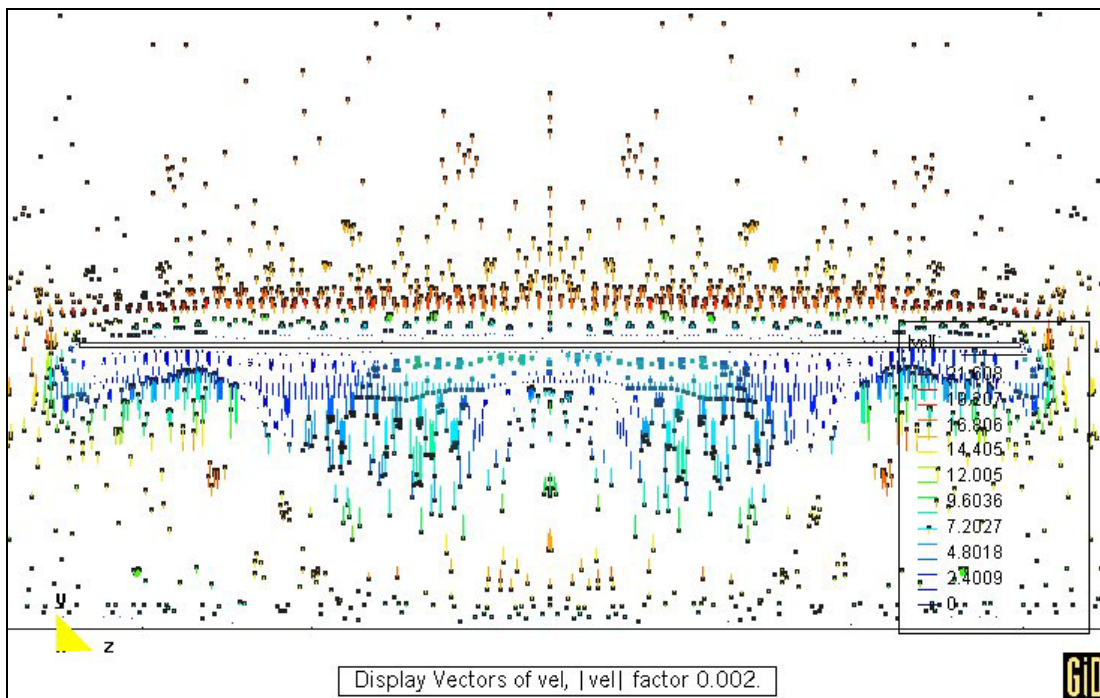


Figura 14: Campo de velocidades en un corte normal al escurrimiento, sobre la cumbrera, para $t = 0,246$ s

4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de la observación de los resultados de la simulación numérica, y comparándolos con los valores de los ensayos de referencia, pueden hacerse algunas apreciaciones. Para posibilitar las mismas se representan los valores experimentales del modelo 2-II, del cual se dispone de los valores de c_{pe} y de c_{pi} reportados para toda la superficie del modelo, y los valores para los otros modelos indicados en la Tabla 2, de los cuales se dispone de los c_{pe} correspondientes al arco central. Se representan también los simulados valores simulados para el arco central. Las flechas indican la dirección del viento.

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 7.000 entre ambas caras, mientras que la duración del registro es mucho 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.

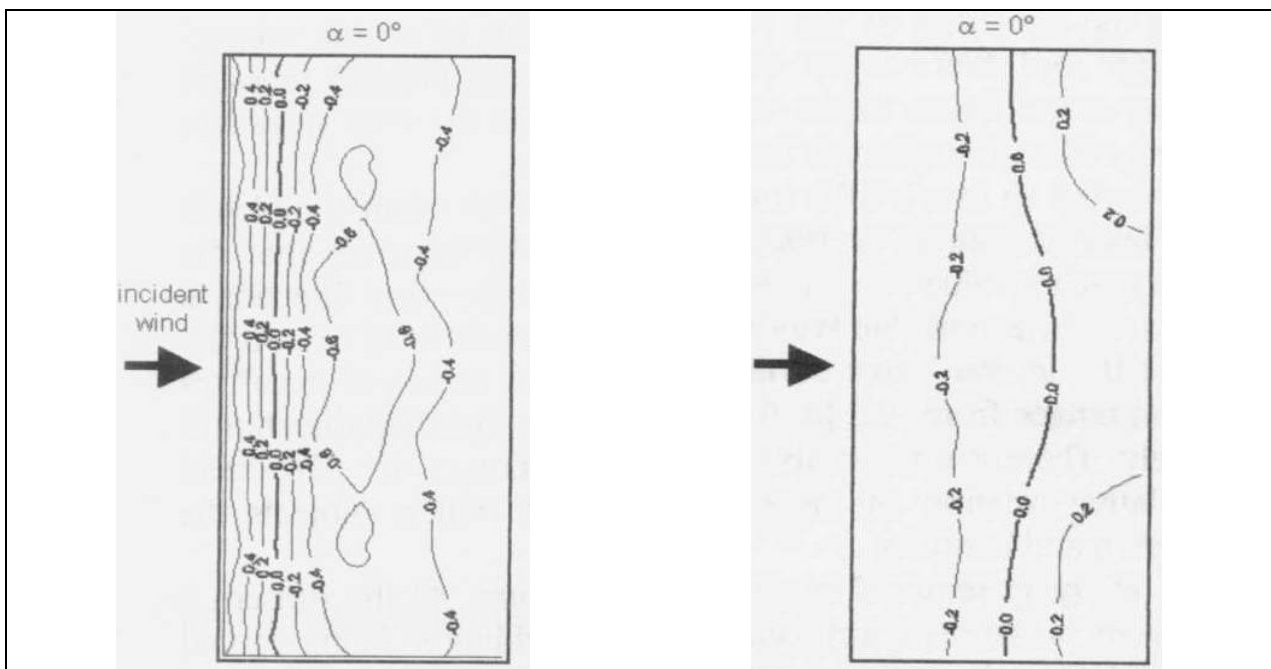


Figura 15: c_{pe} y c_{pe} experimentales¹⁷

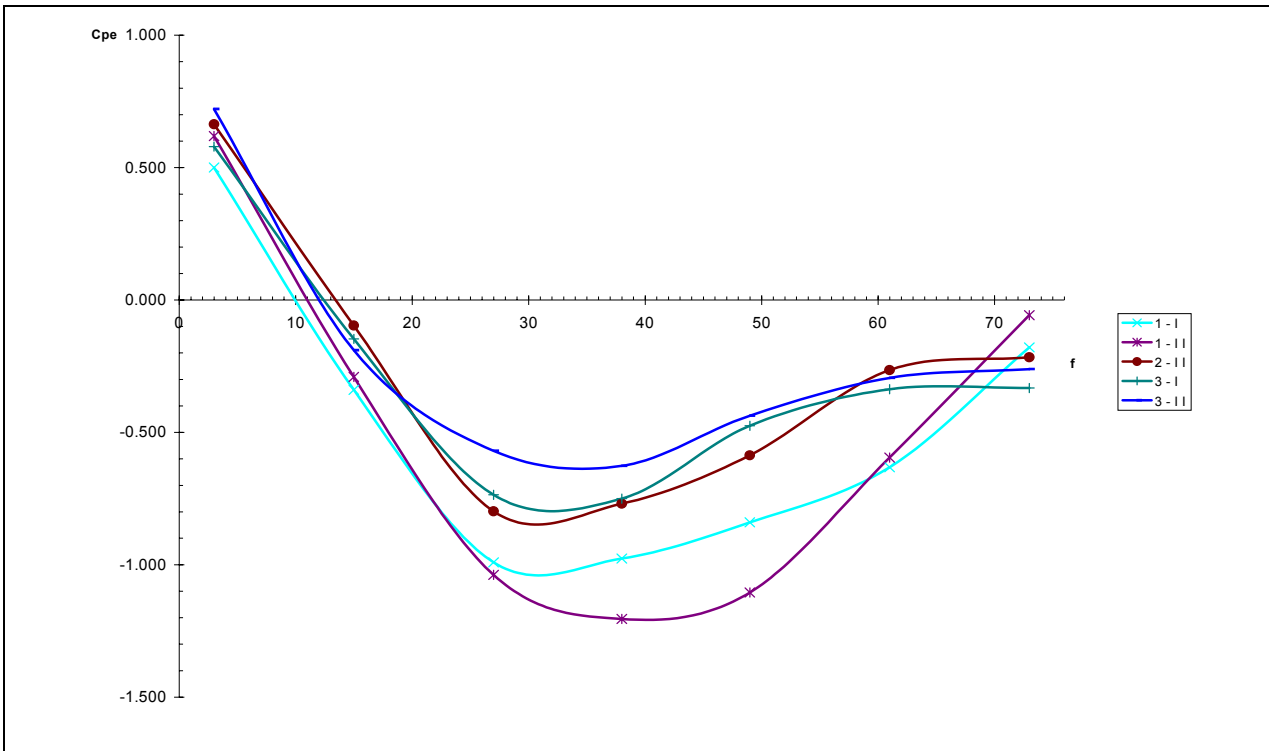


Figura 16: c_{pe} experimentales, para los distintos modelos, en el arco central¹⁸

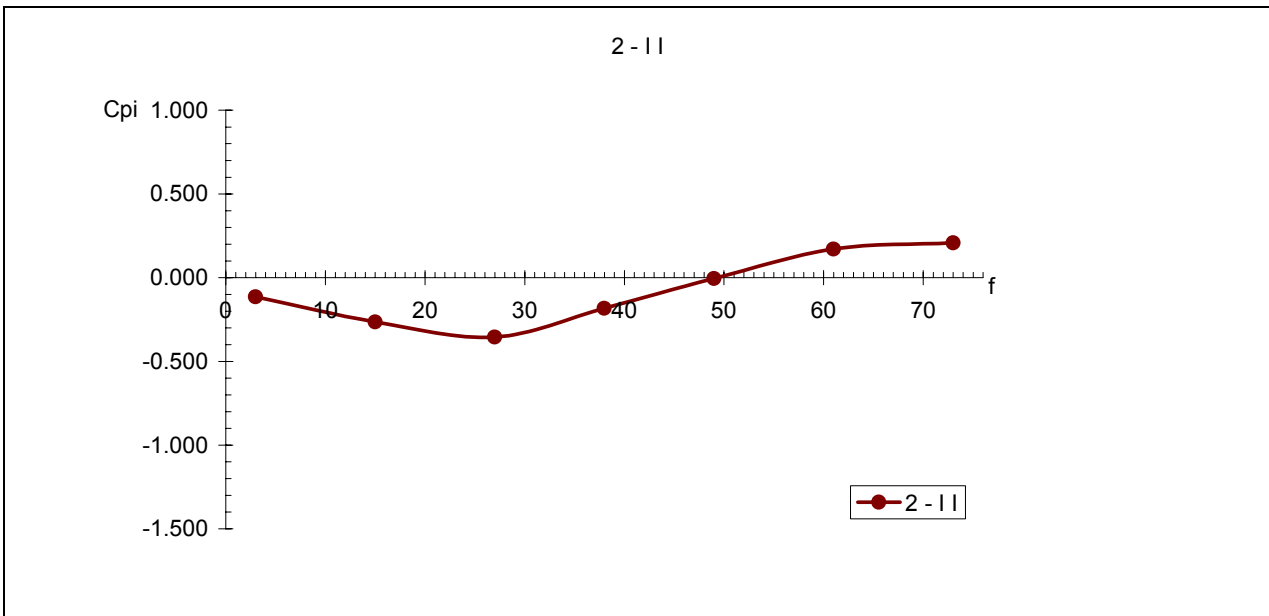


Figura 17: c_{pi} experimentales en el arco central para el modelo 2-II¹⁹

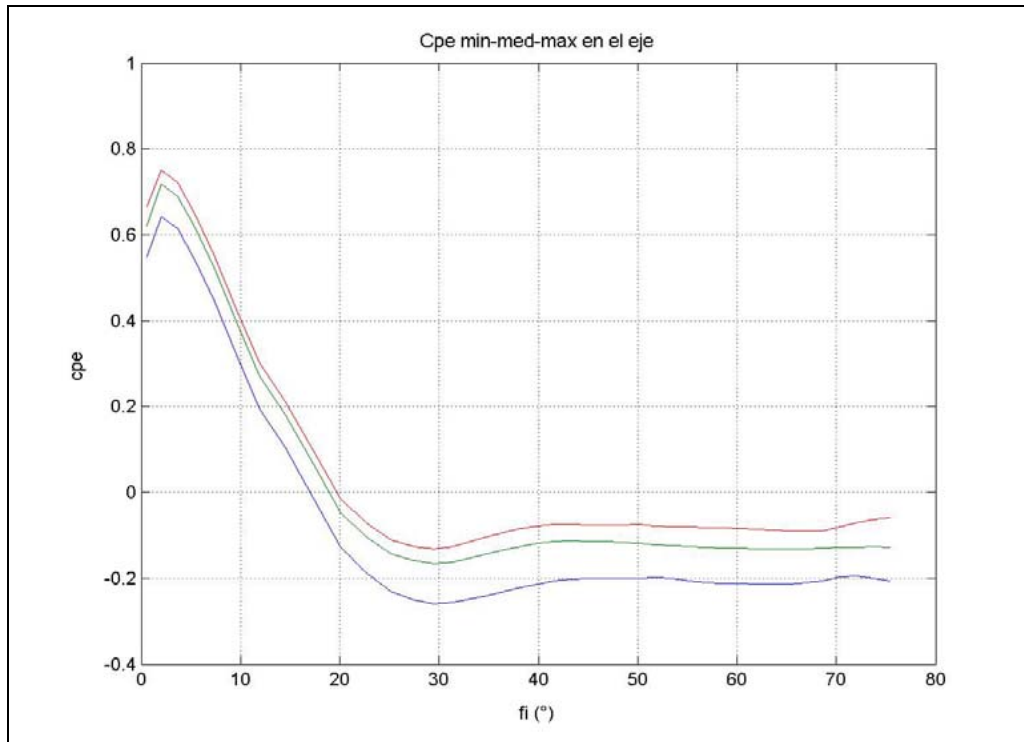


Figura 18: c_{pe} máximos, medios y mínimos en el arco central

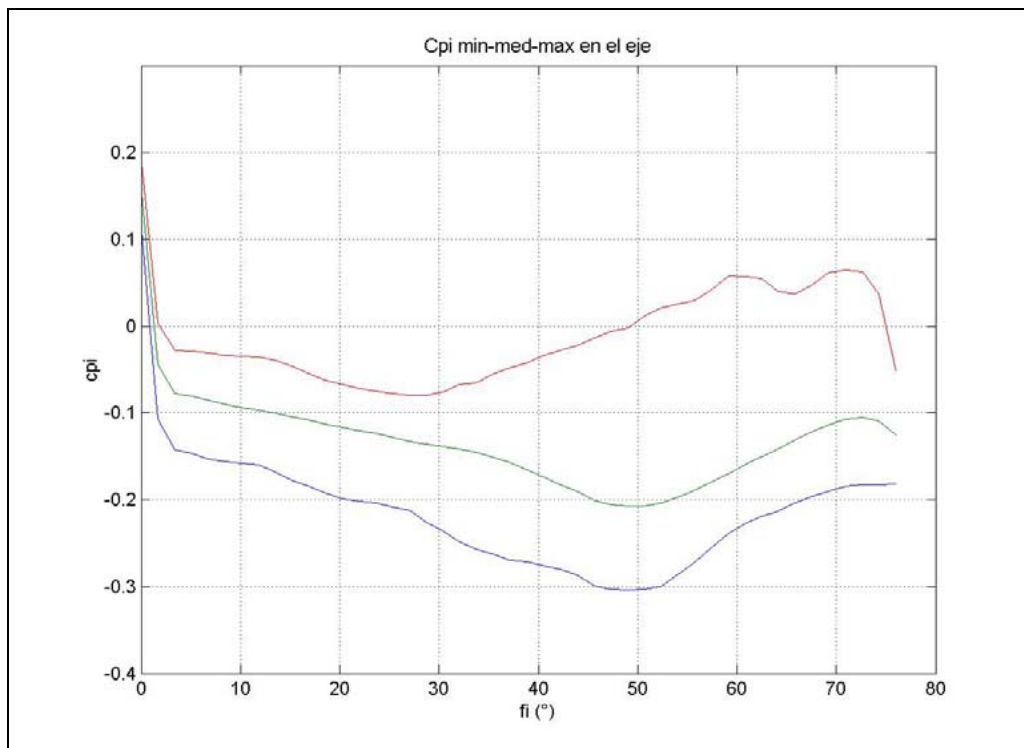


Figura 19: c_{pi} máximos, medios y mínimos en el arco central

Hechas estas aclaraciones, para los c_{pe} a primera vista se ve que en la zona de c_{pe} positivos el ajuste de la simulación a los datos experimentales es bueno, tanto en distribución como en valores, si bien la franja de las mayores presiones es algo más ancha, lo que se aprecia en los valores sobre el arco central, en que el c_{pe} nulo aparece algo más a sotavento. La forma de la línea de valores de c_{pe} nulos sobre la cubierta, vista en planta, es prácticamente coincidente.

En la zona de c_{pe} negativos el ajuste no es bueno. La forma de las isocurvas de c_{pe} tiene algunas diferencias, y los valores de succión alcanzados en la simulación son menores que los experimentales. Estas diferencias podrían deberse a las diferencias en cantidad de puntos de toma, a la duración del registro y a la presencia de la componente fluctuante, que induciría una mayor inestabilidad en este sector, y que en la simulación numérica no se ha incluido, como se dijo.

En cuanto a los c_{pi} , la simulación capta bien los dos lóbulos de alta presión a sotavento, próximos a los bordes laterales, cuya forma y valor se corresponde bastante bien con los datos experimentales. La franja de c_{pi} nulos, que en la referencia experimental es continua en todo el largo de la cubierta, con una cierta concavidad hacia barlovento, en los valores medios de la simulación aparece cortada, rodeando a ambos lóbulos y en un área en el arco central. Para los valores máximos aparece una mejor coincidencia. Analizando los valores sobre el arco central, se ve que la curva correspondientes a los c_{pi} máximos tiene una forma similar a la experimental, si bien escalada en valores menores. No obstante, el punto de ubicación del c_{pi} nulo coincide bien.

La franja de altas succiones sobre la cara inferior a barlovento, que es continua y paralela al borde de ataque en los datos experimentales, en la simulación aparece fuertemente curvada hacia sotavento, llegando inclusive a formarse una pequeña zona de c_{pi} positivos, sobre el borde de ataque y adyacente al arco central. También en estos últimos casos podría pensarse en la influencia de los factores ya mencionados.

Un cuarto factor que podría incidir 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, cuyo diámetro interno es de 1,2 mm, y de los conductos que llevan las medidas al instrumental, lo que no es representado en esta simulación.

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, aunque esta variabilidad es algo mayor en el intradós, a sotavento y cerca de los bordes laterales.

Es necesario realizar estudios complementarios para determinar o corregir las diferencias halladas. Además de la línea de trabajo prevista en cuanto a mayor refinamiento de la malla, colocación de una capa estructurada de elementos prismáticos y empleo de una ley de pared, como se mencionó más arriba, deberá incluirse la componente fluctuante superpuesta al perfil de velocidades medias, para simular con mayor exactitud el viento natural.

Resulta apropiado además realizar simulaciones sobre otros modelos donde los factores mencionados, en particular los referidos a la técnica experimental, no puedan tener tanta incidencia.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Nestor 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] 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)
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. *Proyecto de Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102*. INTI. Buenos Aires, 2001.
- [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] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] G.C. Balbastro, V.E. Sonzogni, G. Franck, “*Wind action on isolated curved canopy roofs using GiD-Tdyn*”, 2nd Conference on advances and applications of GiD. <http://gid.cimne.upc.es/2004/papers.subst>, Barcelona, (2004)
- [9] M.B. Natalini et al., op. cit.
- [10] M.B. Natalini, O.F. Canavesio, B. Natalini, M.J. Paluch, “*Pressure distribution on curved canopy roof*”, Proc. 2nd Intl. Symp. on Advances in Wind and Structures

(AWAS'02), 21-23, Pusan, (2002)

- [11]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)
- [12]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).
- [13]PETSc-FEM: A general purpose, parallel, multi-physics FEM program. GNU General Public License (GPL), <http://www.cimec.org.ar/petscfem>.
- [14]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).
- [15]Message passing interface (MPI). <http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>.
- [16]H. Tennekes, J.L. Lumley, “*A First Course in Turbulence*”. Cambridge, MA: MIT Press, (1994).
- [17]M.B. Natalini et al., op. cit.
- [18]M.B. Natalini et al., op. cit.
- [19]M.B. Natalini et al., op. cit.