

ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE CUBIERTAS ABOVEDADAS AISLADAS: RESULTADOS NUMÉRICOS PRELIMINARES

Gustavo C. Balbastro^{*}, Victorio E. Sonzogni[†]

^{*} 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

[†] 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 clave: Acción del viento, cubiertas abovedadas, coeficientes de presión.

Resumen. *En el presente trabajo, que es el primero dentro de la investigación encarada en el marco de un plan de tesis, se simula la acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas, tipología estructural de gran difusión y para la cual el reglamento de cálculo vigente en la República Argentina aporta escasa información. La simulación, que para este trabajo se realiza con un programa de elementos finitos comercial, tiene por objeto determinar los coeficientes de presión sobre dicho tipo de cubiertas, para permitir una posterior validación de los resultados obtenidos por este método con los que se obtienen mediante ensayos de modelos físicos en túnel de viento de capa límite, que constituye la metodología de estudio habitualmente aceptada para este tipo de problemas estructurales. Se comparan los resultados obtenidos y se extraen conclusiones para el posterior avance de la investigación.*

1 INTRODUCCIÓN

Las cubiertas abovedadas aisladas son una construcción empleada con bastante frecuencia en la República Argentina, tanto en zonas urbanas como rurales, no solo debido a requisitos del destino de la construcción, sino también 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.

En la práctica profesional, 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, normas y reglamentos.

El Reglamento CIRSOC 102¹ actualmente en vigencia 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.

Esta analogía no resulta apropiada, ya que las características del flujo alrededor de una cubierta a dos aguas, que presenta una arista viva en la cumbrera, son sustancialmente diferentes de las del flujo alrededor de una cubierta curva, que depende fuertemente del número de Reynolds, y lo inapropiado de esta suposición ha sido puesto 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 cerrados total o parcialmente con cubiertas curvas. Es preciso señalar que el flujo alrededor de este tipo de construcciones también es diferente del correspondiente a la cubierta aislada, según muestran los primeros 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 que resultan sensibles 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 adoptó la aplicación de rugosidad superficial sobre la cubierta de los modelos.

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 el primer acercamiento al tema, con el fin de identificar los parámetros que produzcan un mejor ajuste de los resultados mediante métodos numéricos con los resultados experimentales.

En el mismo se analiza el flujo bidimensional, procurando reproducir el perfil de velocidades medias relevado en los ensayos en túnel de viento realizados en la UNNE^{6,7}, que se toman como referencia para este trabajo.

Los resultados son comparados con los correspondientes al eje de simetría de los modelos ensayados en túnel de viento.

2 MODELO ANALIZADO

Se analizó un modelo bidimensional, cuya forma y dimensiones se muestran en la figura 1. El análisis de dicho modelo se realizó con el programa GID 7.1 – Tdyn, con el que se construyó la geometría, se generó la malla, se realizó la resolución y posproceso.

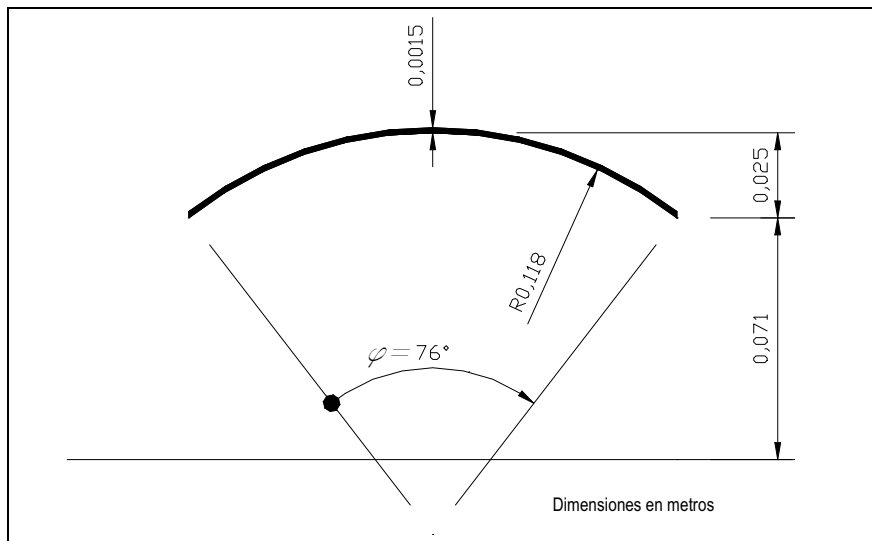


Figura 1: Geometría del modelo.

La malla generada es de 27.600 elementos triangulares, tal como se muestra en la Figura 2 en general, y en la Figura 3 en detalle cerca del borde de ataque de la cubierta. Esta malla se refinó especialmente en la zona próxima a la superficie de la cubierta, dando una dimensión mínima a los elementos de 3×10^{-4} m, y también se realizó un refinamiento, algo menor, en las proximidades del piso del túnel, con el fin de modelar adecuadamente la zona donde el gradiente vertical de velocidades es mayor.

El mismo modelo fue simulado con tres condiciones de contorno diferentes sobre la superficie de la cubierta, con el fin de encontrar la que produce resultados más próximos a los medidos en el túnel de viento. Además, se realizó una simulación del flujo en el túnel vacío, sin el modelo de la cubierta, para obtener valores de referencia para el cálculo de los coeficientes de presión.

Siguiendo la denominación de las opciones del programa, estas condiciones son las siguientes:

(1) Condición V_FixWall: impone condiciones de no deslizamiento y no penetración, haciendo nulas ambas componentes de la velocidad.

(2) Condición Roughwall: se introdujo como parámetro el tamaño k de la rugosidad aplicada a los modelos ensayados en el túnel de viento, siendo $k = 3,9884 \times 10^{-4}$ m.

(3) Condición YplusWall: se introdujo el parámetro adimensional $y^+ = 209$, determinado a partir de los resultados de τ_w y u_t obtenidos del modelo analizado con la condición (2).

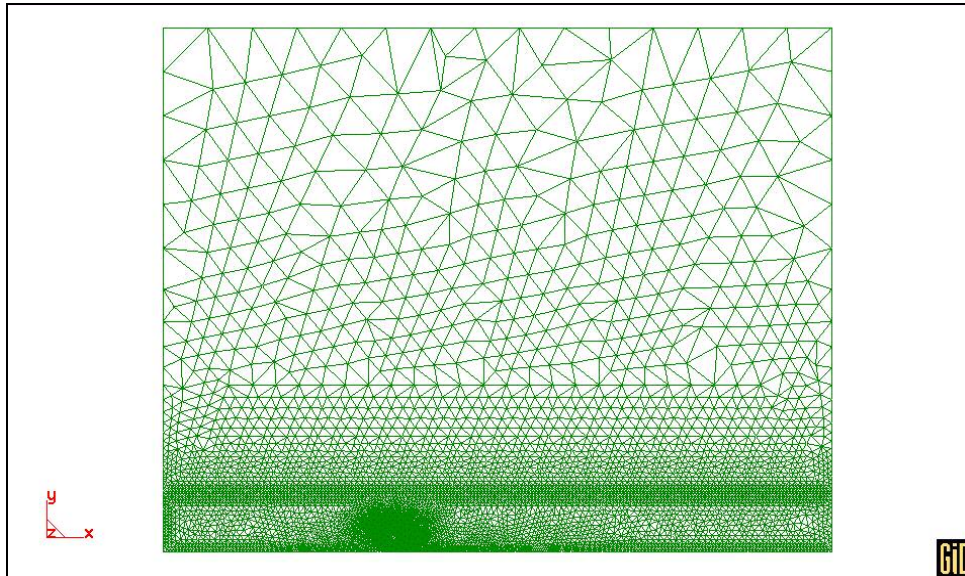


Figura 2: Malla completa

El flujo escurre de izquierda a derecha. A la entrada del dominio, la componente u_x sigue una ley de variación que se obtuvo ajustando las mediciones de velocidad media del túnel de viento. Este perfil de velocidades medias del reproduce el correspondiente a zonas suburbanas.

El perfil de velocidades se aplicó de manera gradual durante los primeros 1.000 pasos de tiempo, y calculando el flujo con el perfil de velocidades plenamente desarrollado durante 9.000 pasos de tiempo más. La velocidad máxima fue de 27,77m/s. Este valor resulta algo mayor que el máximo medido en el túnel, pero esta diferencia es debido a que en la parte superior del túnel comienza a aparecer el efecto de capa límite del techo, lo que el el presente modelo no se tuvo en cuenta. Para la resolución se aplicó un modelo de turbulencia $k-\varepsilon$.

Tabla 1 : 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
T51	Rugosidad Alta	Turbulento

Si bien en los ensayos de referencia se emplearon dos tipos de flujo, uno suave ($l_u \leq 2\%$) y otro turbulento, para el presente trabajo el perfil de velocidades aplicado no incluye

componente fluctuante. 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 es $k/d = 1,69 \times 10^{-3}$, mientras que para el de rugosidad alta es $k/d = 3,30 \times 10^{-3}$.

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 $\mu = 1,795 \times 10^{-5} \text{Kg/m.s}$.

3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos del programa fueron los campos de velocidad y presión. Con los valores de presión sobre el modelo, se calcularon los coeficientes de presión externa c_{pe} , e interna c_{pi} , y los coeficientes de presión total c_t , según las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$c_{pe,i} = \frac{\Delta p}{q_{ref}} \quad (1)$$

$$c_t = c_{pe} - c_{pi} \quad (2)$$

En la ecuación (1) se denomina:

Δp a la diferencia entre la presión sobre la cubierta, en un punto determinado, y la presión estática de referencia, tomada esta última como la presión estática en las coordenadas correspondientes a la cúspide de la bóveda, del túnel vacío.

q_{ref} es la presión dinámica de referencia, tomada como la presión dinámica en el punto antes mencionado.

Estas consideraciones se tomaron para poder reproducir, en el modelo bidimensional, 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.

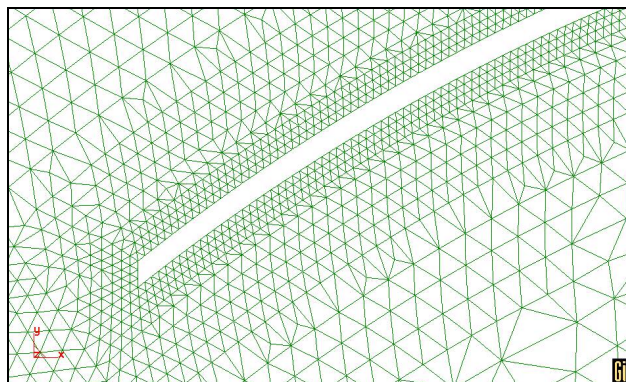


Figura 3: Detalle de los elementos próximos al borde de ataque

El número de Reynolds se definió según la expresión (3):

$$\text{Re} = \frac{u d}{\nu} \quad (3)$$

Donde:

u : velocidad media en la cúspide del modelo

d : el doble del radio de curvatura del modelo

ν : viscosidad cinemática del aire, μ/ρ

El valor alcanzado fue $\text{Re} = 2,095 \times 10^5$. En las figuras siguientes se presentan los resultados, comparados con los valores de referencia para cada uno de los modelos de referencia.

En las figuras siguientes se presentan los valores de c_{pe} , c_{pi} y c_t calculados a partir de los resultados del programa, comparados con los de los modelos de referencia.

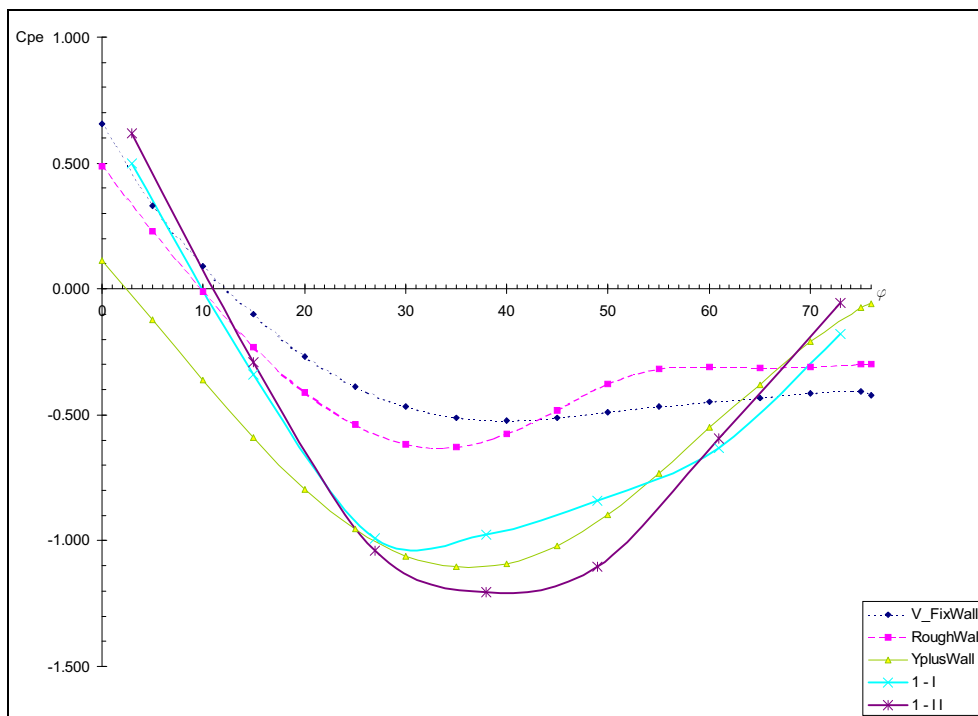


Figura 4: c_{pe} calculados vs. modelo 1-I y 1-II

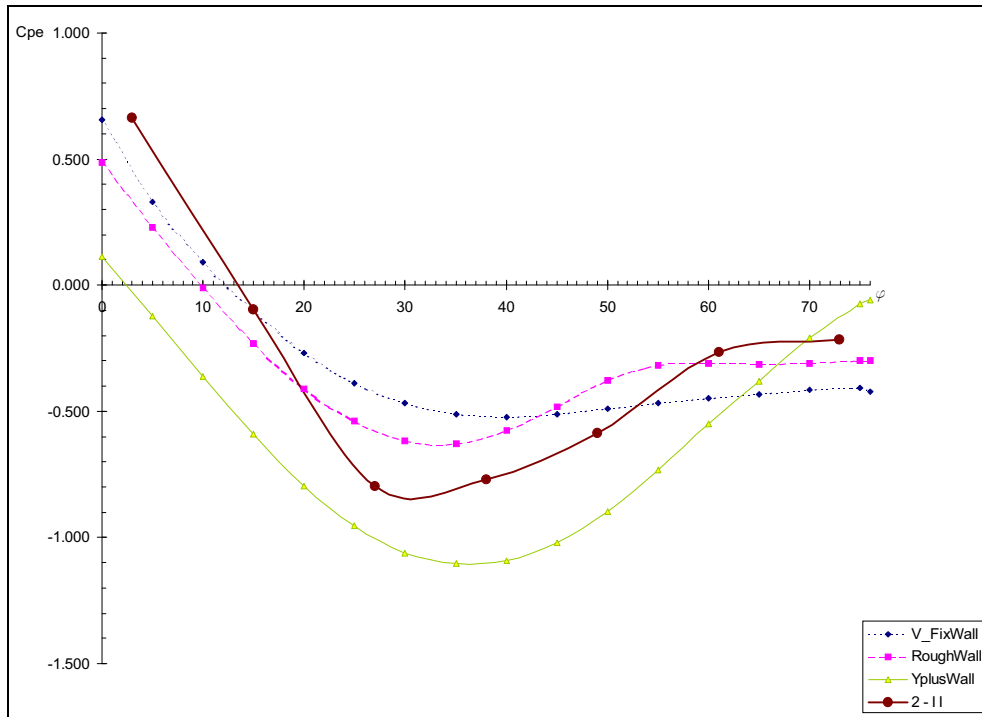


Figura 5: c_{pe} calculados vs. modelo 2-II

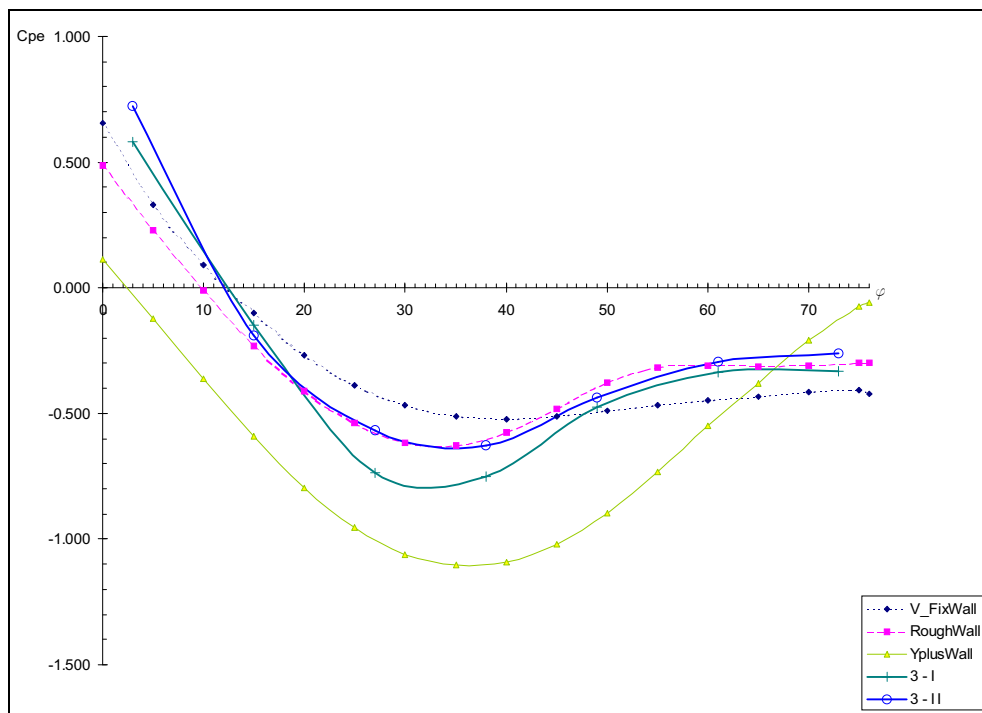


Figura 6: c_{pe} calculados vs. modelo 3-I y 3-II

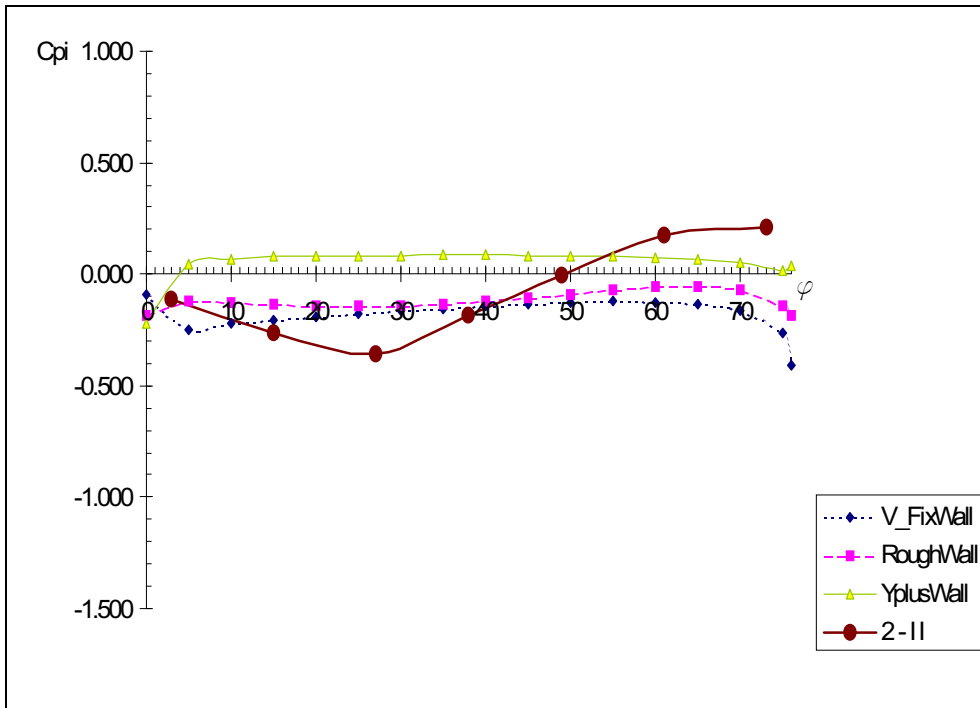


Figura 7: c_{pi} calculados vs. modelo 2-II

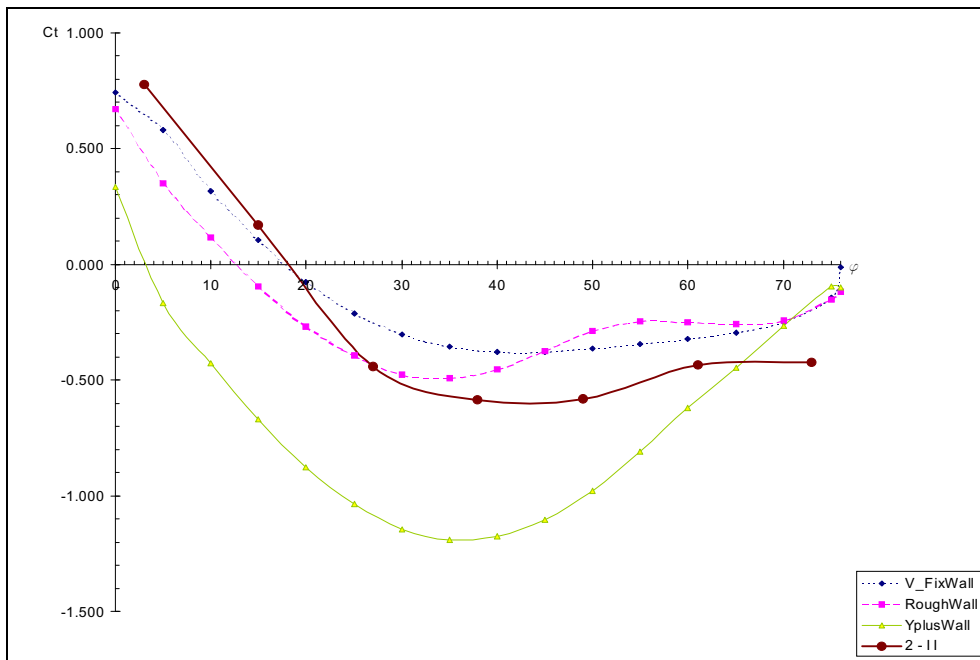


Figura 8: c_t calculados vs. modelo 2-II

4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En lo referente a los coeficientes de presión exterior c_{pe} , ninguna de las simulaciones propuestas se ajusta de manera completa con alguno de los modelos de referencia. De todas maneras, se observa una buena aproximación de los valores de c_{pe} entre el modelo 3-II y la simulación (2), especialmente en la zona de los coeficientes negativos (succión), para los que dan valores prácticamente idénticos. Esta buena aproximación se pierde en la zona a barlovento, donde los valores positivos calculados son inferiores a los medidos en un 30%.

Para el caso del modelo 2-II, los valores negativos de c_{pe} se encuentran en una zona intermedia entre las tres simulaciones, mientras que el máximo valor positivo coincide prácticamente con la simulación (1).

En cuanto al modelo 1-I y 1-II, los valores negativos se encuentran próximos a los de la simulación (3), mientras que los positivos nuevamente encuentran una mejor coincidencia con la simulación (1).

En todos los casos, al simulación (1) fue la que mejor aproximó el punto donde se produce el cambio de signo del coeficiente de presión exterior.

El coeficiente de presión interior c_{pi} , en cambio, presenta grandes diferencias, ya que ni siquiera las formas de los diagramas son aproximadas al del modelo 2-II, lo que indica una pobre coincidencia con el campo de velocidades bajo la cubierta.

Este mal comportamiento del c_{pi} se refleja en los diagramas de presiones totales c_t , que presentan mayores desvíos que los de presiones exteriores.

De acuerdo con la generación de las simulaciones, cabría esperar *a priori* un mejor ajuste entre la simulación (1) y el modelo 1-I, o entre la simulación (2) y el modelo 3-I, en función de las combinaciones de rugosidad y turbulencia. Además, podrían esperarse mayores diferencias en la zona de succión, por la dificultad en detectar la separación de la capa límite y la sensibilidad de este fenómeno al Re .

No resulta posible en esta etapa inicial del estudio explicar completamente las diferencias, halladas. De todas maneras, en general puede decirse que se requiere mayor estudio sobre los distintos parámetros a introducir en la simulación, antes de pasar a las siguientes etapas de estudio, en las que se introducirá la componente fluctuante en el perfil de velocidades de entrada y se pasará a 3-D.

5 CONCLUSIONES

Se simularon mediante un programa comercial ensayos sobre modelos en túnel de viento. Los resultados hallados muestran algunas coincidencias y también diferencias que en algunos casos son importantes, particularmente en la zona inferior de la cubierta. Se requieren más estudios tendientes a identificar el origen de las diferencias y corregirlas, antes de introducir la componente fluctuante de la velocidad en el perfil de entrada y modelar el problema en 3-D.

6 AGRADECIMIENTOS

Gustavo Balbastro es becario doctoral de la UTN y realiza su trabajo en el Grupo de Investigaciones en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI). Para los resultados numéricos

se ha utilizado además equipamiento informático y software del CIMEC y del Aula FICH-CIMNE, de la Facultad de Ingeniería Ciencias Hídricas de la UNL.

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] M.B. Natalini et al., op. cit.
- [7] 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)