



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA OBTENER COEFICIENTES DE PRESIÓN EN  
CUBIERTAS DE ARCO CIRCULAR AISLADAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO, 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- *Página intencionalmente en blanco* -

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto

Secretario: Dr. Gómez Martínez Roberto

1 er. Vocal: Dr. Pozos Estrada Adrián

2 do. Vocal: Dr. Díaz López Orlando Javier

3 er. Vocal: Dr. Guerrero Bobadilla Héctor

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA

-----

**FIRMA**

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Dedicatoria

---

A todas las personas que me han inspirado a lo largo de mi vida, ya sea a través de sus logros, su dedicación o su pasión por el conocimiento. Sus ejemplos me han motivado a esforzarme más en cada paso de mi trayectoria académica.

A mis padres y seres queridos, cuyo amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido mi fuerza en los momentos de dificultad y mi fuente de alegría en los triunfos. Les dedico este trabajo con profundo amor y gratitud.

A mis amigos, quienes han sido mi apoyo emocional y mi fuente de alegría durante todo este proceso. Sus palabras de aliento, sus consejos y su compañía han sido invaluable.

A mi esposa por recorrer este y todos los caminos a mi lado.

*- Página intencionalmente en blanco -*

# Agradecimientos

---

Expreso mi gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México por su colaboración y por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por su apoyo financiero que ha sido fundamental para el éxito de este proyecto y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el uso de sus instalaciones.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. Adrián Pozos Estrada, por su orientación experta, su apoyo constante y su dedicación a lo largo de este proceso de investigación. Su conocimiento, paciencia y mentoría han sido invaluable para la culminación de esta tesis.

Me gustaría hacer una mención especial de agradecimiento al Dr. Roberto Gómez Martínez, por su contribución significativa en la parte experimental de esta investigación. De la misma manera agradezco al Dr. José Alberto Escobar Sánchez, al Dr. Héctor Guerrero Babadilla y al Dr. Orlando Javier Díaz López, que durante el recorrido de este proyecto me brindaron comentarios valiosos; asesorándome con paciencia y corrigiendo mis errores. Sus experiencias y perspectivas han enriquecido este trabajo.

Quiero agradecer a los integrantes del Grupo de Ingeniería de Viento del Instituto de Ingeniería de la UNAM que generosamente compartieron su tiempo y conocimientos para contribuir a este estudio; en especial al Dr. Raúl Sánchez García por su certera recomendación en la caracterización en la categoría de terreno y al M.I. Rigoberto Nava González por el apoyo para realizar las pruebas experimentales.

Agradezco en este trabajo a mis compañeros de estudio, quienes han compartido conmigo largas horas de estudio, intercambio de ideas y experiencias enriquecedoras.



*- Página intencionalmente en blanco -*

## Resumen

---

Se presenta el estudio de los efectos del viento en naves industriales de cubierta de arco circular con área libre abajo soportada por columnas, mediante la construcción de dos modelos rígidos para ser ensayados en el túnel de viento de capa límite atmosférica del Instituto de ingeniería de la UNAM.

En la caracterización del entorno se simuló una categoría de terreno de la ciudad de México para llevar a cabo los ensayos en túnel de viento, donde se replicaron las condiciones de rugosidad, velocidad media del viento y turbulencia un entorno urbano.

Las pruebas experimentales de estos modelos tienen el fin de realizar una propuesta de coeficientes de presión neta que se empleen en el diseño de esta tipología de cubiertas tanto para la estructura principal y secundaria como para sus elementos de recubrimientos de cubierta y anclajes.

*- Página intencionalmente en blanco -*

## **Abstract**

---

The study of wind effects in industrial buildings with circular arched roofs with free area below supported by columns is presented, through the construction of two rigid models to be tested in the atmospheric boundary layer wind tunnel of the Engineering Institute of the UNAM (National Autonomous University of Mexico).

In the characterization of the environment, a terrain category of Mexico City was simulated to carry out the wind tunnel tests, where the conditions of roughness, average wind speed and turbulence of an urban environment were replicated.

The experimental tests of these models are intended to make a proposal of net pressure coefficients to be used in the design of this type of roofs for the main and secondary structure as well as for the roof covering elements and anchorages.

*- Página intencionalmente en blanco -*

# Contenido

---

Resumen	ix
Abstract	xi
Contenido	v
Capítulo 1.	Introducción ..... 1
1.1	Justificación..... 1
1.2	Objetivos ..... 2
1.2.1	Objetivo general ..... 2
1.2.2	Objetivos particulares..... 2
1.3	Alcances ..... 2
1.4	Organización general de la tesis..... 3
Capítulo 2.	Cubiertas curvas soportadas por columnas ..... 5
2.1	Antecedentes ..... 5
2.2	Estructuras con cubiertas de arco circular aisladas ..... 7
2.3	Fallas observadas en cubiertas circulares aisladas debidas al viento ..... 10
Capítulo 3.	Metodología experimental de estructuras en túnel de viento..... 17
3.1	Pruebas de túnel de viento..... 17
3.2	Tipos de pruebas en túnel de viento..... 18
3.3	Túnel de viento de capa límite atmosférica LemAT-UNAM ..... 22
3.4	Modelos rígidos en pruebas en túnel de viento ..... 25
3.5	Parámetros de similitud..... 26
3.5.1	Escala geométrica..... 26
3.5.2	Escala de velocidades..... 27
3.5.3	Escala de tiempo ..... 28
3.5.4	Escala de frecuencia..... 28
3.6	Parámetros de muestreo de prueba..... 28
3.6.1	Velocidad de muestreo ..... 28
3.6.2	Tiempo de muestreo ..... 29
3.6.3	Frecuencia de muestreo..... 29
3.7	Ángulos de análisis ..... 29
3.8	Caracterización de la categoría de terreno ..... 30
3.9	Simulación de la capa límite de altura parcial ..... 31
Capítulo 4.	Diseño de pruebas experimentales en túnel de viento en cubiertas circulares aisladas..... 33
4.1	Lugar de evaluación ..... 33

4.2	Parámetros de similitud.....	33
4.2.1	Escala geométrica.....	33
4.2.2	Escala de velocidades.....	34
4.2.3	Escala de tiempo .....	34
4.3	Parámetros de muestreo de la prueba experimental.....	34
4.4	Rugosidad de la superficie .....	34
4.5	Caracterización de la categoría del terreno .....	37
Capítulo 5.	Construcción del modelo experimental.....	43
5.1	Características generales de los modelos a escala.....	43
5.2	Fabricación de los modelos .....	44
5.3	Habilitado de tomas de presión .....	46
5.4	Instrumentación del modelo experimental .....	52
Capítulo 6.	Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva .....	55
6.1	Análisis de los resultados obtenidos .....	58
6.1.1	Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ ).....	59
6.1.2	Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ ).....	64
6.2	Comparativa de Modelo 1 y Modelo 2 .....	71
6.3	Comparativa con investigaciones experimentales .....	82
6.4	Comparativa con investigaciones similares y en CFD.....	87
Capítulo 7.	Propuesta de coeficientes de presión para diseño de cubiertas curvas aisladas con área libre debajo.....	93
Capítulo 8.	Conclusiones y recomendaciones .....	99
8.1	Conclusiones .....	99
8.2	Recomendaciones.....	100
8.3	Trabajos futuros .....	101
Referencias	103	
Anexo A.	Gráficas de contorno del Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ ) .....	111
Anexo B.	Gráficas de contorno del Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ ) .....	133

# Capítulo 1. Introducción

---

Las cubiertas curvas soportadas por columnas son frecuentemente empleadas en la Ciudad de México para cubrir espacios deportivos en escuelas, mercados o centros de reunión. Este tipo de cubierta se diferencia de aquellas empleadas en naves industriales debido principalmente a que el viento puede fluir libremente por debajo de ésta. A pesar de que se trata de una estructura relativamente sencilla, las actuales Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento de la Ciudad de México (NTC-Viento, 2023) no incluyen algún procedimiento para el cálculo de presiones de diseño sobre este tipo de cubierta.

Lo anterior evidencia la necesidad de evaluar las presiones mediante pruebas experimentales en túnel de viento, con la finalidad de conocer con detalle la distribución de presiones sobre la cubierta, considerando condiciones de turbulencia adecuadamente simuladas, y proponer coeficientes de presión neta para su propuesta normativa. La necesidad del estudio toma mayor relevancia cuando la evidencia (Murià Vila et al., 2015) ha mostrado que a lo largo de eventos eólicos acontecidos se han observado fallas de cubiertas; de manera particular, se han observado fallas en los mecanismos de sujeción de la cubierta que a su vez provoca fatiga en la lámina, otra falla que se ha observado es el pandeo local de los elementos secundarios de apoyo de la cubierta o hasta colapso total de la estructura.

## 1.1 Justificación

El presente trabajo es necesario para obtener una propuesta de coeficientes de presión para diseño de cubiertas de arco circular soportadas por columnas, debido a que es una tipología frecuentemente empleada en escuelas de la Ciudad de México para cubrir las áreas deportivas; también se emplean en estacionamientos, áreas industriales, refugios emergentes, agricultura y ganadería. Aunado a lo anterior, el procedimiento de cálculo de la presión neta inducida por el viento sobre este tipo de estructura no se incluye en las actuales normas (NTC-Viento, 2023) ni en el Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-V, 2020), documento ampliamente empleado para el diseño de estructuras sometidas a la acción del viento.

La propuesta de nuevos coeficientes de presión neta para este tipo de estructura, obtenidos a partir de estudios experimentales, sin lugar a duda coadyuvará a mejorar el desempeño de este tipo de estructura e incrementará su seguridad estructural, con la finalidad de que ésta brinde el servicio para el que fue concebida con un alto nivel de confiabilidad estructural.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar los efectos del viento, en términos de coeficientes de presión, en cubiertas curvas soportadas por columnas con base en pruebas experimentales de túnel de viento.

### **1.2.2 Objetivos particulares**

- Realizar una revisión exhaustiva de la literatura, que incluirá códigos, normas internacionales y artículos técnicos para identificar y comparar las metodologías actuales, si existieran, para considerar los efectos del viento de las naves industriales de cubierta de arco circular.
- Diseñar y construir dos modelos a escala de cubiertas de arco circular con área libre abajo.
- Realizar pruebas experimentales en el túnel de viento de las cubiertas de arco circular con área libre abajo y comparar los resultados entre las dos cubiertas.
- Proponer coeficientes de presión para el diseño de cubiertas de arco circular aisladas con área libre abajo con caracterización similar al del estudio.

## **1.3 Alcances**

Para esta investigación, las pruebas están limitadas al estudio de naves industriales de cubiertas de arco circular aisladas libre debajo, tipología típica en México, con el fin de obtener coeficientes de presión que en un futuro puedan servir de recomendaciones para el diseño de obras civiles de nuestro país.

Se estudiarán las direcciones de incidencia del viento: Desde el viento perpendicular a las generatrices de la nave industrial ( $0^\circ$ ), con un diferencial de  $10^\circ$  entre cada dirección de

análisis, contemplando de igual manera los ángulos de  $45^\circ$  y  $135^\circ$  hasta concluir con la dirección inversa del viento inicial ( $180^\circ$ ). Debido a la simetría tanto del arreglo de las tomas de presión en la cubierta como de los modelos, realizando un total de 21 ángulos sobre los cuales se realizaron las lecturas.

La construcción del modelo rígido se fabricó con resina ABS (Acrylonitril-butadien-styreen) que garantiza que no se presentarán deformaciones al momento de la prueba, limitando a 118 el número de tomas de presión, debido a la cantidad máxima de mangueras que pueden pasar dentro de las columnas del modelo, con el propósito de tener un arreglo de mangueras por el interior del modelo para no afectar los resultados de las presiones obtenidas.

#### **1.4 Organización general de la tesis**

El Capítulo 2 presenta aspectos generales del empleo de cubiertas curvas soportadas por columnas, incluyendo algunos casos documentados de fallas estructurales. El Capítulo 3 presenta la metodología de análisis y diseño de estructuras con cubiertas curvas aisladas en pruebas de túnel de viento. El diseño de pruebas experimentales en túnel de viento en cubiertas aisladas y la caracterización de un terreno categoría 4 se muestra en el Capítulo 4. Detalles de la construcción de los modelos se muestran en el Capítulo 5.

El Capítulo 6 presenta los resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva y las comparaciones con investigaciones tanto experimentales como en Mecánica de Fluidos Computacional. Se presenta en el Capítulo 7 la propuesta de coeficientes de presión para el diseño de cubiertas curvas aisladas con área libre debajo.

En el Capítulo 8 se brinda una serie de recomendaciones y conclusiones de los resultados obtenidos, adicionalmente, se incluye trabajos futuros sobre la misma línea de investigación para enriquecer esta investigación. Finalmente, en los Anexos A y B se muestran las gráficas de contorno obtenidas de las pruebas experimentales para cada modelo de los 21 ángulos analizados.

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Capítulo 2. Cubiertas curvas soportadas por columnas

---

### 2.1 Antecedentes

En México, al igual que en otros países, está expuesto a fenómenos meteorológicos cada año, sin embargo, estos eventos tienen intensidades aleatorias cada vez que se presentan, frecuentemente este tipo de infraestructura se ven afectadas por estos fenómenos debido a que no están correctamente diseñadas para resistir los esfuerzos que inducen. A lo largo de los eventos acontecidos se ha observado fallas recurrentemente en los mecanismos de sujeción de la cubierta que a su vez provoca fatiga en la lámina, otra de las fallas recurrente es el pandeo local de los elementos secundarios de apoyo de la cubierta, también se ha presentado el colapso total de la estructura de la cubierta que es provocada por las intensas lluvias y altas velocidades que ocasionan sobrecarga en la cumbrera de la cubierta (Murià Vila et al., 2015).

Al contar con limitada información en este tipo de estructuras se puede llegar a observar fallas en este tipo de estructuras, por lo que se requiere desarrollar más investigación que mejoren el diseño estructural de esta tipología para mitigar los daños estructurales producidos por las fuerzas del viento.

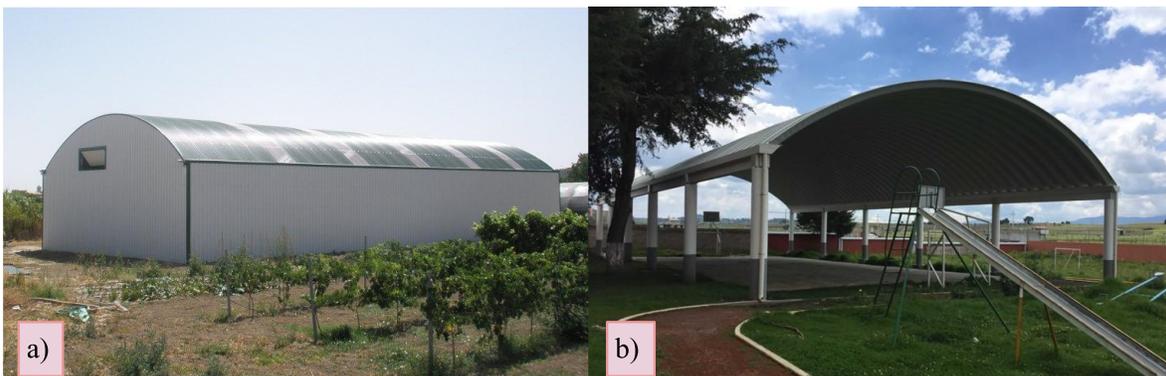


Figura 2.1 Estructura con cubierta de arco circular: a) Cerrada con muros laterales; b) Cubierta aislada soportada por columnas

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se busca aportar información que muestre el comportamiento de naves industriales con cubiertas de arco circular aisladas ante los efectos inducidos por el viento de manera experimental.

Se estudiaron dos modelos a escala de una nave industrial de arco circular aisladas soportada por columnas, con una relación de longitud-ancho de 1:2.5, variando el ángulo de inclinación del arco para comprender si este último influye en el comportamiento de la distribución de las presiones sobre la cubierta.

La ingeniería de viento es un campo de la ingeniería civil que se centra en cómo el viento afecta a las estructuras y edificios. Esto incluye el diseño de estructuras y edificios que pueden resistir las cargas del viento, así como métodos de medición, análisis y software de simulación para evaluar el impacto del viento en las estructuras y entender la dinámica estructural y aerodinámica y, en última instancia, calcular las cargas de viento.

Una forma común de abordar la ingeniería del viento es mediante la simulación numérica de modelos y códigos de diseño. En este enfoque, se utilizan herramientas de software para simular el comportamiento del viento en diferentes condiciones y evaluar su impacto en las estructuras, a esta simulación numérica se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

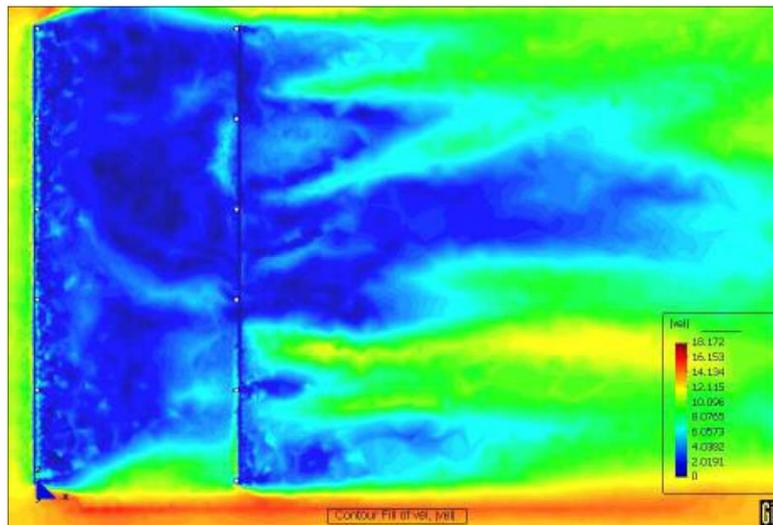


Figura 2.2 Simulación numérica sobre cubierta curva aislada (G. C. Balbastro et al., 2005)

Algunos de los códigos de diseño más utilizados en la ingeniería del viento son el (ASCE 7, 2022), el (Eurocódigo 1, 1998) y el (AS/NZS 1170.2, 2011). Además, existen diferentes métodos de diseño utilizados en la ingeniería del viento.

Algunos de los códigos mencionados incluyen el método de sobrecarga, que se utiliza para estructuras simples y se basa en la aplicación de una carga de viento uniforme; el método de coeficientes de presión, que se utiliza para estructuras más complejas y tiene en cuenta la distribución de presión del viento en la superficie de la estructura; y el método de simulación numérica, que se utiliza para obtener una evaluación más precisa de las cargas de viento y el comportamiento estructural.

En las últimas décadas, se han logrado avances significativos en la ingeniería de viento, incluyendo el uso de técnicas avanzadas de medición, como el escaneo-láser 3D, para capturar datos precisos del viento y la implementación de simulaciones numéricas detalladas para modelar el flujo del viento alrededor de las estructuras. Estos avances han permitido a los ingenieros diseñar edificios más altos y sofisticados que puedan resistir vientos extremadamente fuertes y condiciones climáticas extremas.

En resumen, la ingeniería de viento es una disciplina en constante desarrollo que aborda los desafíos relacionados con las fuerzas del viento en el diseño estructural. La investigación ha llevado a una mejor comprensión de las características del viento, el cálculo de las cargas, la respuesta estructural y el desarrollo de normativas de diseño. Estos avances han permitido diseñar estructuras más seguras y eficientes, optimizando su resistencia al viento y garantizando su durabilidad en una amplia variedad de aplicaciones.

### **2.2 Estructuras con cubiertas de arco circular aisladas**

En México, los efectos de viento en las estructuras han tomado importancia debido al constante cambio en los efectos meteorológicos a nivel global, en los últimos años, los avances por desarrollar nuevas metodológicas para analizar las estructuras que son susceptibles al efecto del viento (p.e. las cubiertas curvas soportadas por columnas) han sido relevantes, dentro de las cuales destacan dos que han demostrado replicar los efectos aerodinámicos; la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional y la técnica experimental.



Figura 2.3 Estructura tipo con cubierta de arco circular aislada

Con respecto a la evolución de las investigaciones de las naves industriales con tipología similar a la estudiada en el presente trabajo. Los estudios que se muestran de manera resumida en la Tabla 2.1 se limitan a coeficientes promediados en el tiempo.

Tabla 2.1 Resumen de estudios previos

Autores	Objetivo del estudio	Metodología de prueba	Relaciones de aspecto de los modelos			Terreno / Ángulos de prueba	Escala	Tipo y formato de los datos presentados
			f/b	h/b	a/b			
(Irminger & Nökkentved , 1936)	Cargas netas en un VCR	Prueba en túnel de viento	0.25	N//A	N/A	Suave y uniforme / 90°-60°-30°	N/A	Presiones netas promedio,
(Natalini et al., 2001)	Sensibilidad de modelos VCR al Re y rugosidad de cubierta	Prueba en túnel de viento con y sin simulación a 7 diferente Re.	0.17	0.50	2.22	Área suburbana / 90°	1:75	Presiones en cubierta superior: distribución en la mitad de cubierta. Fuerza de arrastre: variación de Re.
(Marighetti et al., 2002)	Comparación de presiones en cubierta superior en VCR y PCR similares.	Prueba en túnel de viento. Modelos con arena en la cubierta.	0.17	0.50	2.22	Área suburbana / 90°-45°	1:75	Presiones en cubierta superior: Gráficos de contorno.
(Natalini et al., 2002)	Cargas netas en VCR y comparación con estructuras cerradas de dimensiones similares	Prueba en túnel de viento. Modelos con arena en la cubierta.	0.17	0.50	2.10	Área suburbana / 90°-45°	1:75	Presiones en cubierta superior, inferior y netas. Gráficos de contorno y distribuciones en 3 diferentes secciones

Continuación de Tabla 2.1 Resumen de estudios previos

Autores	Objetivo del estudio	Metodología de prueba	Relaciones de aspecto de los modelos			Terreno / Ángulos de prueba	Escala	Tipo y formato de los datos presentados
			f/b	h/b	a/b			
(G. C. Balbastro et al., 2004, 2005)	Calibración de herramientas de CFD.	Modelado en CFD, FEM y LES.	Reproducción de experimentos elaborados por Natalini et al (2001, 2002)				1:75	Presiones en cubierta superior, inferior y netas. Gráficos de contorno y visualización de flujo.
(Natalini, 2005)	Establecer las direcciones de viento más adversas	Prueba en túnel de viento. Modelos con arena en la cubierta.	0.20	0.40 0.30 0.10	4.00	Área suburbana / 90°-60°-30°-45°	1:75	Presiones netas. Gráficos de contorno. Coeficientes de fuerza de levantamiento y arrastre.
(G. Balbastro & Sonzogni, 2006)	Prueba de sistema de tubo novedoso. Calibración de herramientas de CFD.	Prueba en túnel de viento. Modelos con arena en la cubierta. Modelado CDF.	0.18	0.50	2.40	Área suburbana / 90°	1:75	Presiones en cubierta superior, inferior y netas. Gráficos de contorno.
(G. C. Balbastro & Sonzogni, 2007)	Prueba de sistema de tubo novedoso. Calibración de herramientas de CFD.	Prueba en túnel de viento. Modelos con arena en la cubierta y CDF.	0.18	0.50	2.40 1.20	Área suburbana / 90°	1:75	Presiones en cubierta superior, inferior y netas en 6 zonas.
(G. C. Balbastro, 2009)	Estudio paramétrico de cargas	Modelado en CFD.	0.07 0.13 0.18	0.46,0.18 0.11,0.82 0.33,0.20 1.18,0.47 0.29	0.50 3.0 5.5	Área suburbana / 90°-60°-75°	1:75 1:10	Presiones en cubierta superior, inferior y netas en 6 zonas. Visualización de flujo
(G. C. Balbastro & Sonzogni, 2011)	Influencia del bloqueo parcial.	Modelado en CFD. Un arreglo de bloqueo.	0.12	0.50	2.00	Terreno abierto / 90°	1:50	Coeficientes de levantamiento y arrastre. Visualización de flujo.
(G. C. Balbastro & Sonzogni, 2012)	Influencia del bloqueo parcial.	Modelado en CFD. Dos arreglos de bloqueo.	0.12	0.50	2.00	Terreno abierto / 90°	1:50	Coeficientes de levantamiento y arrastre. Visualización de flujo
(Natalini et al., 2013)	Obtener coeficientes medios de carga de viento en VCR	Prueba en túnel de viento de capa límite.	0.20	0.40 0.27 0.13	4.00 2.00	Área suburbana / 90°-60°-75°	1:75	Presiones en cubierta superior, inferior y netas. Gráficos de contorno.
(Martínez Valderrama, 2017)	Influencia de la rugosidad en VCR	Prueba en túnel de viento de capa límite.	0.20	0.35	2.00	Terreno abierto sin obstrucciones / 0°-45°-90°	1:75	Coeficientes en cubierta superior e inferior. Gráficos de contorno.
(Uematsu & Yamamura, 2019)	Obtener fuerzas y momentos aerodinámicos utilizando una balanza de fuerzas	Prueba en túnel de viento de capa límite.	0.10 0.20 0.30 0.40	0.53	1.00	Área suburbana / 90°-45°-30°-0°	1:100	Gráfica de distribución de coeficientes en sección transversal.

## Continuación de Tabla 2.1 Resumen de estudios previos

Autores	Objetivo del estudio	Metodología de prueba	Relaciones de aspecto de los modelos			Terreno / Ángulos de prueba	Escala	Tipo y formato de los datos presentados
			f/b	h/b	a/b			
(Amaya-Gallardo et al., 2021)	Evaluar numéricamente los efectos del viento en VCR. Estudio paramétrico de dimensiones.	Modelado en CFD aplicando simulación RANS.	0.13 0.20 0.19	0.25 0.50 0.75	1.50 2.00 2.50	Terreno abierto con pequeñas obstrucciones/ 0°- 15°- 30°- 45°- 60°- 75°- 90°	1:10	Presiones en cubierta superior y presiones netas en 4 zonas.
(Ding & Uematsu, 2022)	Cargas de viento para diseño VCR.	Prueba en túnel de viento	0.10	0.48	1.00	Área suburbana/ 90°-60°-45°-0°	1:100	Coefficiente de presión media de viento y de fuerzas. Gráficos de contorno.

Nota: Adaptado de Natalini et al (2013). a: dimensión longitudinal, b: dimensión transversal, h: altura de la columna, f: altura desde la base al alerón de la cubierta, Re: Numero de Reynolds, Taps: Tomas de presión, FEM: Método de Elementos Finitos (por sus siglas en inglés), LES: Simulación de turbulencia grande (por sus siglas en inglés), RANS: Reynolds promediado Navier–Stokes (por sus siglas en inglés), VCR: Cubierta dosel abovedado (por sus siglas en inglés), PCR: Cubierta dosel plano (por sus siglas en inglés).

### 2.3 Fallas observadas en cubiertas circulares aisladas debidas al viento

En esta sección se describe los patrones de daño originados por las fuertes corrientes de viento en esta tipología de estructuras (p.e. Huracán “Odile” en 2014 y Huracán “Rick” en 2021), la mayoría de los daños ocurrieron principalmente en elementos no estructurales debido a la falta de información técnica para el diseño por las acciones de estos fenómenos meteorológicos, en esta sección se hace mención solo a algunos de ellos. En la presente investigación se considera como daño desde el desprendimiento de los elementos de recubrimiento, fallas o pandeos locales en elementos secundarios hasta el colapso parcial o total de la estructura.

Los casos mencionados en este apartado pueden ser utilizados como guía para la creación de futuros diseños que cumplan con los estándares establecidos y, en su caso, para llevar a cabo investigaciones que contribuyan a la seguridad de las construcciones civiles. En términos generales, se ha identificado que las fallas más comunes en construcciones de naves industriales de cubierta circular aislada sometidas a la fuerza del viento son fallas por corte o tensión en los elementos de anclaje, lo cual detona el desprendimiento de los elementos de cubierta y de elementos no estructurales.

Estos patrones de fallas pueden causar daños significativos que no deben ser subestimados. Es fundamental considerar las construcciones adyacentes y el mantenimiento adecuado de la estructura tanto principal como secundaria en los diseños.

El huracán Odile tocó tierra al sur de la península de Baja California el 14 de septiembre de 2014 con velocidades de ráfagas de 240 km/h (Figura 2.4), que corresponden a un huracán categoría 3, según la escala Saffir-Simpson (Bravo Lujano, 2014); en las ciudades de La Paz y San José del Cabo se observaron daños en estructuras industriales, comerciales, deportivas y cubiertas aisladas debidos a los efectos del viento; los principales daños observados en este tipo de estructuras fueron el desprendimiento de la cubierta debido al desgarramiento de la lámina o a la falla de los elementos de conexión y el colapso de techos aislados (Murià Vila et al., 2015).

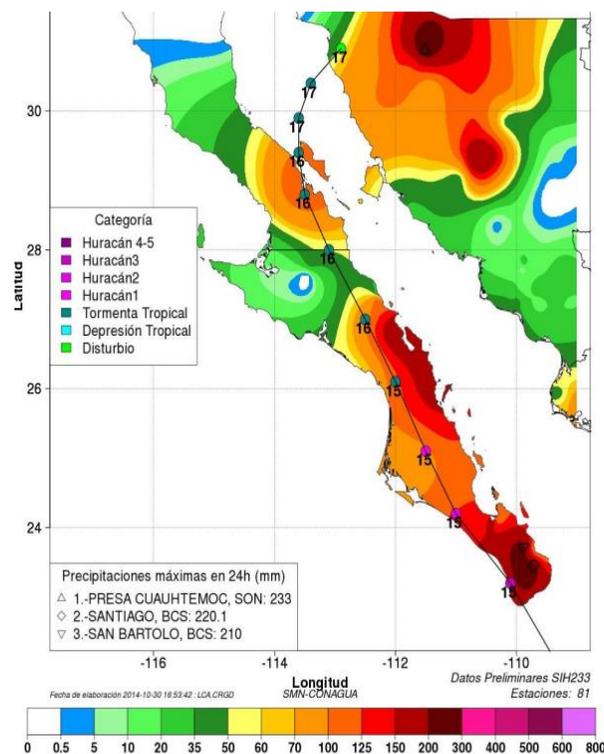


Figura 2.4 Trayectoria, intensidad y precipitación del huracán "Odile" del Océano Pacífico (Bravo Lujano, 2014)

En la Figura 2.5 se presenta la cubierta circular de las gradas en el campo de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) y un enfoque de los detalles. En la Figura 2.5(b) se presentan los daños en las láminas de la cubierta, donde se pueden apreciar

deformaciones hacia arriba; estas deformaciones podrían haber sido causadas por variaciones de presión inducidas por el viento sobre la cubierta, especialmente en la zona cercana a la cresta (MDOC-V, 2020). El diseño de la cubierta se basa en un arco que se sostiene en el sentido transversal por siete armaduras, mientras que en el sentido longitudinal se emplean perfiles de acero tipo monten.



Figura 2.5 Cubierta de gradas del campo de la UABCS (Murià Vila et al., 2015):  
a) vista en perspectiva; b) detalles de la lámina

El viento induce grandes succiones en la parte superior del extremo de la cubierta en voladizo, lo cual genera fuerzas de levantamiento importantes (Meseguer Ruiz et al., 2001; Sachs, 1978; Simiu & Scandan, 1996), que pudieron haber generado el levantamiento de parte de la cubierta.

La Figura 2.6(a) presenta la cubierta de una cancha de baloncesto, la cual se caracteriza por tener una estructura en forma de arco que está sostenida por armaduras conectadas a columnas mediante perfiles metálicos de tipo IR, además se observa que la cubierta consta

de dos estructuras de arco independientes. En contraste con la cubierta previamente mencionada, en este caso, la lámina se encuentra ubicada debajo de la estructura de soporte.

En la Figura 2.6(b) se observa un enfoque detallado de la cubierta, en los cuales se detectaron daño en la cubierta. Como se observa, en algunas áreas de la armadura que se encuentran a la intemperie ya presentaban cierto grado de corrosión, por lo tanto, es importante destacar el oportuno mantenimiento que requieren las estructuras de acero para evitar la temprana degradación a la misma, que dependiendo si es una zona de crítica pudiera provocar un colapso si la estructura es sensible a los efectos de viento con altas velocidades.

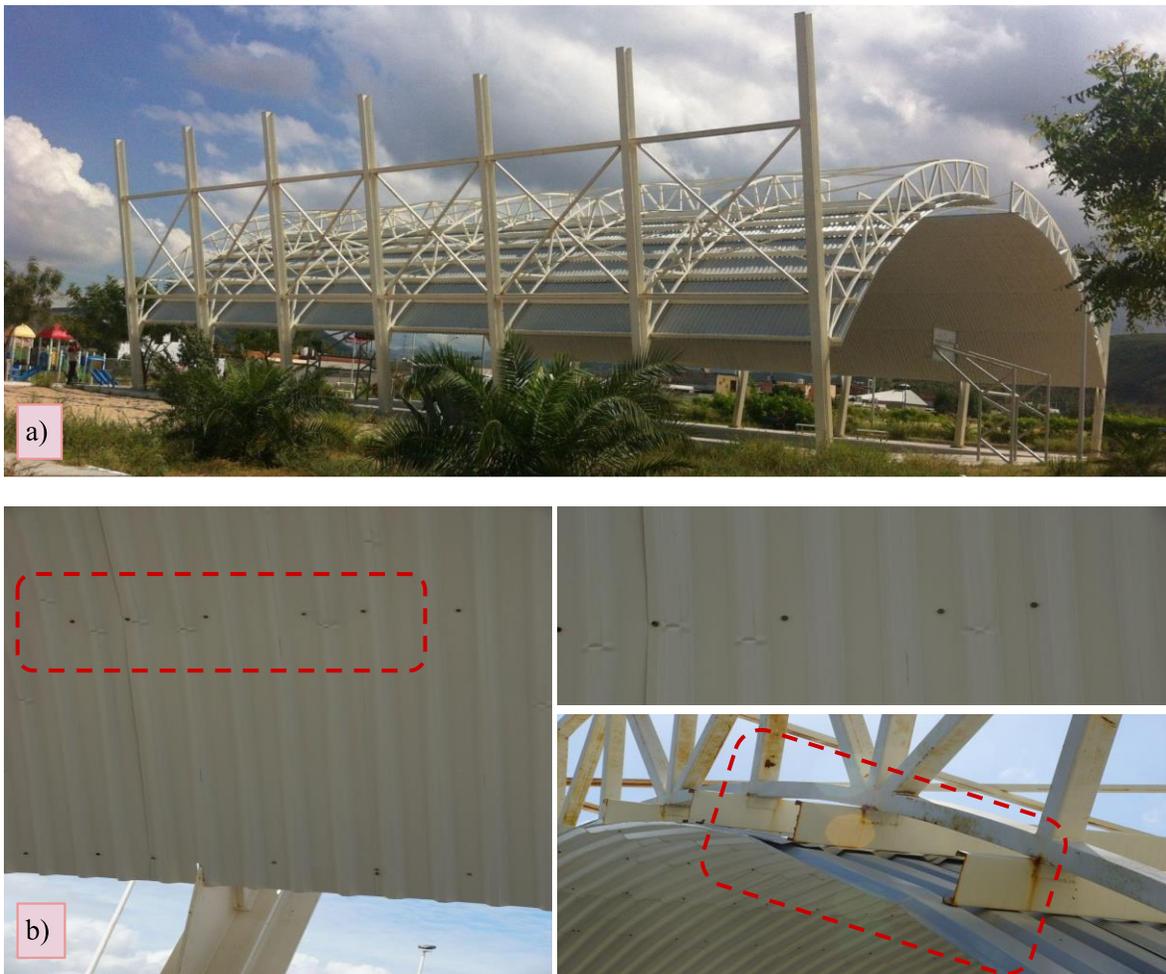


Figura 2.6 Cancha de baloncesto techada (Murià Vila et al., 2015): a) vista en perspectiva;  
b) acercamiento a la cubierta

La Figura 2.7(a) muestra una cubierta curva, ubicada junto al edificio de la terminal 1 del Aeropuerto Internacional de Los Cabos que atiende fundamentalmente a San José del Cabo y Cabo San Lucas; la cual se encarga de los vuelos nacionales y algunos internacionales. La estructura está compuesta por cuatro columnas circulares de acero que se conectan mediante cuatro armaduras en dirección transversal y dos en la dirección longitudinal. La lámina acanalada se apoya sobre perfiles metálicos tipo monten, y estos últimos descansan sobre las armaduras.

En la Figura 2.7(b) se presenta un enfoque de la zona de la parte inferior de la cubierta, donde se puede observar que es una esquina opuesta a la terminal que ha experimentado desprendimiento de la lámina. Es importante tener en cuenta la presencia del edificio adyacente a la cubierta, ya que el edificio podría haber alterado la distribución de presiones sobre la cubierta, generando succiones que son comparables a las de un techo aislado (Murià Vila et al., 2015).



Figura 2.7 Cubierta adyacente a la terminal 1 (Murià Vila et al., 2015): a) vista en perspectiva; b) zona de daño de la cubierta

El Huracán “Rick” aconteció en el Océano Pacífico del 22 al 25 de octubre de 2021 a una distancia de 30 km al oeste de Zihuatanejo, Guerrero, alcanzó la que sería su mayor intensidad como huracán de categoría 2 (Figura 2.8) con vientos sostenidos de 165 km/h y velocidades de ráfaga de 205 km/h (Berg, 2022). Fue otro de los acontecimientos meteorológicos que no solo causo daños a este tipo de naves industriales sino también a la población entera de los estados de Michoacán y Guerrero.

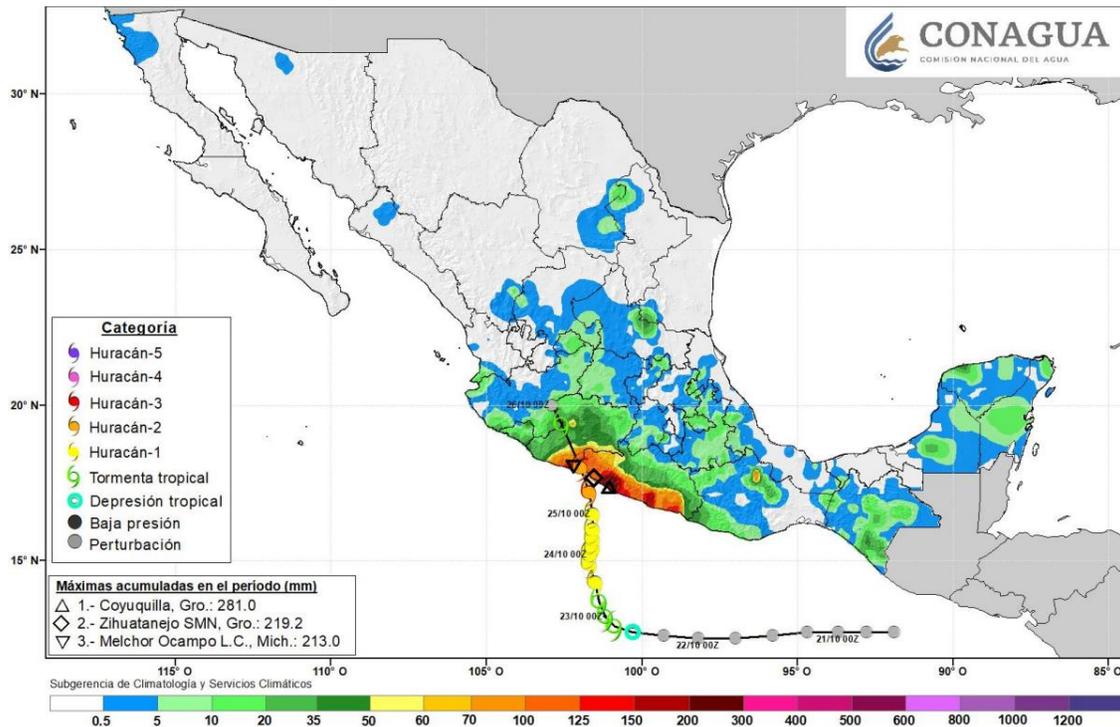


Figura 2.8 Trayectoria, intensidad y precipitaciones del Huracán "Rick" (Berg, 2022)

En la Figura 2.9 se observa los daños registrados por el huracán “Rick” en el domo de una cancha de baloncesto de la unidad deportiva de Zihuatanejo, la estructura está formada con cubierta circular que consta de 3 armaduras en el sentido corto de la estructura, construida con laminado de acero con sección transversal de canaleta, soportada por 16 columnas circulares de concreto. El daño que se presentó fue la caída de la techumbre de una de las canchas de usos múltiples que fue provocada por las lluvias y las intensas velocidades de viento, provocando el colapso parcial del sistema de laminado.



Figura 2.9 Cancha de baloncesto de la unidad de deportiva de Zihuatanejo (Magaña, 2021; Patiño Eliut, 2021)

Es interesante notar que el desprendimiento de parte de la cubierta se presentó cerca de la cumbre de la cubierta, atribuible a un flujo de viento que ocasionó un cambio de presiones y succiones que provocaron la falla del laminado.

En la Figura 2.10 se muestra el colapso del laminado del domo de la unidad deportiva de Motozintla "El Copal"; la cubierta de la estructura soportada en los laterales por 8 columnas circulares de concreto de cada lado. Los daños que se dieron en la cubierta fueron ocasionados por los fuertes vientos derivados del Frente Frío número 33 en febrero de 2023 que azotaron la región de la Sierra de Mariscal.



Figura 2.10 Unidad Deportiva de Motozintla colapsada (Araujo, 2023; García, 2023)

En general, la combinación de presiones diferenciales (presiones positivas y negativas) y las grandes succiones inducidas por el viento sobre las cubiertas fueron las que ocasionaron el desprendimiento y el colapso en techos aislados.

## Capítulo 3. Metodología experimental de estructuras en túnel de viento

---

### 3.1 Pruebas de túnel de viento

Para entender el funcionamiento de los túneles de viento y sus aplicaciones en la realización de pruebas, empezamos por aprender acerca de la aerodinámica y cómo se aplica en diferentes campos, como en la industria aeronáutica, en la ingeniería civil y en la arquitectura.

Un túnel de viento es un dispositivo que se utiliza para simular el flujo de aire sobre un objeto en un ambiente controlado y reproducible. El objeto para estudiar se coloca dentro del túnel de viento y se somete a una corriente de aire a diferentes velocidades y ángulos de incidencia. Esto permite que los investigadores y diseñadores estudien cómo se comporta el objeto bajo diferentes condiciones y cómo se pueden mejorar su diseño para una mejor eficiencia y seguridad.

Los túneles de viento son herramientas vitales en el diseño y desarrollo de vehículos aerodinámicos, edificios y estructuras, y también han sido utilizados en estudios ambientales; algunas de las aplicaciones de los túneles de viento incluyen:

- Diseño de aviones y otros vehículos aerodinámicos: los investigadores pueden probar diferentes diseños para optimizar la aerodinámica de los vehículos y reducir la resistencia del aire, lo que a su vez mejora la eficiencia del combustible y la estabilidad del vuelo.
- Diseño de edificios y estructuras: los túneles de viento se utilizan para estudiar cómo el viento interactúa con edificios y estructuras, lo que puede ayudar a los arquitectos e ingenieros a diseñar edificios más resistentes a las tormentas y mejorar la calidad de vida de las personas que viven y trabajan en ellos.
- Estudios ambientales: los túneles de viento también se pueden usar para estudiar cómo el viento afecta el clima y la calidad del aire en diferentes regiones.

En la actualidad, la tecnología en los túneles de viento ha mejorado significativamente con la implementación de técnicas como sistemas de medición láser, análisis de imagen, e instrumentos de alta precisión que permiten mediciones más precisas y detalladas.

#### 3.2 Tipos de pruebas en túnel de viento

Las pruebas en túneles de viento también se han ampliado para incluir simulaciones de fenómenos atmosféricos como tormentas, turbulencias aeronáuticas y otros eventos meteorológicos para entender mejor cómo impactan en vehículos y estructuras. Además, se han desarrollado modelos informáticos avanzados que permiten simular las pruebas de túneles de viento virtualmente.

Existen diferentes tipos de pruebas que se pueden realizar en un túnel de viento, dependiendo de los objetivos y las características del experimento. Algunos de los tipos de pruebas más comunes son:

**Medición de la resistencia aerodinámica:** Esta prueba se realiza para medir la cantidad de resistencia que un objeto enfrenta al moverse a través del aire. Esta resistencia puede ser una fuerza que se opone al movimiento, disminuyendo la velocidad del objeto. La resistencia aerodinámica se mide mediante la aplicación de una corriente de aire conocida en el objeto en cuestión y midiendo la cantidad de fuerza que se requiere para moverlo.

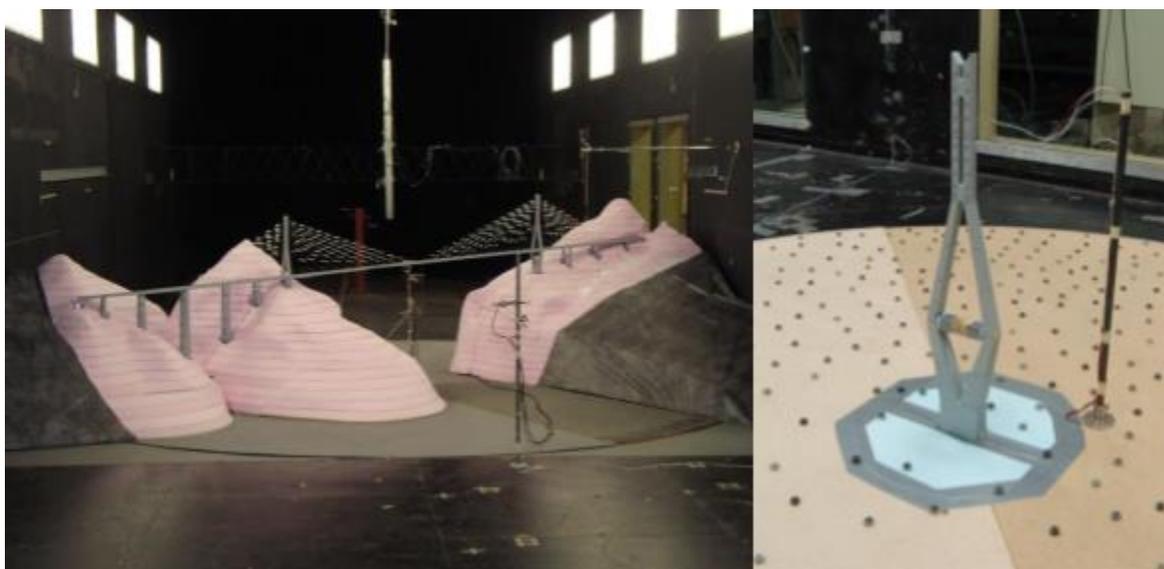


Figura 3.1 Modelos aeroelásticos (Pozos Estrada & Gómez Martínez, 2010)

Estudio de la aerodinámica de un objeto: Esta prueba se utiliza para estudiar cómo fluye el aire alrededor de un objeto y cómo afecta a su movimiento. Se utilizan diferentes modelos a escala de los objetos para hacer las pruebas de túnel de viento.

Los datos obtenidos con estas pruebas se utilizan para analizar y optimizar el diseño de los objetos, para reducir la resistencia aerodinámica y mejorar la eficiencia.



Figura 3.2 Modelos rígidos (Nava-González, 2019)

Prueba de vibraciones: Esta prueba se utiliza para medir las vibraciones que se producen en un objeto en las diferentes condiciones de viento y así identificar los puntos débiles o los problemas en el comportamiento aeroelástico, especialmente en las aeronaves.

Prueba de efecto suelo: Esta prueba se utiliza para estudiar cómo el aire se comporta cerca de una superficie, lo que puede tener un impacto en objetos que están cerca del suelo, como los coches de carreras. La prueba se realiza para optimizar las características aerodinámicas del vehículo y mejorar su capacidad para mantener contacto con el suelo a altas velocidades.

Prueba de ruido: Esta prueba se utiliza para medir los niveles de ruido que se producen alrededor de un objeto en diferentes condiciones de viento. El túnel de viento se utiliza para

crear un flujo de aire controlado, lo que permite medir el ruido para diferentes velocidades de viento y ángulos de ataque. El objetivo principal de esta prueba es reducir el ruido que se produce en diferentes objetos en diferentes condiciones y mejorar su eficiencia.

**Pruebas de corrosión y envejecimiento:** Estas pruebas se utilizan para determinar la resistencia de diferentes materiales a la corrosión y el envejecimiento en diferentes niveles de exposición al aire. Los materiales se exponen a un flujo controlado de aire y condiciones de temperatura específicas durante un período de tiempo determinado. El objetivo principal es determinar la durabilidad y la resistencia del material, y utilizar esta información para mejorar el diseño y calidad de los objetos.

**Pruebas de intensidad de lluvia y granizo:** Estas pruebas se utilizan para simular los diferentes patrones y niveles de intensidad de lluvia y granizo en diferentes objetos. El túnel de viento se utiliza para simular diferentes velocidades y condiciones de viento, lo que permite a los ingenieros evaluar cómo estos objetos resisten las condiciones climáticas extremas. El objetivo principal de esta prueba es mejorar la resistencia y durabilidad de estos objetos para que puedan soportar mejor las condiciones meteorológicas extremas.

**Prueba de impacto de objetos en vuelo:** Esta prueba se utiliza para evaluar cómo los objetos resisten los impactos de otros objetos en diferentes velocidades y condiciones de viento. Esta prueba se realiza para mejorar la seguridad de los objetos como aviones, helicópteros y otros dispositivos voladores como se muestra en la Figura 3.3. Se utiliza para evaluar si los diseños son suficientemente fuertes para resistir el impacto y proporcionar información sobre cómo mejorar el diseño y la fabricación de estos objetos.



Figura 3.3 Prueba en el Complejo Aerodinámico Nacional a Gran Escala (NFAC) en Silicon Valley, California

Pruebas de comportamiento en situaciones meteorológicas extremas: En estas pruebas se simulan las condiciones meteorológicas más extremas, como huracanes, tifones, tormentas, nevadas, etc. El objetivo principal de estas pruebas es probar la resistencia y durabilidad de los edificios, vehículos, aeronaves y otros dispositivos ante condiciones climáticas adversas. De esta manera, se pueden identificar los posibles problemas y mejorar el diseño de estos dispositivos para que puedan soportar mejor estas situaciones.

Pruebas de calidad del aire: En estas pruebas se evalúan las emisiones y la contaminación producida por diferentes dispositivos, como aviones, coches, trenes, etc. (Figura 3.4). El objetivo principal de estas pruebas es probar la eficacia de los sistemas de emisión y reducir los niveles de emisiones contaminantes producidos por estos dispositivos. Los túneles de viento son útiles para estas pruebas debido a que permiten controlar con precisión la velocidad del aire y las condiciones de presión.

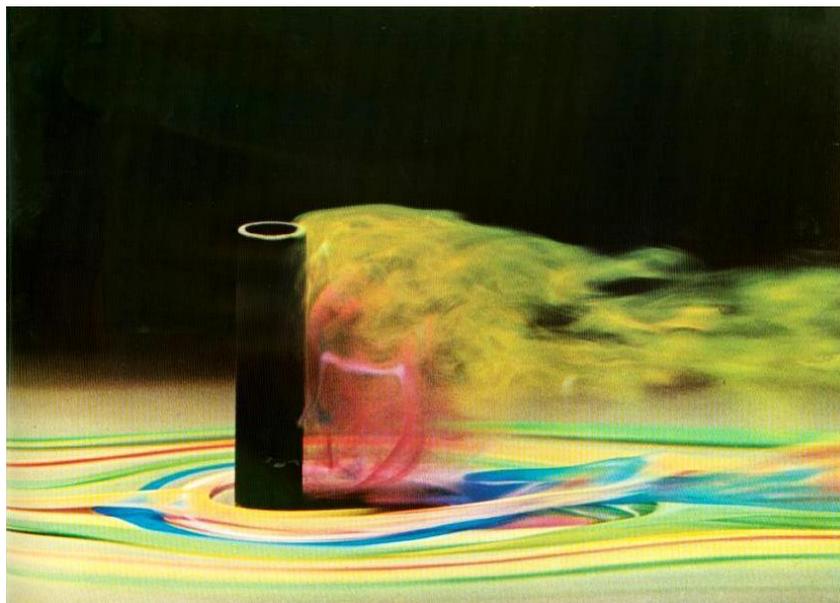


Figura 3.4 Prueba de calidad del aire (Pozos Estrada & Gómez Martínez, 2010)

En los últimos dos casos, las pruebas se realizan en condiciones controladas, lo que permite a los ingenieros y diseñadores recopilar datos precisos y repetibles. Los datos se utilizan para optimizar el diseño y mejorar la calidad de los dispositivos para que puedan funcionar de manera eficaz en situaciones extremas y reducir el impacto ambiental producido por algunas tecnologías.

### **3.3 Túnel de viento de capa límite atmosférica LemAT-UNAM**

Este subtema se enfoca en proporcionar información detallada sobre los componentes, dimensiones y capacidades del túnel de viento que fue utilizado para llevar a cabo las pruebas experimentales de los modelos de naves con cubierta circular soportada por columnas en este trabajo. Es importante destacar que las pruebas se llevaron a cabo en el túnel de viento de LemAT. Por lo tanto, se proporciona una breve reseña del túnel de viento y sus características para tener una mejor comprensión del contexto en el que se realizaron las pruebas.

En el año 2005, académicos del II-UNAM iniciaron el diseño de un túnel de viento de capa límite atmosférica, el cual sería el primero de su tipo en México. La empresa AIOLOS de Canadá, líder en el diseño de túneles de viento a nivel mundial, revisó el diseño un año después y se concluyó el diseño optimizado del túnel. La construcción del laboratorio fue

posible gracias a la colaboración de varias empresas, organismos e instituciones académicas tanto del sector público como privado. Un experto en pruebas de túnel de viento de la Universidad de Maryland inspeccionó el laboratorio después de su construcción y destacó la calidad en el diseño y construcción de este. El complejo LemAT, que incluye el Laboratorio de Túnel de Viento (Figura 3.5), fue inaugurado en febrero de 2015.

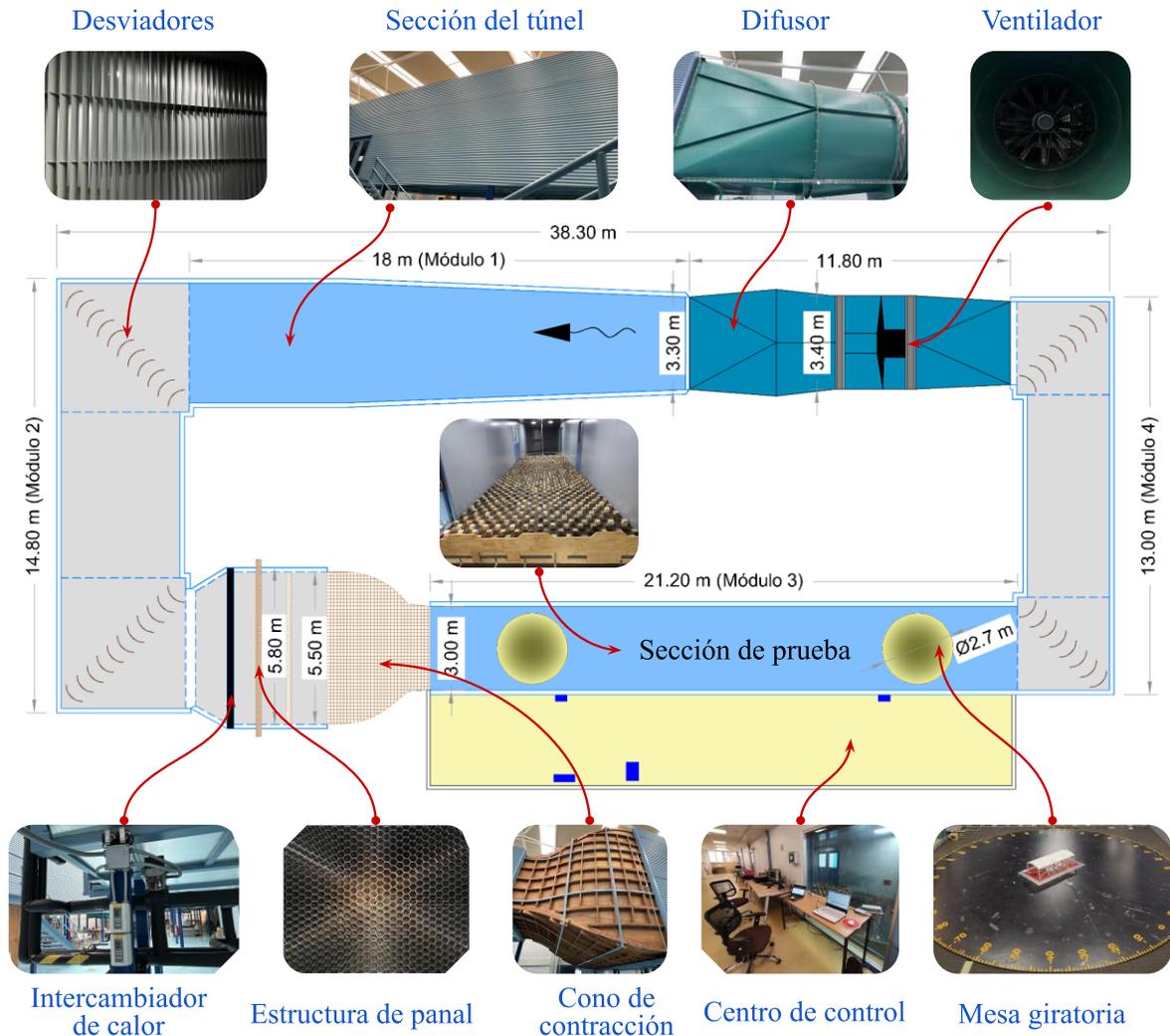


Figura 3.5 Componentes del túnel de viento LemAT (II-UNAM)

El nuevo túnel de viento de capa límite atmosférica es operado técnicamente por el GIV-UNAM, el cual es una herramienta científico-tecnológica que ayuda a resolver problemas relacionados con la ingeniería de viento mediante el estudio experimental de los fenómenos y efectos eólicos en las estructuras más comunes dentro del territorio mexicano.

Este túnel de viento se clasifica como un túnel de viento subsónico de circuito cerrado, pero es más apropiado clasificarlo con base en su función o área de aplicación como Túnel de Viento de Capa Límite (BLWT, por sus siglas en inglés). La característica principal de este tipo de túneles de viento es que la sección de pruebas posee una gran longitud, aproximadamente 7 o 10 veces el ancho de esta (Blessmann, 1982).

Las pruebas más comunes en este tipo de instalaciones son las orientadas a obtener cargas inducidas por el viento y estudiar la respuesta estructural, así como pruebas para resolver problemas de confort y de dispersión de contaminantes. En resumen, el túnel de viento de capa límite atmosférica del LemAT es una herramienta valiosa para la investigación y el desarrollo de soluciones en el campo de la ingeniería de viento en México.

El túnel de viento cuenta con cuatro partes principales: la zona de la turbina, que incluye un ventilador con un diámetro de 3.4 m y dos difusores para expandir el flujo; los desviadores, que dirigen el flujo del viento y reducen las pérdidas de energía producto de los cambios de dirección.

La cámara de asentamiento, que se utiliza para regular la temperatura y uniformizar el flujo hasta un régimen cuasi-laminar; y las mesas giratorias, donde se colocan los modelos para estudiar distintos ángulos de incidencia del viento.

La turbina funciona a una velocidad angular máxima de 600 rpm y produce un gasto volumétrico de alrededor de 170 m<sup>3</sup>/s cuando la sección de pruebas está libre de obstrucciones. Esta velocidad angular se relaciona con una velocidad media longitudinal de aproximadamente 22 m/s (equivalente a 80 km/h) en la salida del cono de contracción, con una intensidad de turbulencia sobre la altura gradiente,  $I_{Ux}$ , menor a 1 %.

Las mesas giratorias tienen la capacidad de girar a cada 0.5° en un intervalo de -179° a 179°, lo que permite analizar más de 700 ángulos de ataque del viento. Usualmente se realizan pruebas con variaciones en el ángulo de incidencia de 5° y 10° incluyendo direcciones completamente oblicuas para simplificar el problema. A partir de los resultados preliminares se puede revisar de manera particular intervalos de ángulos de ataque a cada 0.5°, con el fin de refinar los resultados en direcciones críticas para la estructura en estudio.

En la Figura 3.6 se muestra un esquema del túnel de viento donde se realizaron las pruebas experimentales del presente estudio.

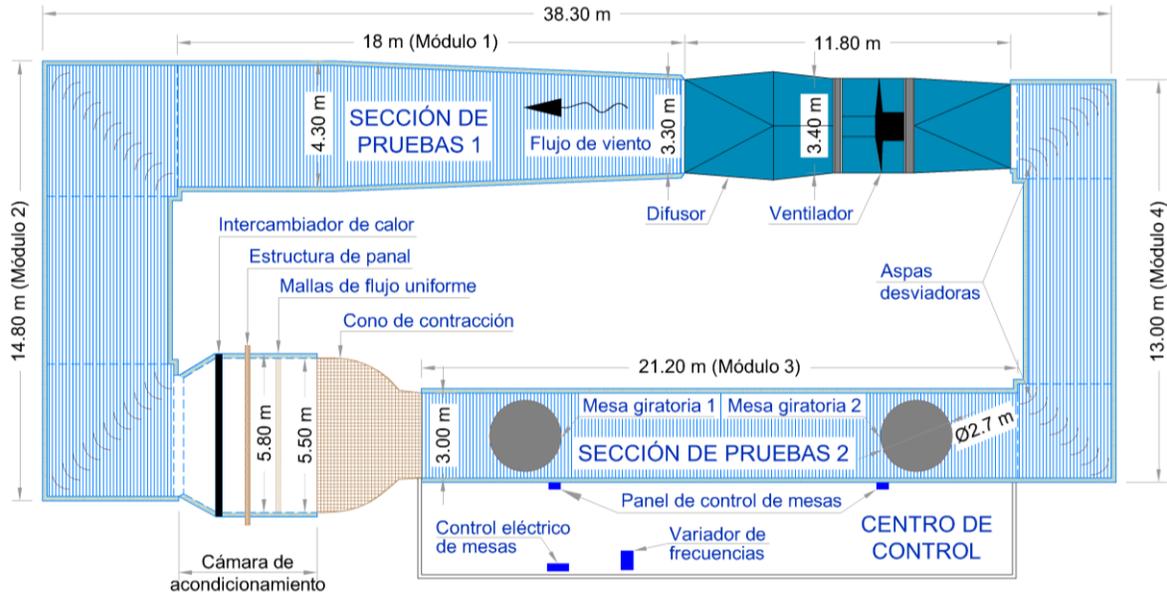


Figura 3.6 Vista en planta del túnel de viento de capa límite atmosférica, LemAT (II-UNAM)

### 3.4 Modelos rígidos en pruebas en túnel de viento

Las pruebas en el túnel del viento deben reproducir las condiciones reales, para que esto suceda se debe de caracterizar de manera adecuada los parámetros de similitud detallados en el siguiente capítulo, de tal forma, que el modelo simule de manera correcta la respuesta que se espera de la estructura. Por otra parte, las pruebas también tienen el propósito de verificar y mejorar las aproximaciones realizadas con la dinámica de fluido computacional.

Los modelos rígidos se caracterizan por tener ausencia de movimiento en los intervalos de velocidades del viento durante la prueba experimental y deben ser una representación precisa de la superficie de la estructura que interactúan con el viento. El uso de sensores de presión en las caras del modelo es una técnica común para medir ciertas variables durante las pruebas como se muestra en la Figura 3.7.

Es importante que las tomas de presión estén distribuidas adecuadamente sobre la estructura o elemento estructural para que se puedan capturar los efectos de carga que se desean medir. La presión debe ser medida en un número suficiente de ubicaciones y

direcciones de viento para no omitir los efectos de carga de viento significativos (ASCE 49, 2021). La ubicación y la cantidad de tomas de presión dependerá de la geometría de la estructura y la aplicación de la medición.

Para garantizar la calidad de las mediciones de presión, es necesario verificar que las tomas de presión estén conectadas correctamente y que no haya fugas en el sistema de tomas de presión, con la finalidad de asegurar que los resultados de las mediciones sean precisos y confiables.

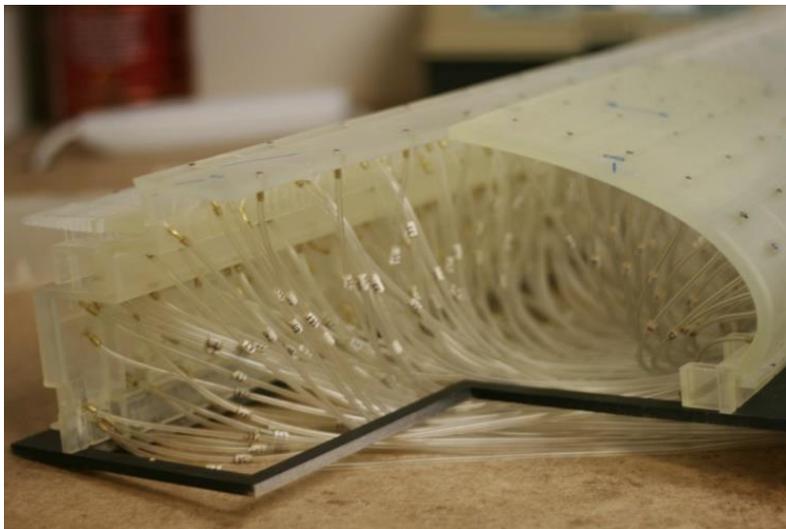


Figura 3.7 Sensores de presión en modelos rígidos (Mai, 2015)

### 3.5 Parámetros de similitud

Cuando se realiza la prueba en un túnel de viento, para nuestro caso; túnel de viento de capa límite atmosférica operado por el II-UNAM, se caracterizan las condiciones reales de la estructura y del medio alrededor, de esta manera se obtienen resultados que simula las acciones del viento de la manera más aproximada a la realidad.

#### 3.5.1 Escala geométrica

Es el parámetro más significativo porque está directamente relacionado con el diseño de la prueba, debido a que se debe considerarse de manera correcta la caracterización contemplando tanto las dimensiones del túnel del viento como del modelo, así como su adecuada instrumentación y detallado. La escala geométrica se calcula con la Ecuación 3.1.

$$\lambda_L = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde  $\lambda_L$  es la escala geométrica;  $\lambda_m$  es la longitud característica del modelo y  $\lambda_p$  es la longitud característica del prototipo.

De acuerdo con el (ASCE 67, 1999), la relación de bloqueo entre el área proyectada del modelo con respecto al plano perpendicular al flujo de viento y la sección transversal del túnel de viento debe ser no mayor al 5%, debido a que una relación de bloqueo en la sección de pruebas del túnel de viento mayor al 5% genera efectos de distorsión y aceleración del flujo de viento alrededor del modelo en estudio, estos efectos toman gran relevancia en los resultados de la prueba, por lo que se deben de realizar correcciones por el efecto de bloqueo.

La Ecuación 3.2 muestra la relación de áreas que ha de cumplirse para evitar correcciones por efecto de bloqueo.

$$\frac{A_m}{A_t} \leq 5\% \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde  $A_m$  es el área de la sección trasversal del modelo y  $A_t$  es el área de la sección trasversal del túnel de viento.

### 3.5.2 Escala de velocidades

La escala de velocidad es el cociente de la velocidad media a una altura de referencia del modelo y la velocidad media en el prototipo a la altura de referencia (Ecuación 3.3) en la escala real asociada a un tiempo de prueba de 10 minutos.

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde  $\lambda_v$  es la escala de velocidad;  $V_m$  es la velocidad en el experimento y  $V_p$  es la velocidad en escala natural.

### 3.5.3 Escala de tiempo

La escala de tiempo es el cociente de la escala de velocidad entre la escala geométrica.

$$\lambda_T = \frac{\lambda_V}{\lambda_L} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde  $\lambda_T$  es la escala de tiempo,  $\lambda_V$  es la escala de velocidad y  $\lambda_L$  es la escala geométrica.

### 3.5.4 Escala de frecuencia

La escala de frecuencia es el inverso de la escala de tiempo, por lo que se define con la siguiente expresión:

$$\lambda_F = \frac{1}{\lambda_T} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

donde  $\lambda_F$  es la escala de frecuencia y  $\lambda_T$  es la escala de tiempo.

## 3.6 Parámetros de muestreo de prueba

### 3.6.1 Velocidad de muestreo

En el cálculo de la velocidad de muestreo en la sección de pruebas se consideró una densidad del aire de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . La velocidad regional se obtuvo de los mapas de isotacas (MDOC-V, 2020) asociada a un periodo de retorno de 50 años, debido a la clasificación e importancia de la estructura. Se emplea la Ecuación 3.6 para el cálculo de la velocidad en las pruebas.

$$V_{\text{túnel}} = V_{10\text{min}} \cdot \lambda_V \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Es importante señalar que estos mapas están relacionados con velocidades de ráfagas expresadas en kilómetros por hora, lo que implica la necesidad de aplicar un factor de ajuste para obtener velocidades relacionadas con un período promedio de 10 minutos.

### 3.6.2 Tiempo de muestreo

El tiempo que dura la muestra está relacionado a la escala del tiempo multiplicado por el tiempo promediado de la prueba, como se describió anteriormente, se considera un tiempo de prueba en el prototipo de 10 min = 600 s.

$$T_m = \lambda_T \cdot T_p \quad \text{Ecuación 3.7}$$

donde  $\lambda_T$  es la escala de tiempo;  $T_m$  es el tiempo de muestreo en el modelo y  $T_p$  es el tiempo de muestreo en las pruebas.

El tiempo de muestreo del modelo en el túnel del viento será de 36 s, aunque por recomendaciones de expertos del GIV-UNAM, para la realización de las pruebas se empleará un tiempo de muestreo de 45 s.

### 3.6.3 Frecuencia de muestreo

Finalmente, se calcula la frecuencia de muestreo con la Ecuación 3.8.

$$F_m = F_p \cdot \lambda_F \cdot F_N \quad \text{Ecuación 3.8}$$

donde  $F_m$  es la frecuencia de muestreo en los modelos,  $F_p$  es la frecuencia de la estructura,  $\lambda_F$  es la escala de frecuencia y  $F_N$  es la frecuencia de Nyquist (es igual a 2 veces la frecuencia de análisis).

Las escalas previamente mencionadas están asociadas a través del empleo de la ecuación de la frecuencia reducida, con el propósito de calcular el período de observación en los experimentos efectuados en el túnel de viento. Cabe mencionar que ciertas de estas escalas se apoyan en literatura experimental, en virtud de la disponibilidad de bases matemáticas que pueden ser consideradas. Por recomendaciones del GIV-UNAM, la frecuencia de muestreo empleada en las pruebas fue de 445 Hz.

## 3.7 Ángulos de análisis

La mesa giratoria del túnel de viento LemAT puede girar a 0.5° lo que permite analizar más de 700 ángulos, considerando las recomendaciones del (ASCE 49, 2021), las mediciones

deben realizarse en incrementos de azimut no superiores a 10 grados y, en base a la simetría de los modelos y a la distribución de las tomas de presión, se analizó la estructura para los ángulos desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$  a cada  $10^\circ$  (incluyendo  $45^\circ$  y  $135^\circ$ ), obteniendo un intervalo completo de datos sobre la respuesta ante cualquier posible incidencia del viento.

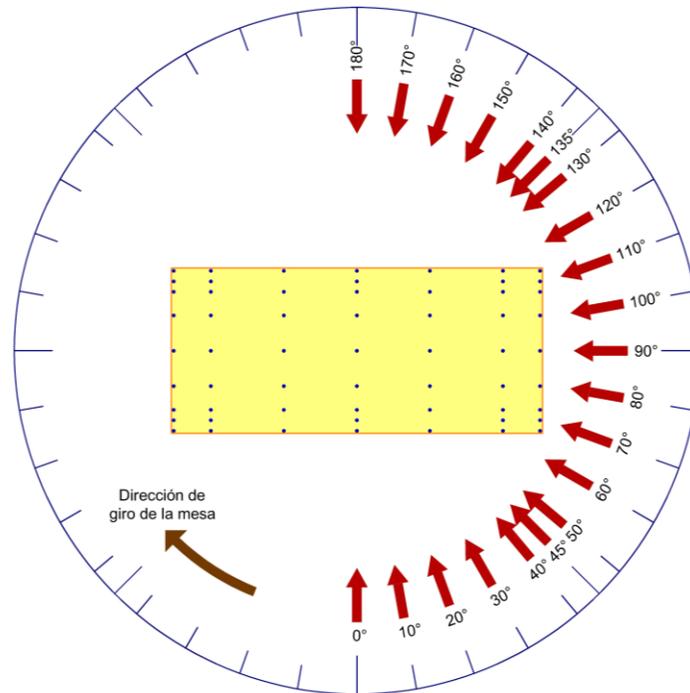


Figura 3.8 Ángulos de análisis

### 3.8 Caracterización de la categoría de terreno

Con el fin de representar las condiciones reales del flujo de viento asociada con una categoría del terreno en un entorno urbano, se emplean métodos y dispositivos que permiten simular de manera artificial la capa límite urbana. Los métodos que más se emplean para simular estas condiciones de terreno son el método de (Counihan, 1969, 1973) que consiste en el uso de una barrera almenada, agujas en forma de  $\frac{1}{4}$  de elipse, la altura de estas agujas será la de la altura gradiente asociada a la escala geométrica del modelo, posteriormente este método fue modificado por (Irwin, 1981), donde emplea agujas triangulares con un atiesador aguas arriba como se muestra en la Figura 3.9

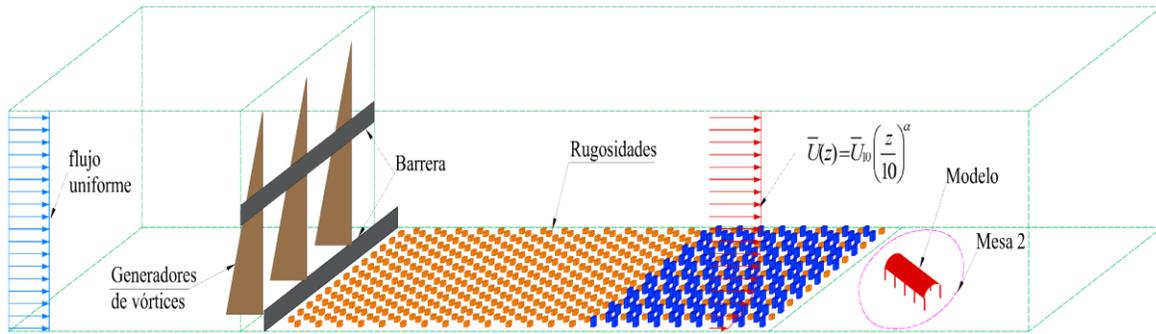


Figura 3.9 Representación esquemática de caracterización de la categoría de terreno

Para las pruebas en los modelos del presente trabajo se empleó el modelo de Counihan en todas las simulaciones puesto que en la literatura es el método más empleado (Amaya Gallardo et al., 2019) para la calibración de la capa límite atmosférica en el túnel de viento de la UNAM.

### 3.9 Simulación de la capa límite de altura parcial

Para caracterizar las condiciones del flujo de viento que actúan en la nave industrial de cubierta de arco circular aisladas se realizó la simulación de capa límite de altura parcial (ASL, por sus siglas en inglés) utilizando el método de (Irwin, 1981), debido a que el objetivo principal es representar la capa superficial atmosférica (ABL, por sus siglas en inglés) que es donde se ubica este tipo de estructuras, permitiendo asociar la escala de velocidades a 1/3 o 1/5 inferior de la capa límite atmosférica con la escala del modelo. Las proporciones del sistema de turbulencia para la simulación de altura parcial de la capa límite atmosférica se muestra en la Figura 3.10.

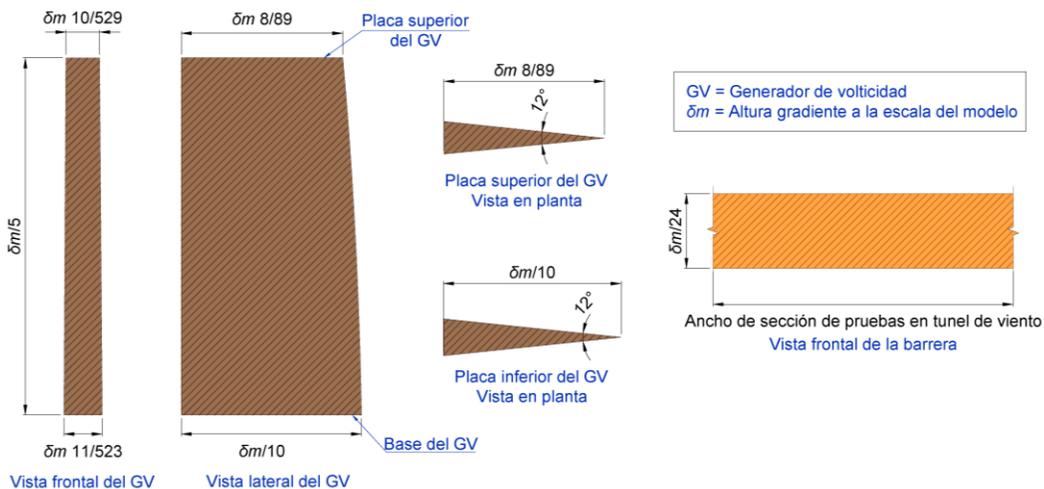


Figura 3.10 Dispositivos para simulación de capa superficial atmosférica (ASL)

El arreglo de las agujas, barrera y elementos cubo en el túnel de viento para las pruebas de los modelos se muestra en la Figura 3.11.

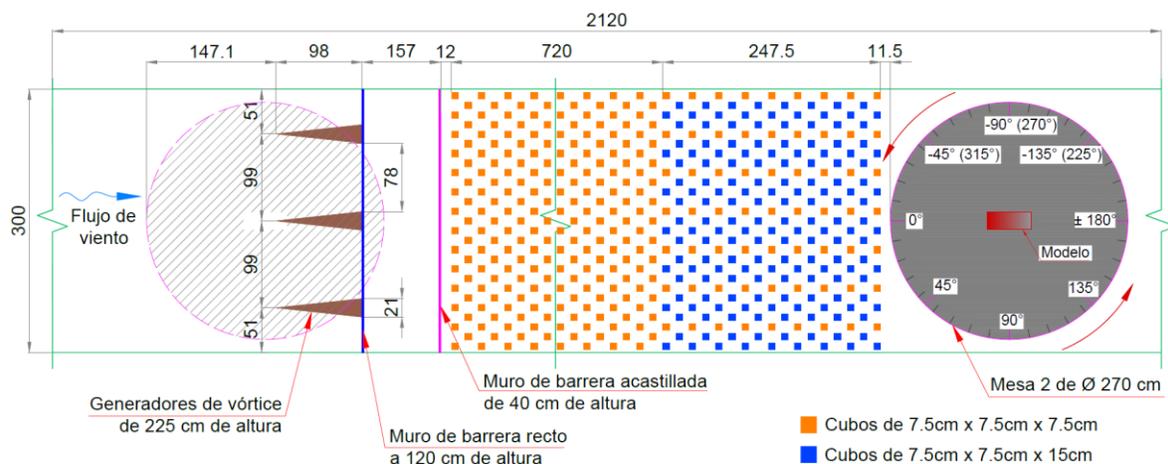


Figura 3.11 Vista en planta el arreglo para simulación de ASL Cat. 4 con método Irwin, escala 1:50

Las dimensiones de los elementos colocados a lo largo de la sección de la prueba en el túnel de viento LemAT-UNAM para la simulación de la categoría de terreno se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de dimensiones de elementos de simulación de ASL

Característica	Elementos cubo chicos	Elementos cubo altos	Espinas	Barrera
Base x Ancho x Alto (cm)	7.5 x 7.5 x 7.5	7.5 x 7.5 x 7.5	21 x 98 x 225	2.54 x 300 x 40
Longitud de elementos de rugosidad (cm)	720.0	247.50	98.0	157.0
Distancia entre centro de elementos paralelo al túnel de viento (cm)	15.0	15.0	-	157.0
Distancia entre centro de elementos perpendicular al túnel de viento (cm)	15.0	43.85	78.0	-
Número de piezas	711	167	3	2

# Capítulo 4. Diseño de pruebas experimentales en túnel de viento en cubiertas circulares aisladas

---

## 4.1 Lugar de evaluación

El lugar de evaluación de esta investigación se enfoca en la Ciudad de México debido a que son habitualmente empleadas para diversos usos. Considerando el lugar de evaluación y la clasificación de la estructura se obtuvo una categoría del terreno 4 y la velocidad regional de ráfaga de 110 km/h, que se deberán replicar en las pruebas experimentales para representar las condiciones reales.

## 4.2 Parámetros de similitud

### 4.2.1 Escala geométrica

Para los modelos en esta investigación se emplea una escala geométrica 1:50, contemplando no superar el límite de la relación de bloqueo en el (ASCE 67, 1999).

La Tabla 4.1 presenta un resumen de las relaciones de bloqueo calculadas para los modelos a estudiar.

Tabla 4.1 Relaciones de bloqueo para los modelos en el túnel de viento LemAT

Ángulo de muestreo	Área proyectada del modelo perpendicular al flujo de viento $A_m$ (m <sup>2</sup> )	Porcentaje de bloqueo (%)
0° y 180°	0.028	0.36
10° y 170°	0.040	0.51
20° y 160°	0.050	0.64
30° y 150°	0.059	0.76
40° y 140°	0.066	0.85
45° y 135°	0.069	0.89
50° y 130°	0.072	0.92
60° y 120°	0.075	0.96
70° y 110°	0.075	0.97
80° y 100°	0.074	0.95
90°	0.070	0.90

Se observa en la Tabla 4.1 que el porcentaje de bloqueo presente en las pruebas experimentales en cualquier ángulo de análisis de los modelos resulta una relación por bloqueo menor al 5%, por lo tanto, este efecto se desprecia.

#### 4.2.2 Escala de velocidades

Tomando en cuenta las recomendaciones del GIV-UNAM, se muestreo cerca de la mitad de capacidad de las revoluciones por minuto del ventilador del túnel de viento. Se utilizó la escala de velocidad 1/3 para ambos modelos.

#### 4.2.3 Escala de tiempo

La escala de tiempo es la relación de escala de velocidad entre la escala geométrica, resultando 3/50 aplicando la Ecuación 3.4.

#### 4.3 Parámetros de muestreo de la prueba experimental

Una vez que se establece el lugar de evaluación, así como la velocidad, la duración de la prueba y los parámetros de similitud, se calcula los parámetros de tiempo y frecuencia de muestreo. A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran los resultados de los parámetros para la prueba de los modelos.

Tabla 4.2 Resumen parámetros de muestro de prueba

Ciudad	Categoría del terreno	Velocidad (km/h)	$\lambda_L$	$\lambda_v$	Velocidad de muestreo (m/s)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Duración de prueba (s)
CDMX	4	110	1/50	1/3	9.66	445	45

#### 4.4 Rugosidad de la superficie

En términos de leyes de semejanza de modelos a escala, la revisión de la rugosidad en estos modelos es una limitante muy importante en las pruebas de túnel de viento. Al tratarse de una geometría circular, como lo es la cubierta, se estudia el comportamiento aerodinámico del flujo del viento que resulta ser sensible al número de Reynolds, por lo que se deben igualar las condiciones del flujo de la escala real a las condiciones en las pruebas

en el túnel. En los modelos a partir del número de Reynolds, se considera el régimen del flujo que se presenta sobre la cubierta.

En estructuras en forma circulares se debe revisar el número de Reynolds ( $Re$ ), debido a que en la literatura (Demartino & Ricciardelli, 2017; Duarte Ribeiro, 1991; Natalini et al., 2001; Niemann & Holscher, 1990), muestra que existe variación del comportamiento del flujo, debiendo presentarse en las pruebas experimentales valores del número de Reynolds mayores a  $1 \times 10^4$  pero menores a  $5 \times 10^5$ , para que las condiciones del flujo se encuentren en los regímenes de subcrítico a supercrítico, que es lo que menciona el (ASCE 49, 2021).

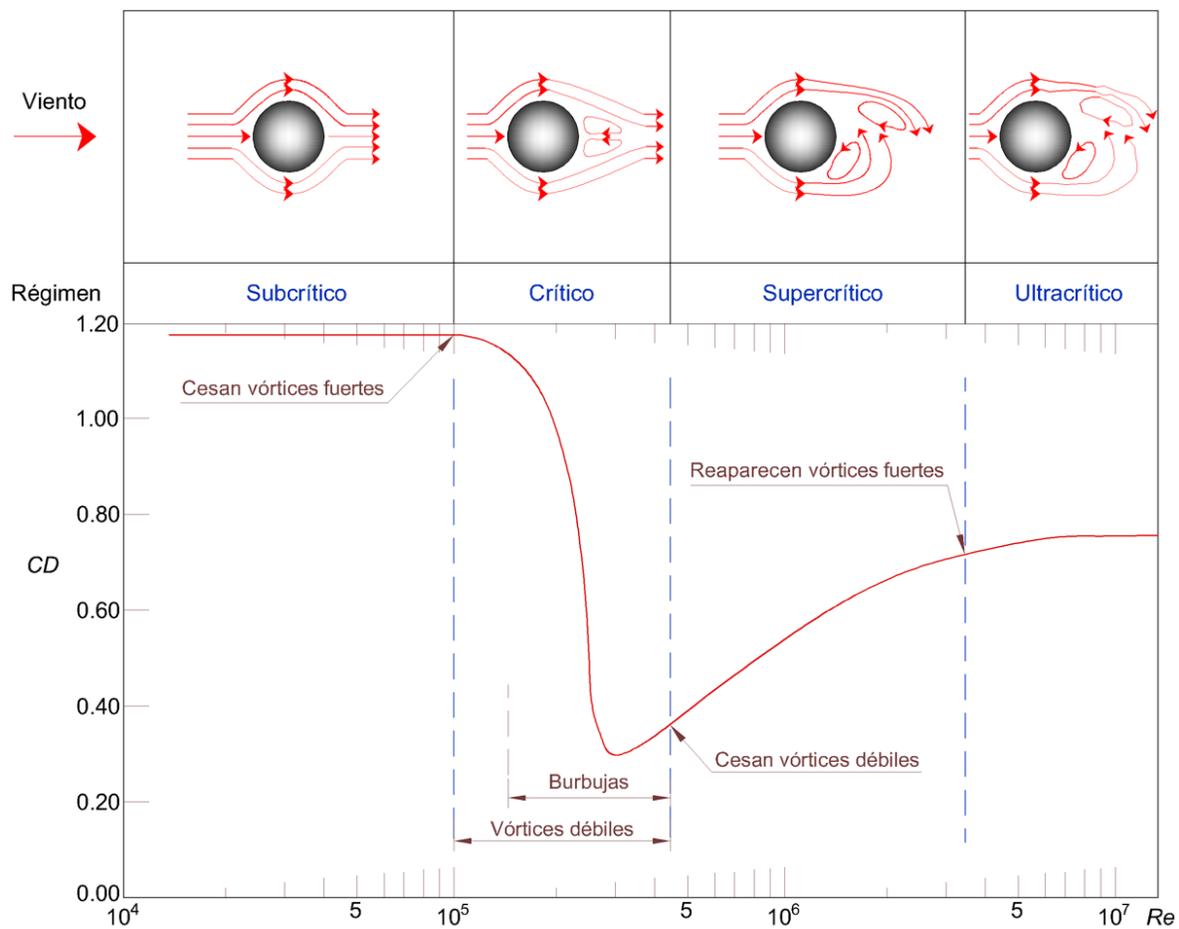


Figura 4.1 Regímenes aerodinámicos y características del flujo alrededor de un cilindro circular (Adaptado de G. C. Balbastro, 2009)

De acuerdo con la investigación de (Niemann & Holscher, 1990) para calcular la rugosidad que se presenta en una estructura circular, es a partir de la relación del radio de

curvatura de la cubierta y un equivalente a la rugosidad del grano de arena ( $k$ ), que en los modelos presentes se asoció al tamaño de los filamentos de la impresión. Para conocer el tamaño de los filamentos de la impresión se utilizó un microscopio digital marca CARSON v3.0 modelo eflex MM-840 con resolución 75x/300x, el procedimiento fue contar cuantos filamentos hay en 1 mm.

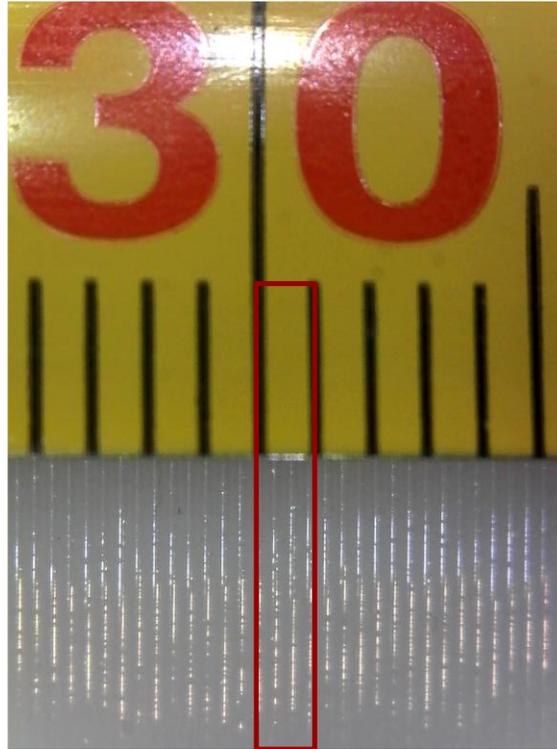


Figura 4.2 Filamentos en 1 mm en las cubiertas de los modelos a través del microscopio digital

Para obtener el número de Reynolds crítico sobre las cubiertas en los modelos se empleó la ecuación basada en experimentos superficies curvas (Niemann & Holscher, 1990).

$$\text{Re}_{\text{cubierta}} = \frac{6000}{\left(\frac{k_s}{d}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde  $k_s$  es el tamaño promedio del grano (mitad del filamento) en la cubierta y  $d$  es el doble del radio de curvatura de la cubierta.

Los valores alcanzados del número de Reynolds crítico para el modelo 1 con ángulo de curvatura de 14° fue de  $3.1 \times 10^5$  y en el modelo de 22.5° de  $3.0 \times 10^5$ . En el área de experimentación en túnel de viento que se revisaron sobre modelos de cubiertas curvas aisladas resumidos en la Tabla 2.1, los estudios de (Natalini, 2005; Natalini et al., 2001) recurren a técnicas como la adherencia de arena en la cubierta para producir la rugosidad superficial para estar por encima del régimen crítico en los intervalos del número de Reynolds, resultando de  $1.84 \times 10^5$ . En el estudio de (Ding & Uematsu, 2022) también revisan el número de Reynolds en sus pruebas, resultando un valor mayor que  $1.10 \times 10^4$  con lo cual satisface los requisitos del (ASCE 49, 2021).

Con el valor del número de Reynolds crítico en las cubiertas se puede hacer la comparativa calculando el régimen del flujo que se presenta en las pruebas, a partir del cálculo el número de Reynolds conforme al (ASCE 49, 2021).

$$\text{Re}_{prueba} = \frac{L_b \cdot U_b}{\nu} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde  $L_b$  es la altura de los modelos (0.1249 m y 0.1414 m),  $U_b$  es la velocidad promedio del viento en las pruebas ( $10 \text{ m/s}^2$ ) y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del aire ( $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

De lo anterior se afirma que las pruebas en el túnel de viento en ambos modelos si representan las condiciones de flujo a escala real; se presentan Re de  $8.27 \times 10^4$  para el modelo 1 y  $9.36 \times 10^4$  para el modelo 2, que en base a los aportes de (Simiu & Scandan, 1996) se encuentran en el intervalo de regímenes subcrítico-crítico, con lo que también se cumple con los requerimientos del (ASCE 49, 2021).

#### 4.5 Caracterización de la categoría del terreno

Una vez instalado el sistema de turbulencia en la sección del túnel de viento (Figura 4.3) para simular de la categoría de terreno como se describió en la sección 3.8 y 3.9, se calcula el perfil de velocidad media asociado a la categoría de terreno urbana. Por medio de un ajuste de mínimos cuadrados se obtiene el mejor ajuste para el perfil de la simulación en el túnel de viento (Amaya Gallardo et al., 2019).

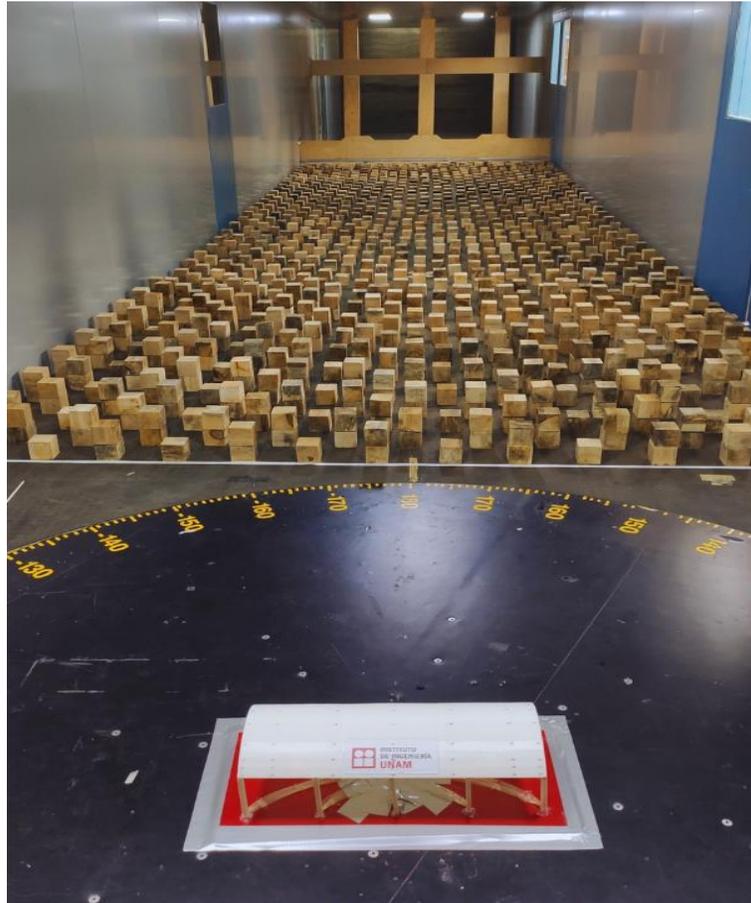


Figura 4.3 Dispositivos de rugosidades para caracterizar Cat. 4 en túnel de viento LemAT del II – UNAM

Para realizar los ajustes se empleó la ecuación de potencia, la ley de potencia no tiene una base teórica, pero resulta en una herramienta que integra fácilmente las características de una categoría de terreno a altura de referencia, una propiedad conveniente cuando se desea obtener el perfil medio del viento de una categoría de terreno (Holmes, 2015) la ley de potencia se puede escribir como:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 4.3}$$

donde  $\bar{U}_{ref}$  es la velocidad a la altura de referencia en km/h,  $z$  es la altura a la que se requiere conocer la velocidad y  $z_{ref}$  es la altura de referencia (normalmente 10 m).

La intensidad de turbulencia también es un parámetro por considerar en la caracterización de una categoría de terreno. La intensidad de turbulencia se puede definir como una medida de la magnitud de la velocidad turbulenta comparada con la velocidad media a la misma altura.

Con fines de diseño, códigos emplean la función basada en la ley logarítmica (Holmes, 2015) para calcular la intensidad de turbulencia asociada a la altura.

$$I_u(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos de la simulación experimental.

Tabla 4.3 Parámetros de la simulación de un terreno categoría 4

Parámetro	Resultado
Potencia de perfil medio del viento ( $\alpha$ )	0.26
Escala de modelos	1:50
$I_v$ Modelo 1 (12.49 cm)	0.399
$I_v$ Modelo 2 (14.14 cm)	0.403

La Figura 4.4 muestra el perfil de velocidad media obtenido en la caracterización del terreno y su comparación con el perfil del (MDOC-V, 2020). En la calibración de los perfiles se emplearon 5 repeticiones con la misma configuración de los dispositivos de rugosidades para ver la repetitividad de los datos obtenidos. Se observa que los resultados de los perfiles de velocidad media obtenidos son consistentes en las repeticiones y a la altura de los modelos se ajusta a la los indicados en el (MDOC-V, 2020) con  $\alpha=0.26$ .

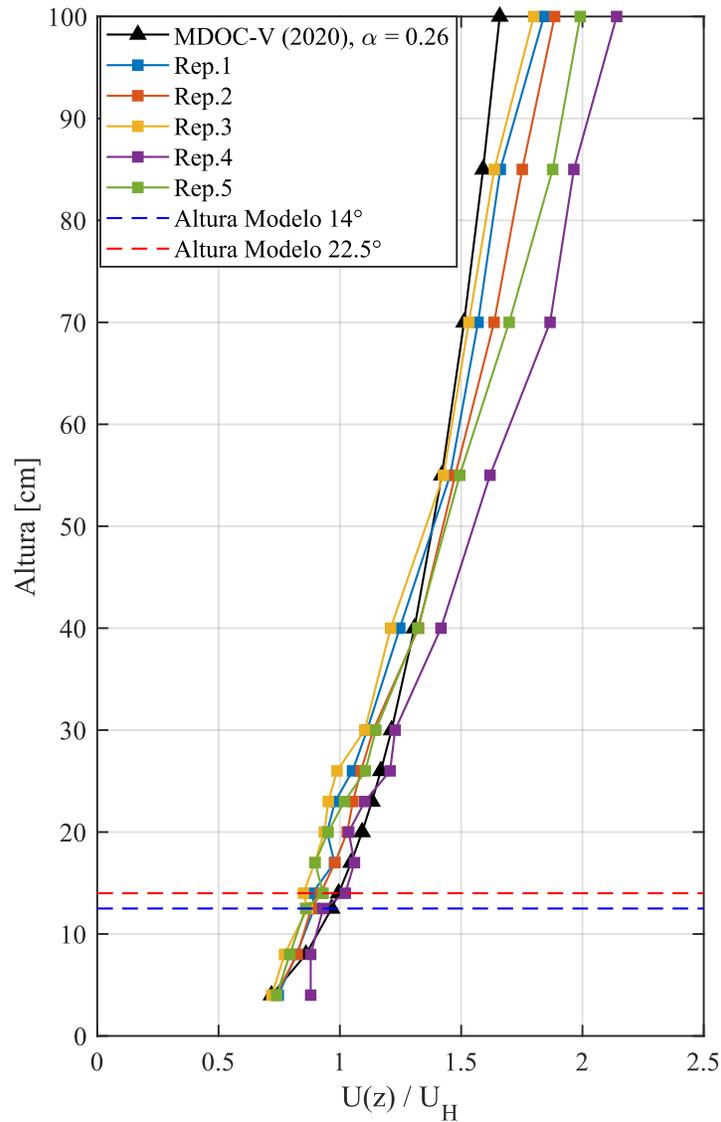


Figura 4.4 Perfil de velocidades del viento medido; categoría de terreno tipo 4

En la Figura 4.5 se muestra el perfil de intensidad de turbulencia caracterizando un terreno urbano tipo 4, se compara los resultados obtenidos de las repeticiones con otros perfiles indicados en la literatura (MDOC-V, 2020), (AS/NZS 1170.2, 2011) y (ESDU 85020, 2001), se puede observar que los perfiles en las pruebas se encuentran en los intervalos de los códigos, mostrando un mejor ajuste al (ESDU 85020, 2001), por lo que se considera que la simulación de una categoría tipo 4 es adecuada.

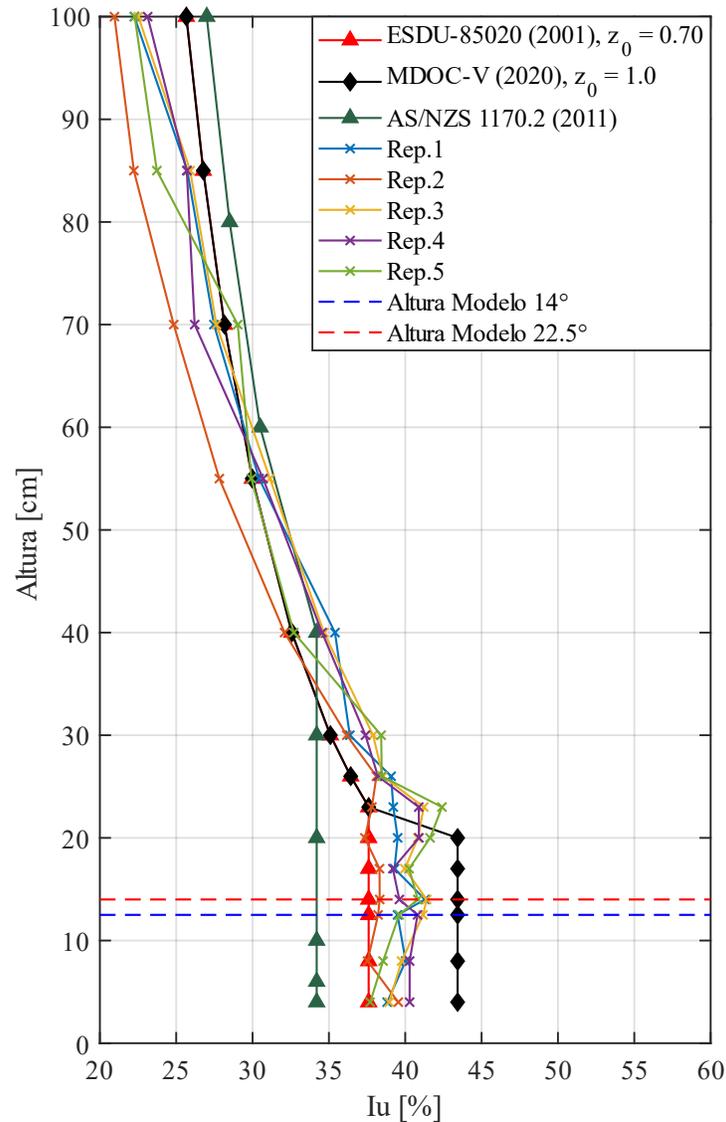


Figura 4.5 Perfil de intensidad de turbulencia del viento; categoría de terreno tipo 4

En este apartado solo se muestra la calibración final que se adoptó como adecuada con base en las aproximaciones con la literatura mostrada en las gráficas anteriores, pero es importante mencionar que para llegar a estas aproximaciones tanto en el perfil de velocidades como en el de turbulencia, se hizo un arduo trabajo en caracterizar un terreno tipo 4. Para aproximarse a intervalos de turbulencia que esta categoría demanda, se hizo un total de 27 propuestas de distintos arreglos de los dispositivos de rugosidades.

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Capítulo 5. Construcción del modelo experimental

---

### 5.1 Características generales de los modelos a escala

La geometría de los modelos del presente estudio se propuso a partir de las dimensiones frecuentemente empleados en escuelas de la Ciudad de México para techar espacios deportivos (Pozos Estrada et al., 2020), empleando un promedio de dimensiones en planta de 10 m x 25 m, y una altura de las columnas de 5 m medida a partir del nivel de piso terminado a la altura inferior del alerón de la cubierta curva a escala real. Es importante mencionar que se estudiaran dos diferentes ángulos de inclinación del arco que, de acuerdo con el MDOC-V (2020), el ángulo de inclinación del arco es el que corresponde a la secante del arco que une el punto de la cumbrera con el punto de arranque, con la finalidad de saber si existe un cambio significativo en los coeficientes de presión cuando se varía el ángulo de inclinación del arco, de esta manera, se podría determinar si es conveniente construir cubiertas con arco alto o bajo en esta tipología de estructuras.

Los modelos experimentales se construyeron a una escala geométrica de 1:50 como se mencionó en el Capítulo 4, resultando con dimensiones en planta de 20 cm en la dirección corta, 50 cm en la dirección larga y una altura de las columnas de 10 cm medida a partir de base al alerón de la cubierta; soportada por un total de 10 columnas con sección transversal de 11 mm x 7 mm para ambos modelos. En el caso del primer modelo se contempla un ángulo de inclinación del arco de 14° como se muestra en la Figura 5.1(a), dando como altura máxima de arco de 2.49 cm. En la Figura 5.1(b) se contempla un ángulo de 22.5° que resulta 4.14 cm de altura máxima de arco al centro del claro (Modelo 2).

Tabla 5.1 Resumen general de modelos de estudio

Modelo	Cantidad y ubicación de sensores	Dimensiones (cm)				$\beta$ (°)	Relaciones		
		W	L	H	V		V/W	V/H	L/W
Modelo 1	59 (intradós) 59 (extradós)	20.0	50.0	10.0	2.49	14.0	0.13	0.25	2.50
Modelo 2	59 (intradós) 59 (extradós)	20.0	50.0	10.0	4.14	22.5	0.21	0.41	2.50

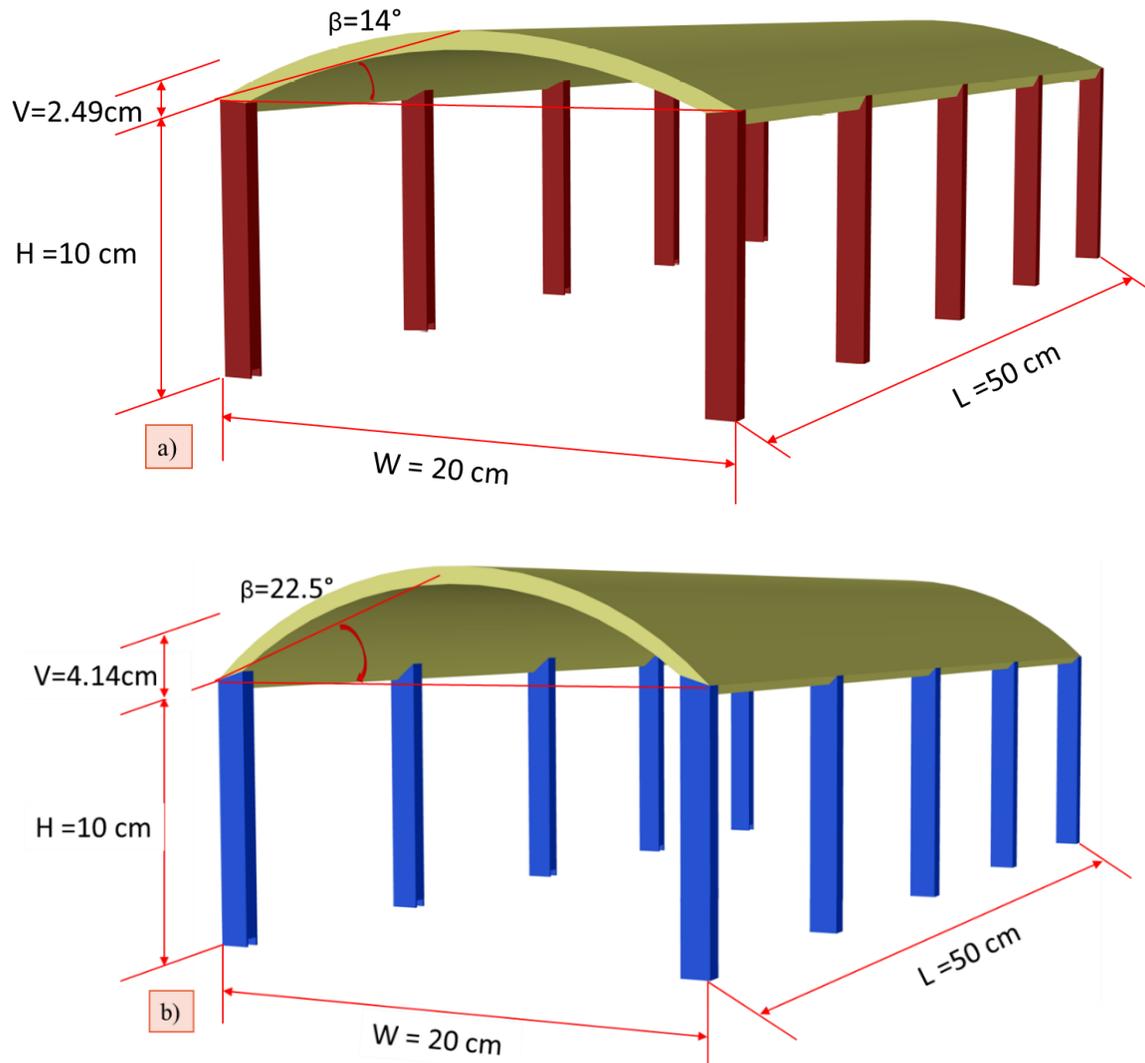


Figura 5.1 Dimensionamiento de modelos para pruebas en túnel de viento: a) Modelo de 14°; b) Modelo de 22.5°

## 5.2 Fabricación de los modelos

La fabricación de los modelos experimentales se elaboró a base de material de resina ABS de 1 mm de espesor de pared; este espesor es suficiente para garantizar que los modelos no tendrán deformaciones durante las pruebas que pueda afectar la respuesta. Se considera de resina ABS debido a que el propósito es muestrear la distribución de presiones en los modelos rígidos con el fin de obtener las presiones que actúan en la estructura.

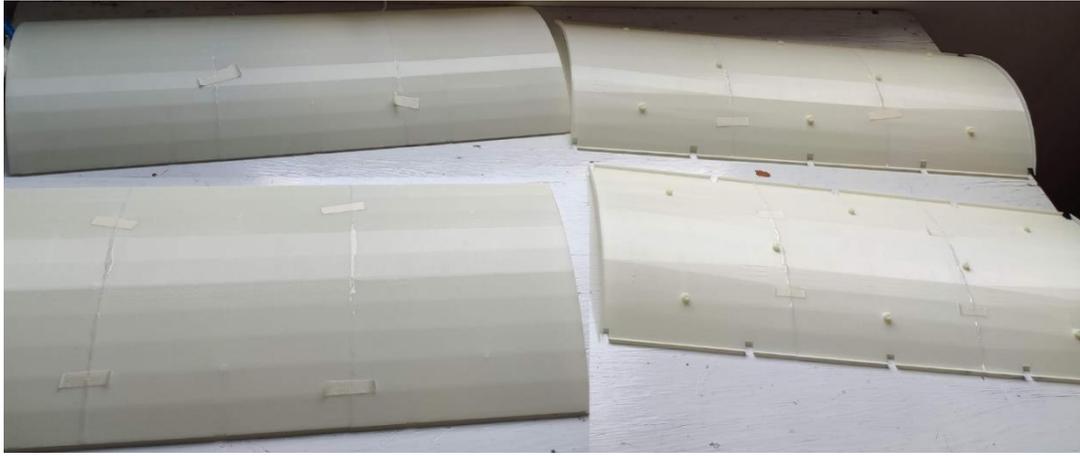


Figura 5.2 Modelos fabricados en ABS (Impresión 3D)

Para la impresión de los modelos en 3D, se planificó un habilitado de las tomas de presión por el interior de los modelos; contando con una cubierta superior e inferior, realizando un ensamble tipo “sándwich” como se muestra en la Figura 5.3, con el objetivo que al realizar las pruebas experimentales en el túnel de viento las mangueras no influyan en el comportamiento del viento al fluir sobre la estructura. Para el habilitado de las columnas, estas se diseñaron huecas y cuentan con una ranura en la parte inferior, para que los sensores puedan pasar por el interior de las columnas y salir libremente hacia el centro de la mesa giratoria.

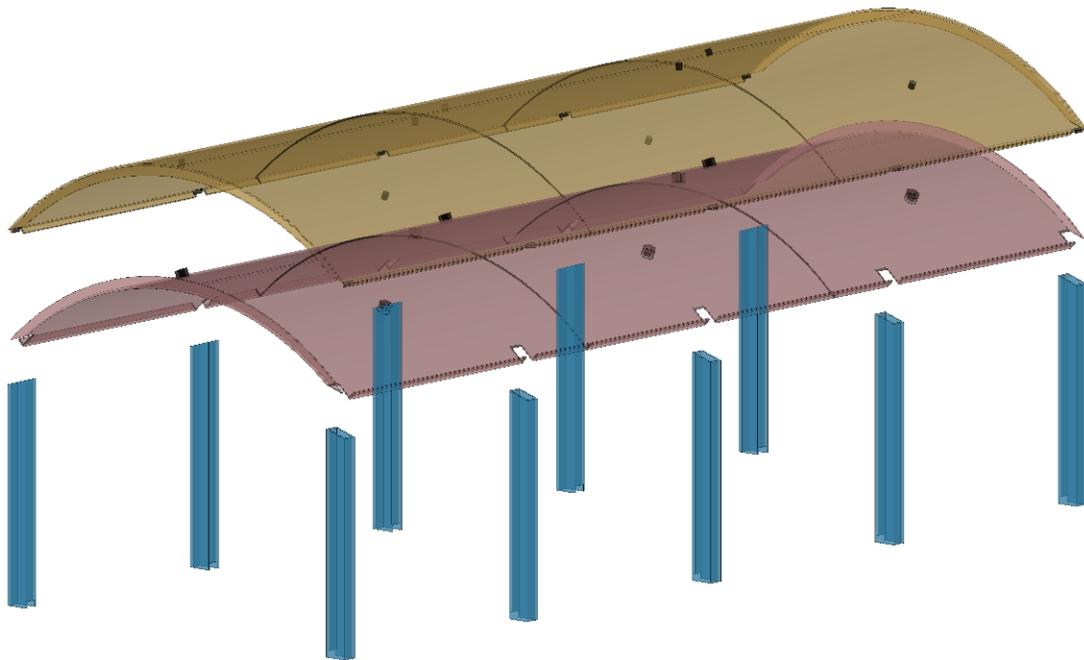


Figura 5.3 Despiece de los modelos experimentales

### 5.3 Habilitado de tomas de presión

Para optimizar el material disponible de mangueras de uretano de 1.6 mm de diámetro, se realiza el despiece de longitud de manguera necesaria a utilizar desde el punto de toma de presión en la cubierta hasta los dispositivos de medición de presión “Zoc”. Se consideraron en total 118 tomas de presión (59 tomas sobre la cara cóncava y 59 sobre la cara convexa) distribuidos en 7 anillos; de los cuales 5 anillos cuentan con 9 tomas (4 anillos ubicados en los extremos en la dirección larga de la estructura y el restante en la parte central) y los anillos restantes con 7 tomas.

La distribución anterior se realizó considerando que en la literatura se reporta que las zonas críticas en las que se presentan los mayores valores de coeficientes de presión se observan en los bordes de la nave industrial ocasionados por el desprendimiento de vórtices.

El arreglo en forma de anillos se hace considerando que se quiere conocer el comportamiento de los coeficientes de presión en el desarrollo de la curvatura de las cubiertas. En el apartado de resultados se comparan por medio de graficas de cajas los valores obtenidos para los anillos que se mencionan, enfocando los resultados principalmente en dos anillos. El anillo “central” está definido por las tomas de presión; del 24 al 36 en la parte externa de la cubierta y del 85 al 93 por la parte interna. El anillo “externo” se definió por las tomas de presión; del 51 al 59 en la parte externa y del 110 al 118 por la parte interna de la cubierta.

Se realiza la propuesta de ambos modelos de los puntos en donde se desea conocer las presiones en las cubiertas, para nuestro caso particular el número de tomas nos lo limitó la cantidad de mangueras que era posible introducir por el interior de las columnas. La Figura 5.4 muestra el arreglo de perforaciones del modelo 1 (14° de arco) y del modelo 2 (22.5° de arco).

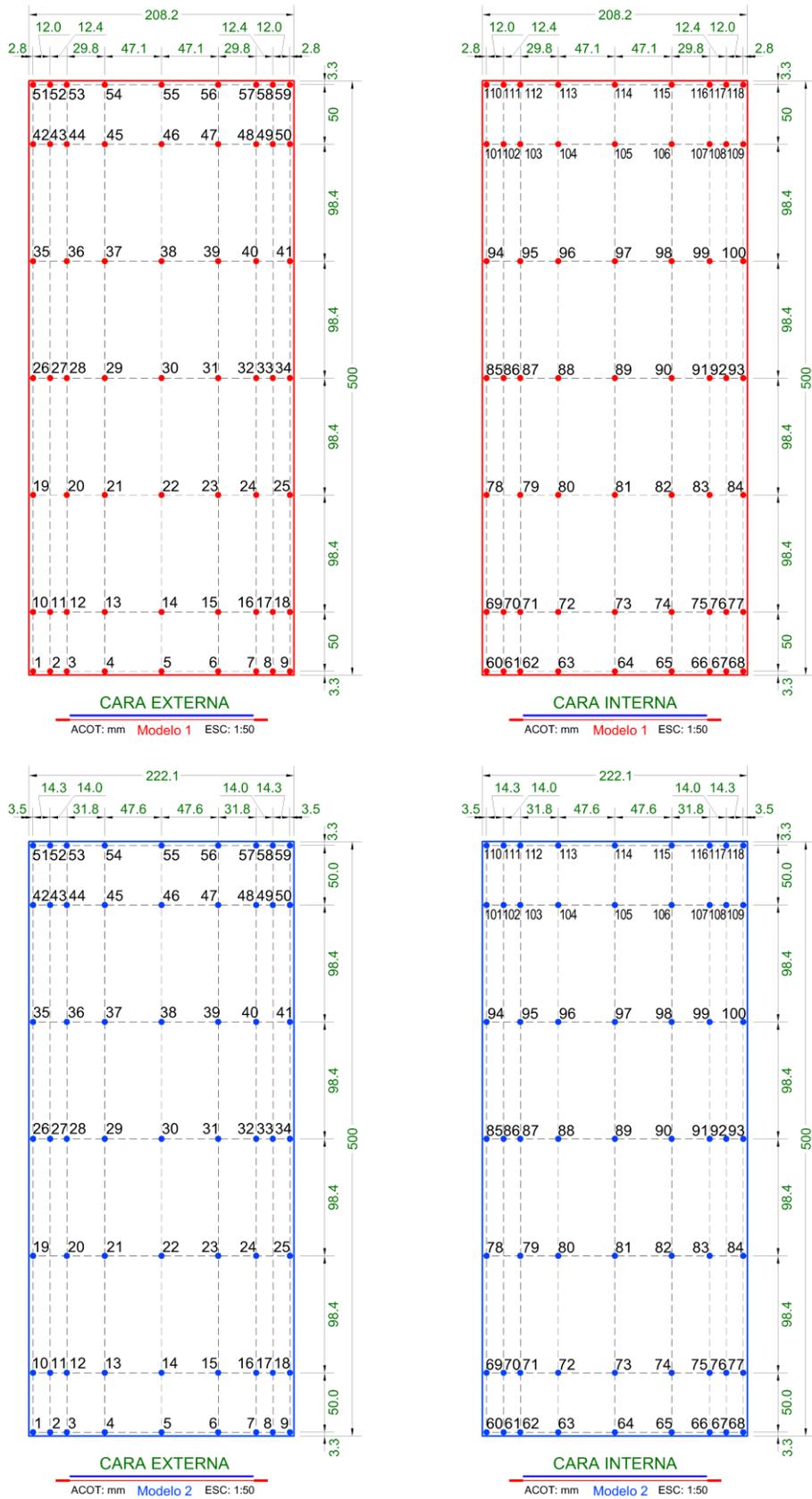


Figura 5.4 Distribución de tomas de presión: Modelo 1 ( $\beta=14^\circ$ ); Modelo 2 ( $\beta=12.5^\circ$ )

Los modelos fueron perforados empleando una broca de 1.59 mm (Figura 5.5) con la finalidad que al pasar las mangueras de uretano de 1.6 mm de diámetro, las tomas de presión ya habilitadas quedarán un poco ajustadas evitando que se salieran de las perforaciones al continuar colocando las mangueras restantes.



Figura 5.5 Perforación de las cubiertas con broca de 1.59 mm

El proceso del habilitado de las mangueras consistió en fijar todas mangueras de uretano en cada toma de presión con pegamento preparado a base de silicón frío y resina de acrílico en proporción 1:1, para un adecuado pegado de las mangueras se deja secar un lapso de 24 horas (Figura 5.6).

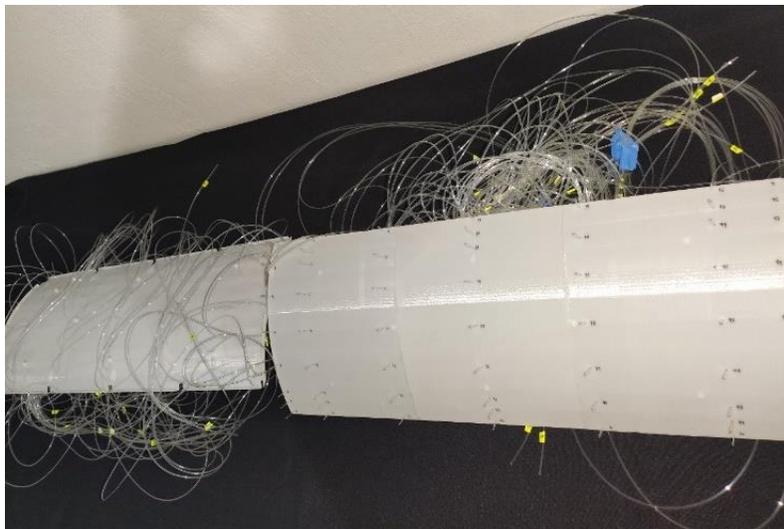


Figura 5.6 Secado y habilitado de mangueras en ambas cubiertas

Con la finalidad de pasar las tomas de presión por el interior de las columnas se realiza un arreglo de mangueras haciendo un par de consideraciones importantes (Figura 5.7). La primera consideración es que la longitud de las mangueras sea el menor posible para no desperdiciar de material.

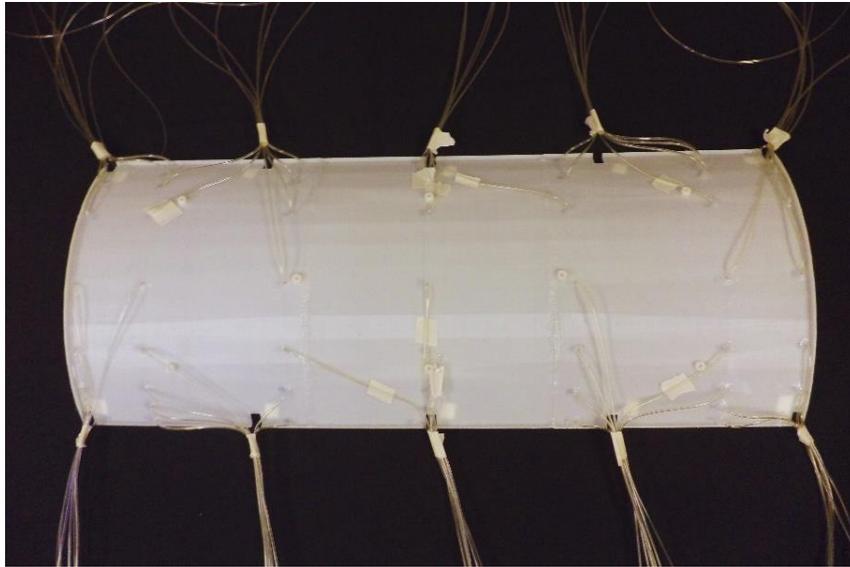


Figura 5.7 Acomodo de mangueras en el interior de las cubiertas

La segunda consideración es que el recorrido de las mangueras sea lo más fluido posible, es decir, que se evite muchos dobleces que en algún momento del proceso de ensamble de ambas cubiertas (Figura 5.8) con las columnas se fueran a tapar los conductos.



Figura 5.8 Ensamble de las cubiertas con arreglo de mangueras por columna

Una vez ensambladas ambas caras de la cubierta, se pasaron las mangueras por el interior de las columnas para proceder con el pegado de cada elemento que constituye el modelo. Antes que se secara el pegamento, se alinearon las columnas de cada lado con soleras y cinta “*masking tape*”; esto permitió conservar la verticalidad de las columnas durante el fijado en una base de madera para su fácil transportación al túnel de viento (Figura 5.9).



Figura 5.9 Proceso alineación de columnas y secado de la fijación de las mangueras en la cubierta

Finalmente, cuando se termina con el proceso de habilitado de las tomas de presión en el modelo se recortan los sobrantes a nivel de cubierta. En la Figura 5.10 se observan estos sobrantes de manguera; se dejaron de 2 cm en la parte externa de las caras de las cubiertas para evitar la posibilidad que el pegamento se introduzca dentro de las mangueras.

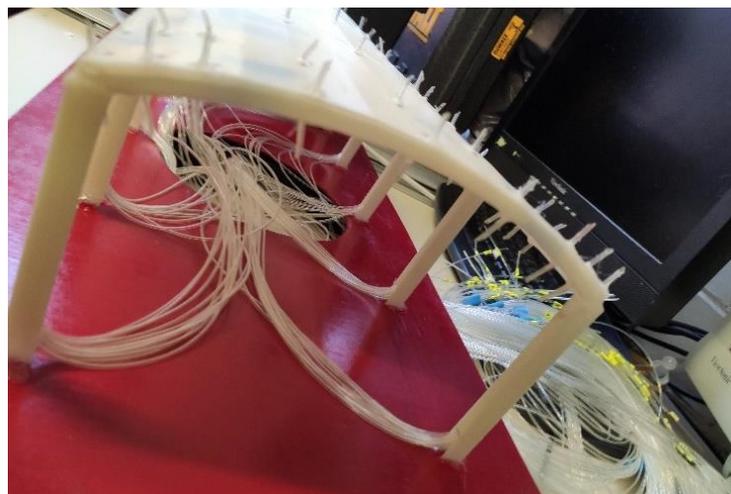


Figura 5.10 Recorte del sobrante de manguera y fijado en base de madera

A continuación, se muestra el Modelo 1 (Figura 5.11) y el Modelo 2 (Figura 5.12) culminados del proceso del habilitado de las tomas de presiones para proceder a la etapa de la instrumentación en el túnel de viento.



Figura 5.11 Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ ) finalizado de la etapa de construcción

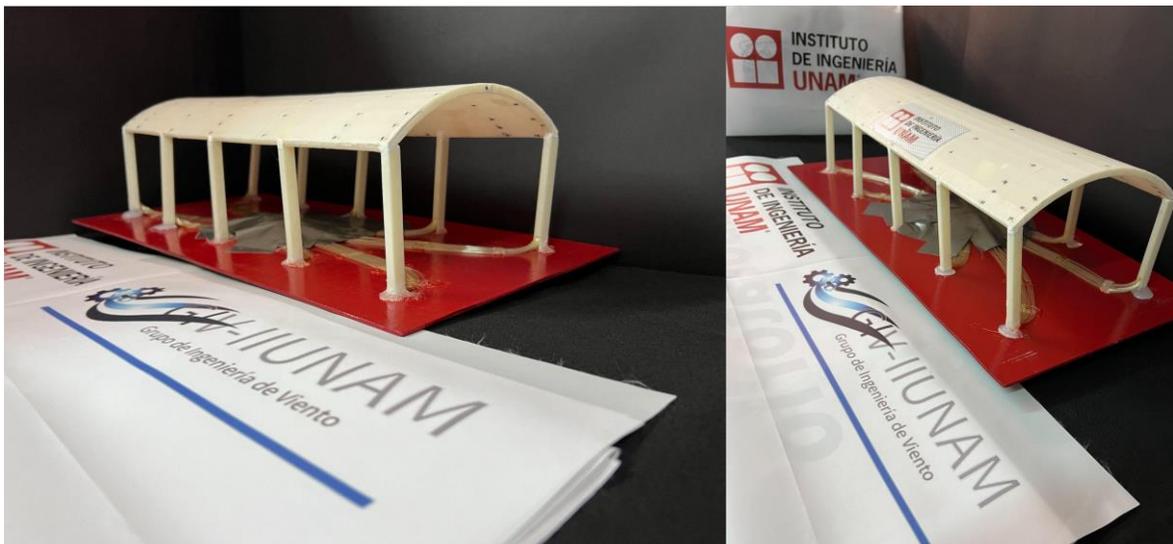


Figura 5.12 Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ ) finalizado de la etapa de construcción

#### 5.4 Instrumentación del modelo experimental

La instrumentación implica conectar cada toma de presión del modelo con cada medidor de presión “Zoc”. Previamente se etiquetaron cada manguera de los modelos con los números correspondientes de acuerdo con el arreglo de la Figura 5.4, lo que simplifica este proceso dentro del el túnel de viento. En la Figura 5.13 ilustra el proceso de conectar las tomas de presión del modelo.



Figura 5.13 Instrumentación con sensores de presión

Una vez finalizada la instrumentación del modelo, se lleva a cabo una revisión de cada uno de los puntos de medición de presión. Esto se realiza activando el ventilador del túnel de viento y comprobando que los registros de presión sean consistentes. Con ayuda de expertos del GIV-UNAM se verificaron la calidad de las mediciones de presiones, adicionalmente se corrobora que las conexiones asignadas son correctas y que no haya fugas en el sistema de tuberías.

La técnica de medición que se emplea en las pruebas de los modelos rígidos es la integración de la presión, en la cual se permitirá la integración de las mediciones de la presión de superficie procedentes de varios puntos sobre una estructura para determinar los efectos medios y variables en el tiempo de la carga del viento. (ASCE 49, 2021).

Una vez completadas las verificaciones mencionadas, se procede a asegurar el modelo con cinta en su posición inicial de muestro ( $0^\circ$ ) al centro de la mesa en el área de pruebas, el aseguramiento se hace para que el modelo permanezca estático durante toda la etapa de muestro, como se ilustra en la Figura 5.14.

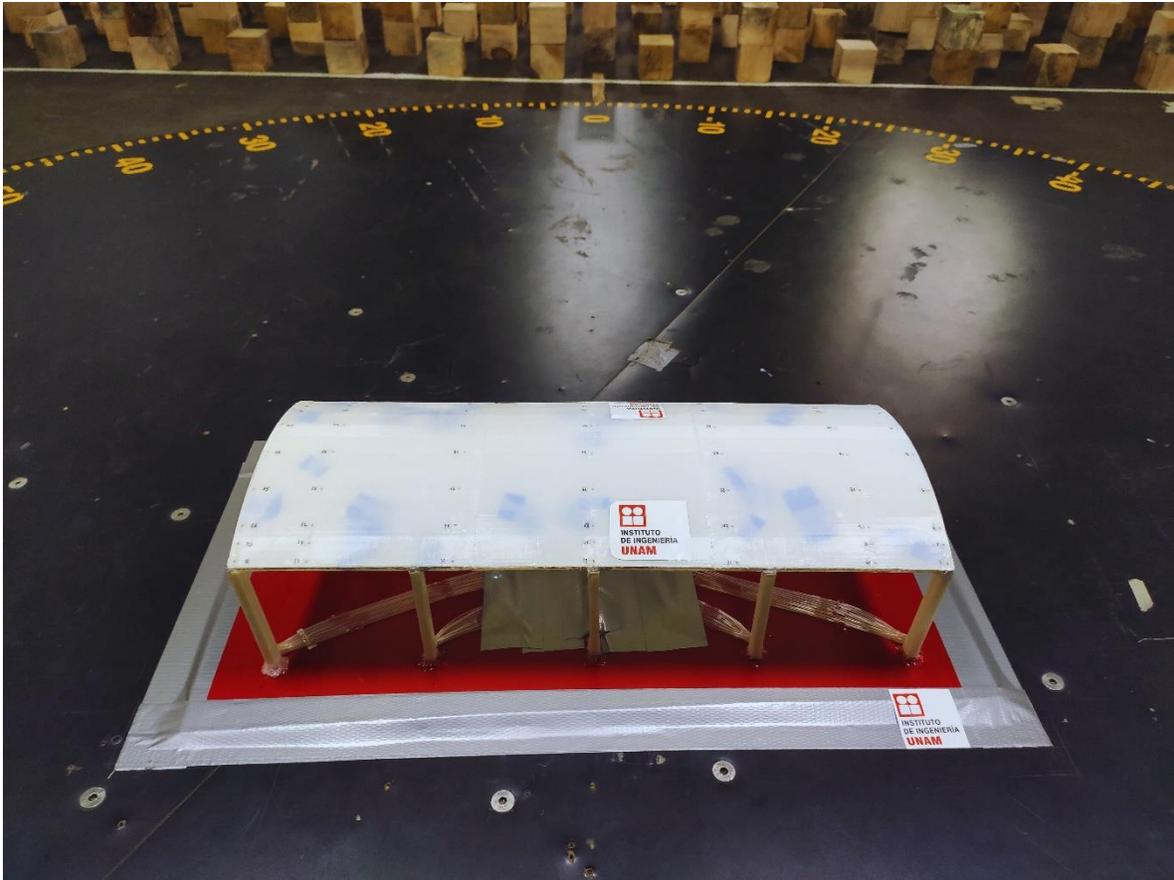


Figura 5.14 Fijado del modelo de 1 en la mesa giratoria del túnel de viento LemAT-UNAM

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Capítulo 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

---

Una vez que se llevó a cabo la instrumentación de los modelos, pero previo al inicio de las pruebas de los modelos, se instaló el tubo Pitot a la altura de referencia de los modelos, el cual permite registrar la presión estática y la presión total, que son necesarios para el cálculo de los coeficientes de presión netos.

Se llevó a cabo la calibración del sistema de adquisición de presiones en el túnel de viento, esto requirió poner en funcionamiento el intercambiador de calor, el sistema de regulación de presión de los transductores de presión, activar la mesa giratoria y cerrar completamente las secciones de pruebas para que no haya variación de presiones en el sistema durante el muestreo. La Figura 6.1 muestra la ubicación del modelo experimental dentro del túnel de viento.

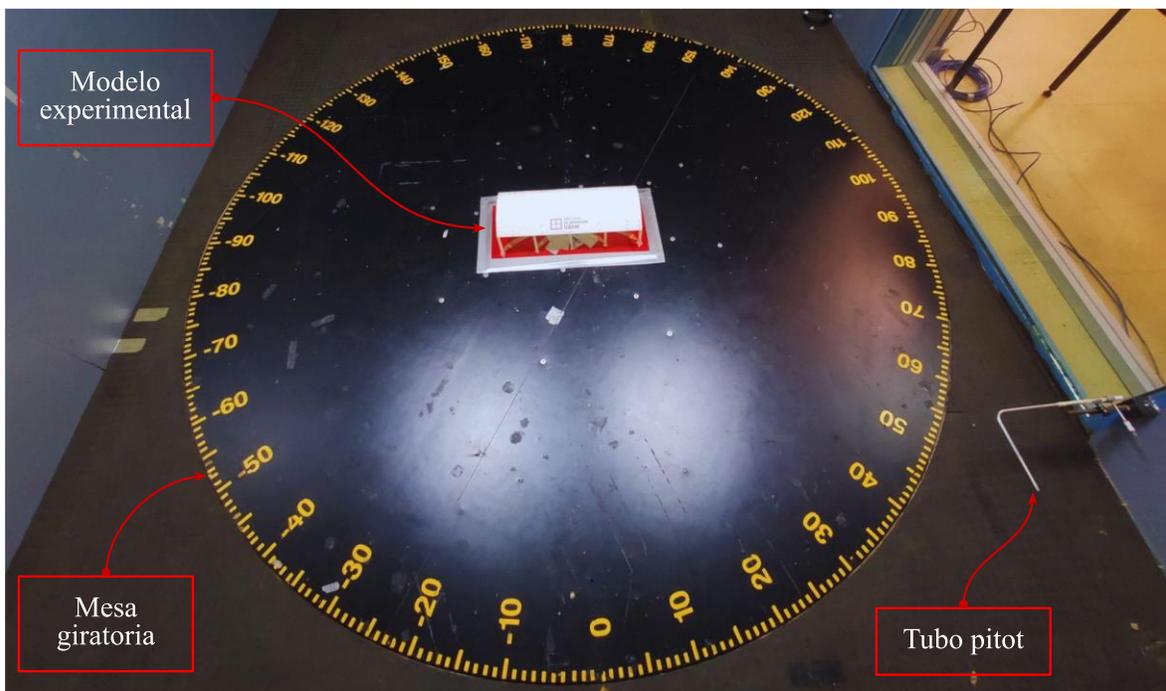


Figura 6.1 Instrumentación de modelos en sección de pruebas

La calibración se realizó utilizando el programa de registro FLOPAC, como se muestra en la Figura 6.2. En el equipo de cómputo, se configuró el programa de registro con la frecuencia de muestreo y las unidades de medida (en Pascales) que se utilizarían, se gira

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

periódicamente la mesa giratoria y se verifica las lecturas obtenidas con asesoría de los expertos del GIV-UNAM.

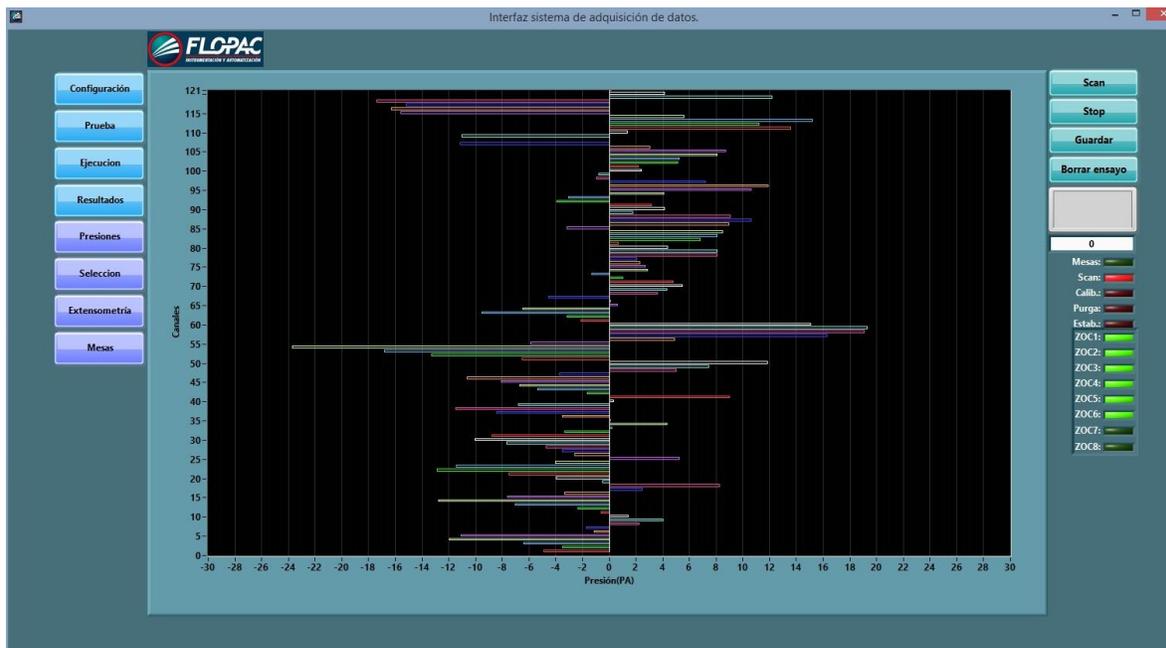


Figura 6.2 Interfaz del programa de registro FLOPAC (Adquisidor de presiones)

El mismo programa de registro se emplea durante las pruebas para las mediciones de presiones en los modelos. Para cada modelo se muestreó un total de 10 veces bajo los mismos parámetros de muestreo, con el fin de observar la repetibilidad de las mediciones como comprobación de la instrumentación.

Se controlaron los intervalos de muestreo mediante un temporizador y se ajustó el ángulo de incidencia del viento desde el panel de control de las mesas; analizando un total de 21 ángulos de incidencia, incrementando  $10^\circ$  el ángulo entre cada dirección de análisis, contemplando de igual manera los ángulos de  $45^\circ$  y  $135^\circ$  hasta concluir con la dirección a  $180^\circ$ .

Los modelos se muestrearon desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$  debido a la simetría de los modelos y del arreglo de las tomas de presión en la cubierta. La Figura 6.3 muestra algunos ángulos de incidencia en túnel de viento como:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $150^\circ$  y  $170^\circ$ .

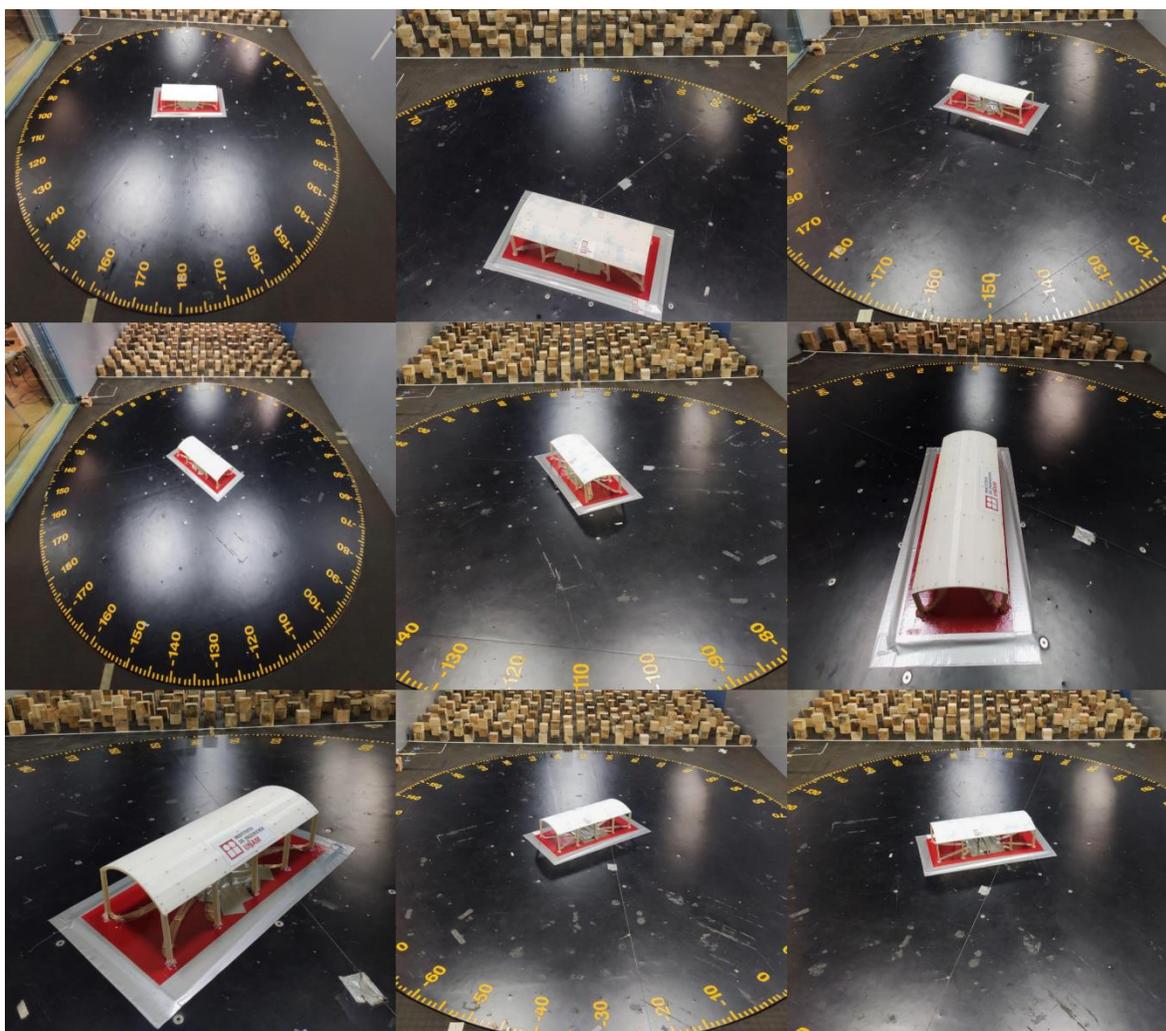


Figura 6.3 Algunos ángulos de incidencia en túnel de viento.

Se desarrollaron códigos en MATLAB (2022) para facilitar el tratamiento de datos debido a la gran magnitud de número de datos. Se registraron alrededor de 20,000 datos de cada toma de presión, considerando que se analizaron 21 ángulos y se repitieron 10 veces cada prueba para ambos modelos.

El producto final es la obtención de los coeficientes de presión netos, los cuales se calcularon con la Ecuación 6.1.

$$Cp_{neta} = \frac{(P_{tap(sup)} - P_{est}) - (P_{tap(inf)} - P_{est})}{P_{total} - P_{est}} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

donde  $P_{tap(sup)}$  es la presión registrada en el tap correspondiente en la parte superior de la cubierta,  $P_{tap(inf)}$  es la presión registrada en el tap en la parte inferior de la cubierta

correspondiente a la posición del tap superior,  $P_{est}$  y  $P_{total}$  es la presión estática y la presión total, respectivamente, registrada por el tubo Pitot.

En la Figura 6.4 se muestra un ejemplo de las historias en el tiempo de coeficientes de presión que se obtuvieron con la Ecuación 6.1 para cada toma de presión en el modelo; los resultados en este estudio se presentan en términos de coeficientes de presión neta ( $C_{pn}$ ).

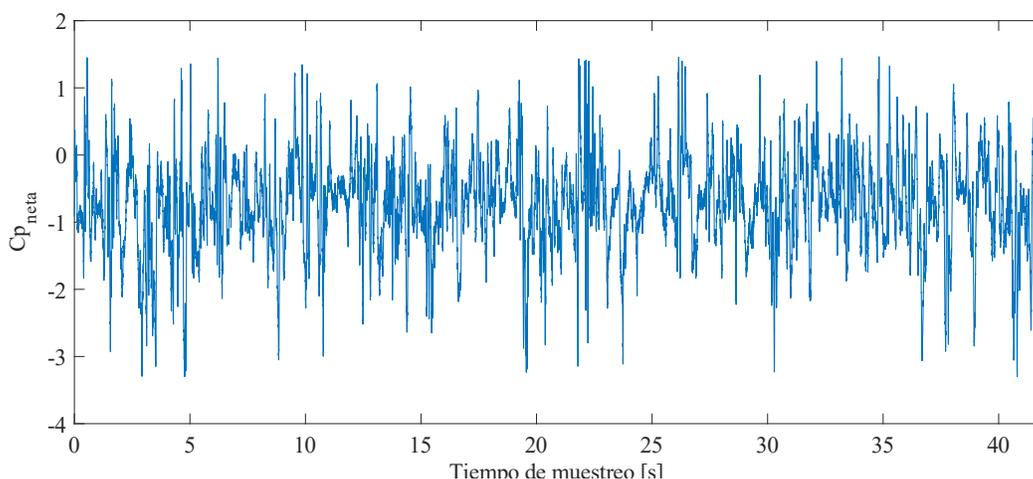


Figura 6.4 Historia en el tiempo de coeficientes de presión

Debido a la geometría de la estructura estudiada existe una interacción de presiones del viento en la cara cóncava y convexa de la cubierta, las cuales se relacionan entre sí con la obtención de coeficientes de presión neta (Holmes, 2015), por ello debe considerarse la variación de la dirección del viento en las presiones internas al igual que las externas para el diseño de estas estructuras.

### 6.1 Análisis de los resultados obtenidos

Para cada prueba realizada se obtuvieron 21 historias en el tiempo de coeficientes de presión, de los cuales se obtuvieron; coeficientes de presión máximos, medios y mínimos en cada uno de los sensores instrumentados en cada modelo, cantidad que corresponde a cada uno de los ángulos de incidencia analizados por prueba. Debido a la gran cantidad de información, se presentarán los resultados que son más relevantes para los fines de esta investigación por medio de gráficas de contorno realizadas en MATLAB (2022) con el fin de interpretar los resultados en su totalidad y de manera visual.

En el Anexo A se presentarán las gráficas de contorno para cada ángulo de incidencia del Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ ) y en el Anexo B del Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ ).

### 6.1.1 Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ )

Con ayuda de MATLAB (2022) se complementó el análisis de los resultados al realizar una interpolación entre los coeficientes de presión de las ubicaciones de la cubierta sin instrumentar, creando superficies curvas en las cuales se ajustan los intervalos de los coeficientes de presión de cada gráfica, permitiendo observar de manera gráfica la distribución de los coeficientes de presión en la superficie del modelo para que se distingan las zonas en presión y succión.

En la Figura 6.5 se muestran los coeficientes de presión neta medios obtenidos de las pruebas, cuando  $\theta=0^\circ$  se observa que las presiones se concentran a  $L/10$  de cada extremo, pero solo en la parte cercana al flujo de viento, mientras que la mayoría de cubierta se mantiene en succiones.

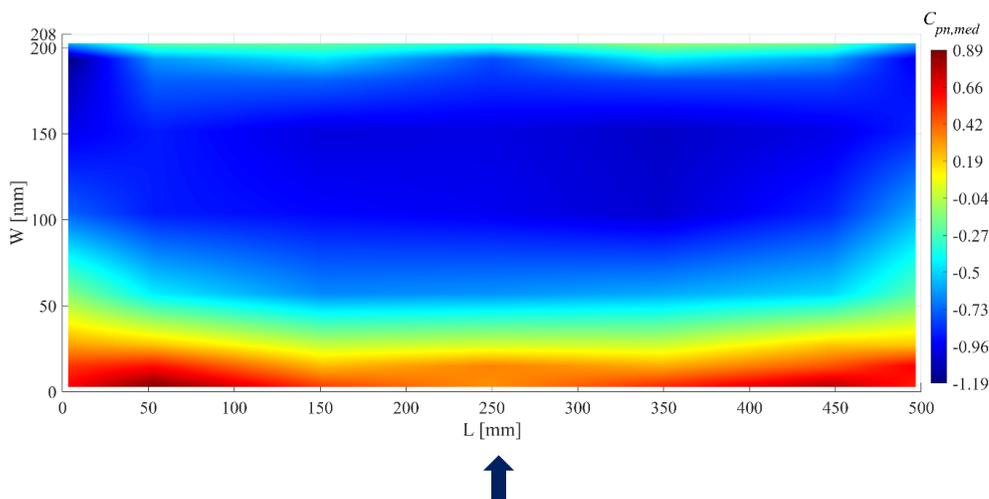


Figura 6.5 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 0^\circ$

La Figura 6.6 muestra la distribución de los  $C_{pn}$  cuando en ángulo de análisis es de  $45^\circ$ , en la cual el patrón de comportamiento del viento se parece a la observada en la Figura 6.8 que es cuando  $\theta=150^\circ$  pero con valores de  $C_{pn}$  más bajos. Las zonas con succión se presentan luego a todo lo largo de la cubierta después de la distancia  $W/5$ .

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

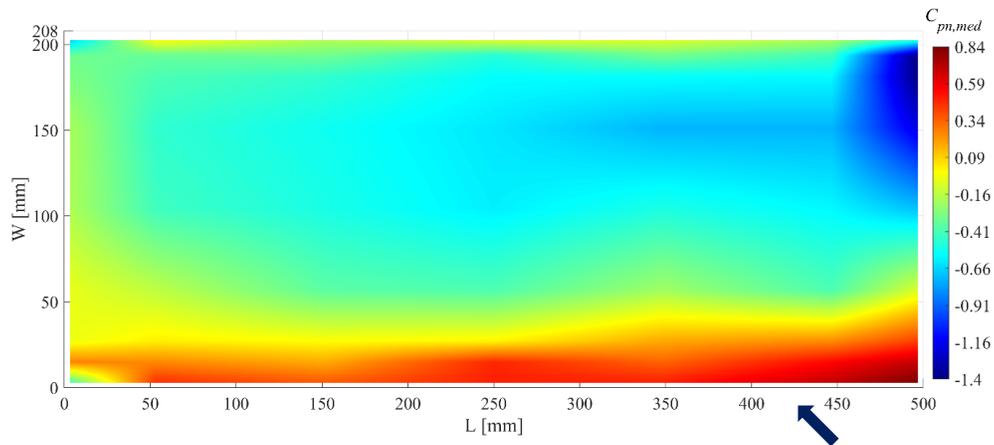


Figura 6.6 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 45^\circ$

La Figura 6.7 muestra los coeficientes de presión neta medios para  $\theta=90^\circ$  y la Figura 6.8 para  $\theta=150^\circ$ .

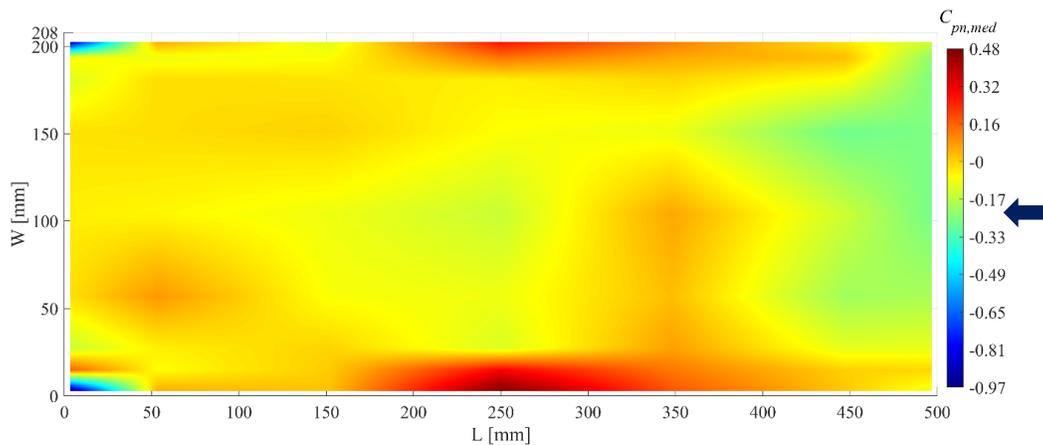


Figura 6.7 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 90^\circ$

Cuando el ángulo de incidencia es paralelo a la curvatura de la cubierta ( $\theta=90^\circ$ ), gran parte de toda la cubierta se mantiene en succiones bajas, pero observamos de manera particular que a la mitad de la cubierta en los laterales se presenta un aumento de las presiones, también muestra unas zonas pequeñas en las esquinas más alejada al flujo de viento en la cuales hay altas succiones concentradas localmente.

La Figura 6.8 muestra los coeficientes de presión neta medios para  $\theta=150^\circ$ .

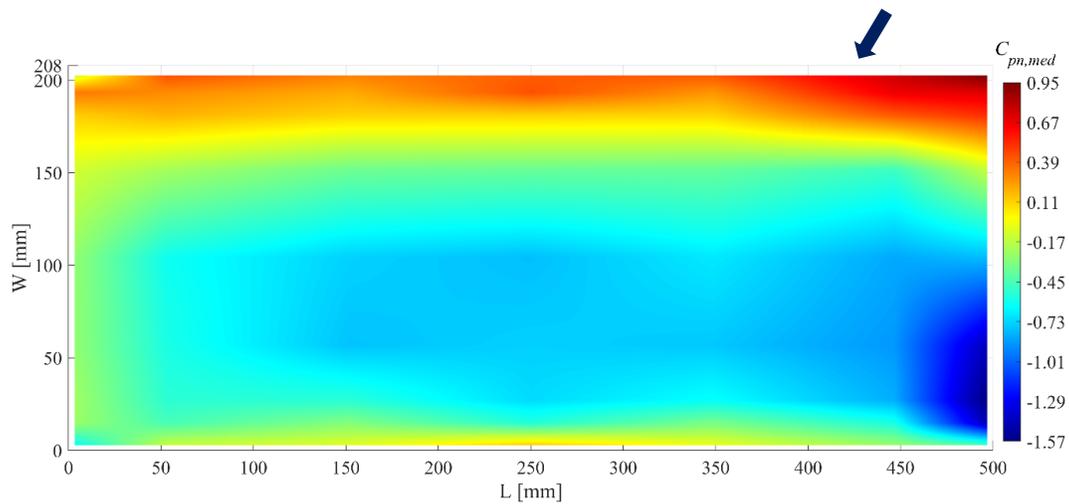


Figura 6.8 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 150^\circ$

En los coeficientes medios más desfavorables presentes en el Modelo1 resultó para el ángulo de incidencia de  $150^\circ$ . En la Figura 6.8 se muestra el comportamiento del flujo de viento sobre la cubierta cuando ocurre la succión máxima de -1.57 en la esquina inferior. En la mayor parte de la cubierta se presentan succiones, con excepción en la esquina superior donde se presentan presiones en el orden de la unidad, que va disminuyendo conforme se distribuye en la longitud de la cubierta.

La Figura 6.9 muestra los coeficientes de presión neta máximos para  $\theta=0^\circ$ .

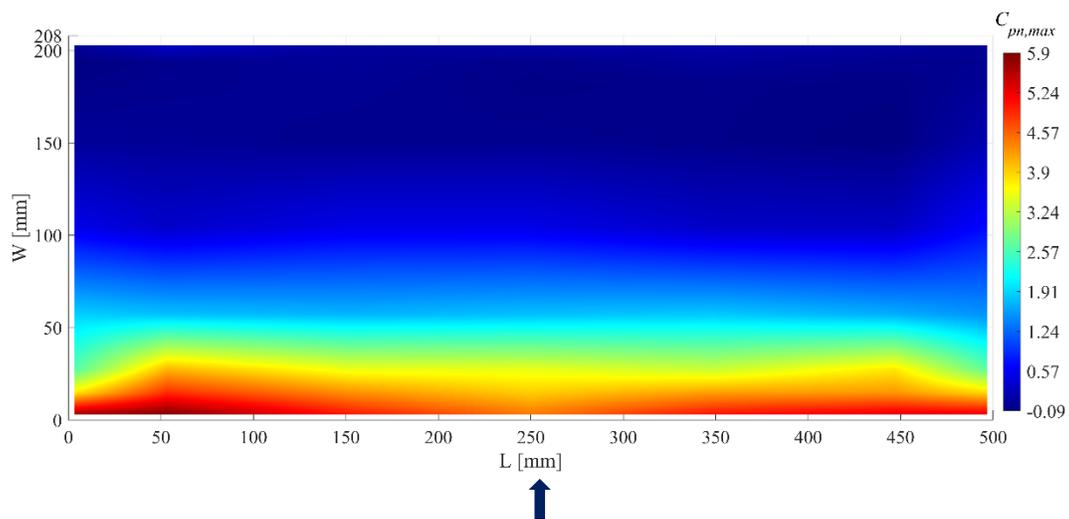


Figura 6.9 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 0^\circ$

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

El patrón de comportamiento del viento en la cubierta de la Figura 6.9 es muy similar a lo que ocurre en la Figura 6.5, pero en este caso con  $C_{pn}$  más elevados, llevando al orden de un  $C_{pn}$  máximo de 5.9.

Los resultados de los coeficientes de presión neta máximos para  $\theta=90^\circ$  se presentan en la Figura 6.10.

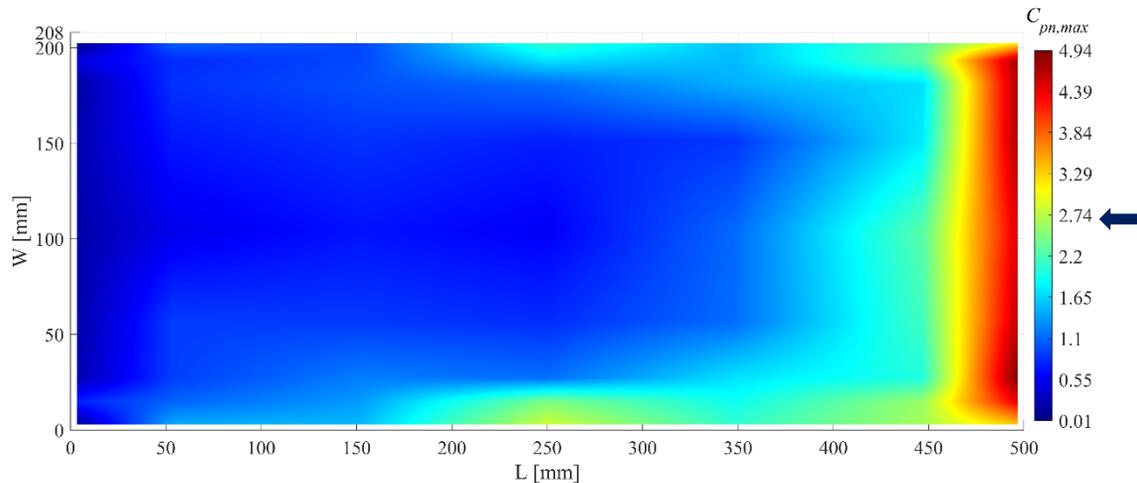


Figura 6.10 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 90^\circ$

Cuando se analiza la cubierta a  $\theta=90^\circ$  se observa que las máximas presiones solo se registran en la zona barlovento, donde el viento tiene contacto directo con la cubierta en una distancia no mayor a  $L/10$  y en el resto de la cubierta las presiones son bajas.

Los coeficientes de presión neta máximos para  $\theta=160^\circ$  se muestran en la Figura 6.11.

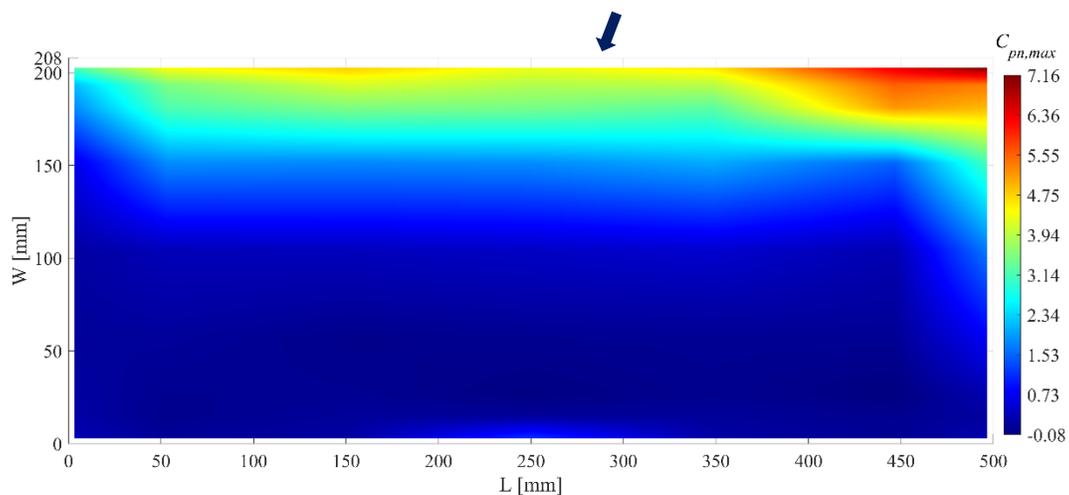


Figura 6.11 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 160^\circ$

En la Figura 6.11 se muestra el  $C_{pn}$  más desfavorable cuando actúan las presiones más altas sobre la cubierta. Para el ángulo de análisis de  $160^\circ$  la concentración de las altas presiones es localmente, debido a que solo sucede en el vértice de la cubierta, pero las demandas son altas comparándola con los  $C_{pn}$  medios que se presentan en el mismo ángulo de análisis.

Con el objetivo de realizar un estudio completo de la estructura, también se estudiaron en las condiciones cuando actúan las succiones más desfavorables en la cubierta; como se presenta a continuación las siguientes gráficas.

La Figura 6.12 muestra la distribución de los  $C_{pn}$  mínimos, es decir, cuando se presentan succiones.

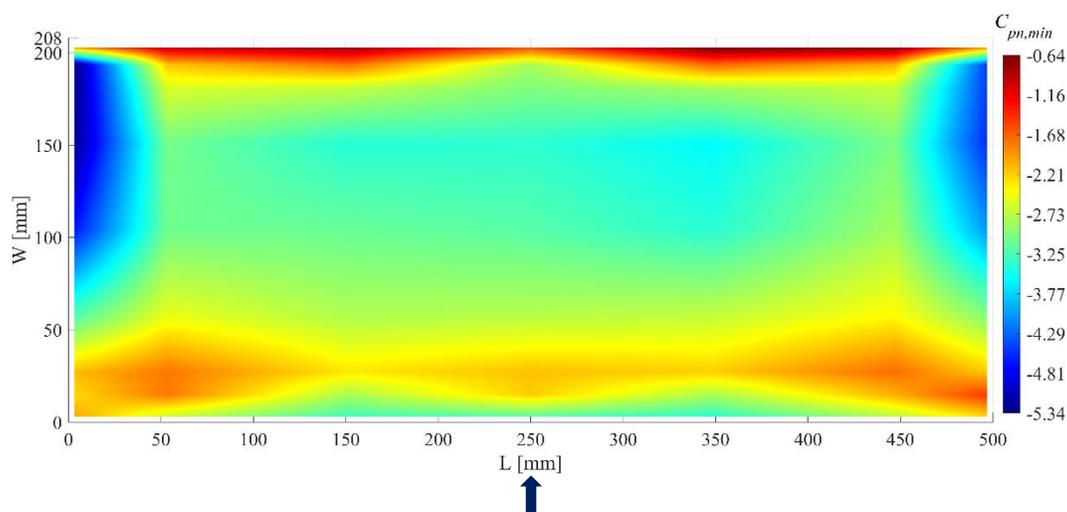


Figura 6.12 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 0^\circ$

La distribución de los  $C_{pn}$  es un poco distinta a las gráficas antes mostradas, porque cuándo el flujo de viento incide en la parte longitudinal, las succiones más altas se encuentran en los extremos de la cubierta con valores de  $C_{pn}$  más desfavorables.

La Figura 6.13 muestra los coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta=90^\circ$ . El patrón de comportamiento del viento en la cubierta de la Figura 6.13 es muy similar a lo que ocurre en la Figura 6.10, pero en este caso se invierten los sentidos de los  $C_{pn}$ , debido a que en este caso incurren las succiones.

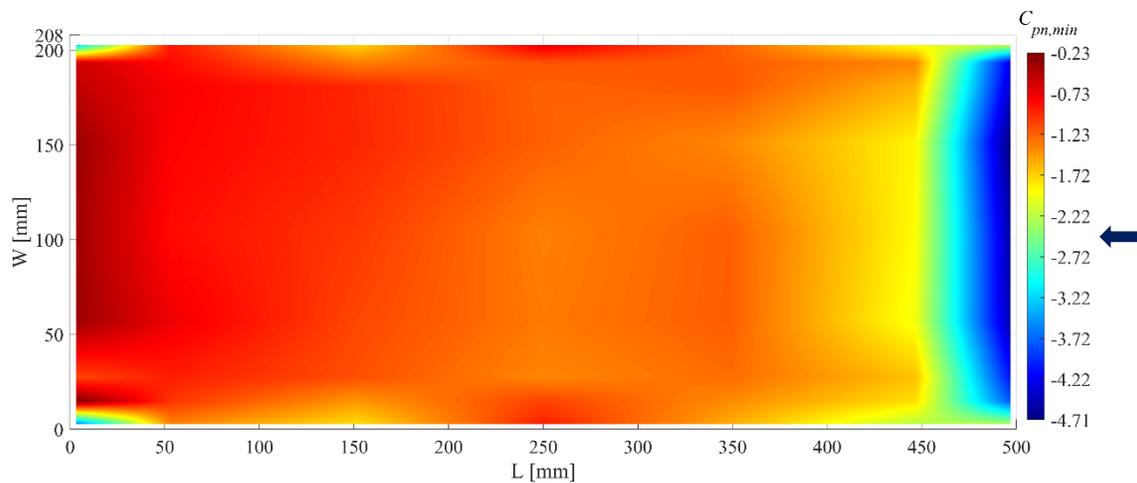


Figura 6.13 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 90^\circ$

Finalmente, se muestra la gráfica de contorno para el ángulo de incidencia de  $160^\circ$  (Figura 6.14). Se muestra que el orden de los  $C_{pn}$  en succión es de  $-6.51$ , que es un poco menor (en valor absoluto) al  $C_{pn}$  más desfavorable en presión de  $7.16$ . Para ambos casos, las mayores demandas que se ejerce en las cubiertas se presentan de manera puntual en las esquinas, esta sobrepresión puede originarse porque en esa zona se generan los mayores desprendimientos de vórtices, aumentando significativamente las presiones solo en esas zonas.

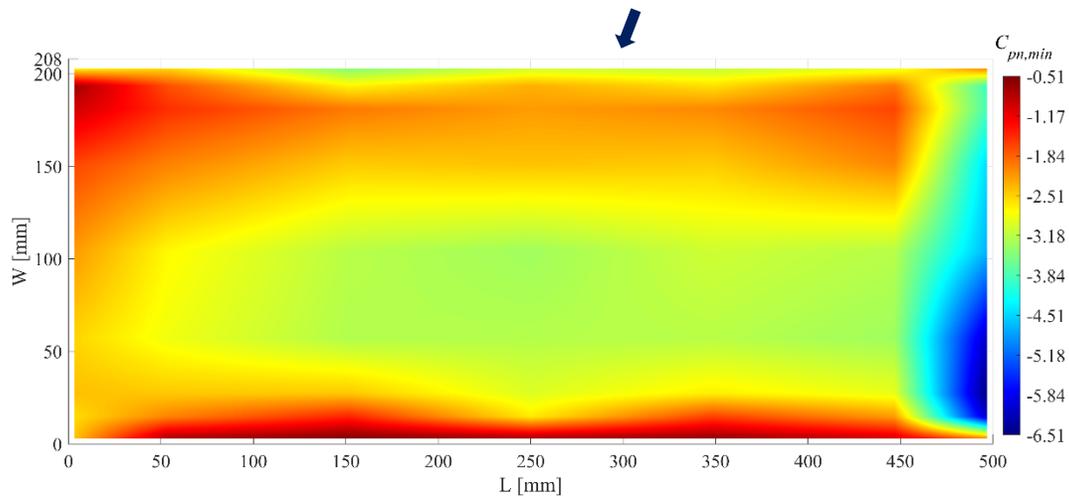


Figura 6.14 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 160^\circ$

### 6.1.2 Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ )

Para el Modelo 2 se siguió la misma metodología de análisis que en el Modelo 1, mediante la elaboración superficies de contorno en MATLAB (2022), en las cuales se

ajustan los intervalos de los coeficientes de presión de cada gráfica, para este modelo también se interpolaron los coeficientes de presión de las ubicaciones de la cubierta que no fue posible instrumentar.

La presentación de los resultados se hará de manera similar al apartado anterior, primero se mostrarán las gráficas de contorno para coeficientes de presión medios, luego los máximos y se finalizará con los coeficientes de presión mínimos; en la ingeniería de viento comúnmente denominados coeficientes de presión negativos o en succión. Para los  $C_{pn}$  medios se presentarán los ángulos  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  y el ángulo más desfavorable, lo mismo se hará para mostrar el comportamiento cuando se presenten las presiones y succiones máximas, pero omitiendo los ángulos  $45^\circ$  y  $180^\circ$ , para no ser repetitivo en los resultados.

En la Figura 6.15 y la Figura 6.16 se muestran los coeficientes de presión neta medios de los ángulos de incidencia a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , respectivamente.

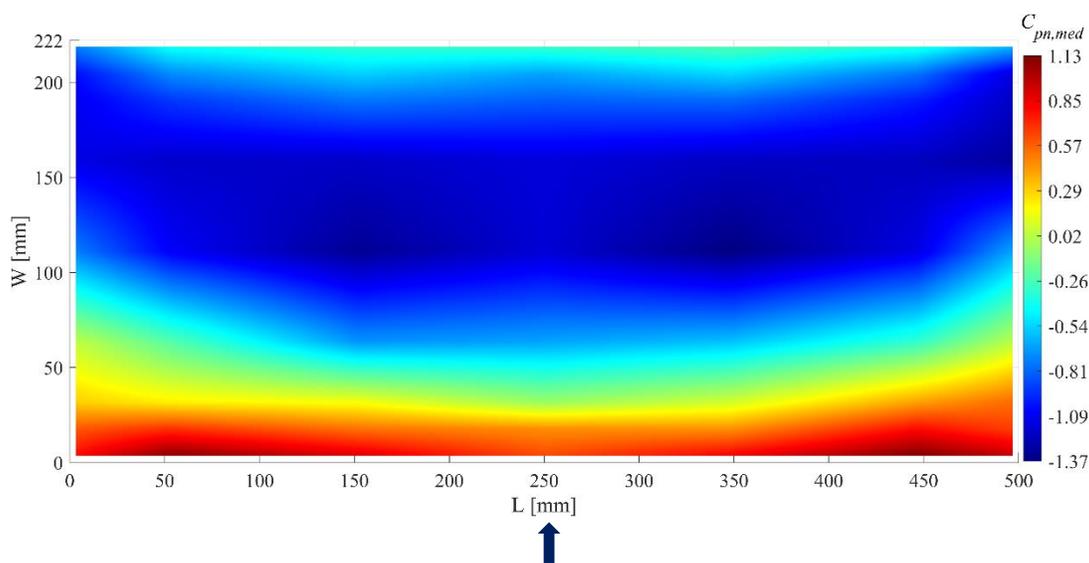


Figura 6.15 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 0^\circ$

Se observa un comportamiento similar cuando se presentaron los ángulos  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , la distribución de presiones es como un espejo debido a la simetría que tiene la estructura tanto en el sentido transversal como longitudinal.

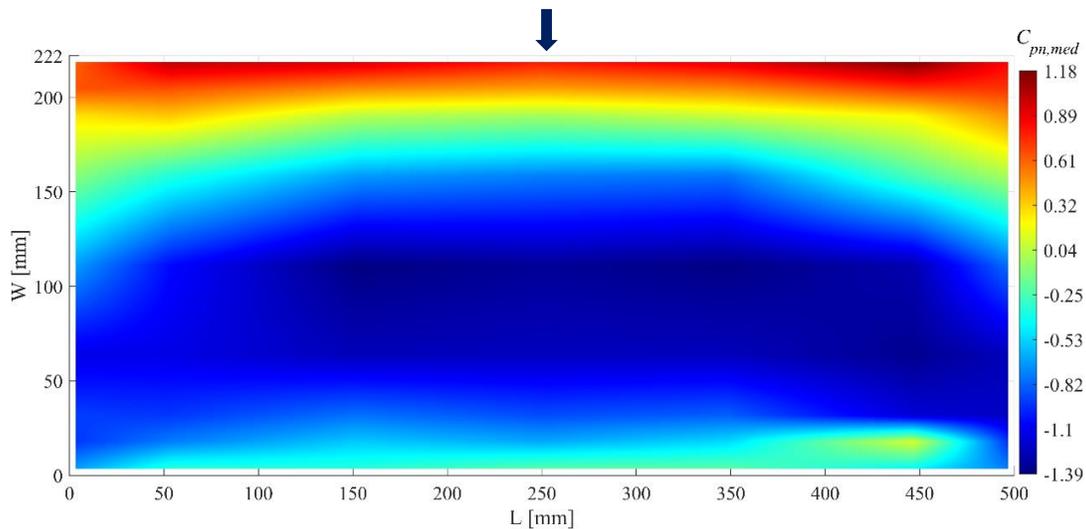


Figura 6.16 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 180^\circ$

Con base a la intensidad de los gráficos de contorno y en los intervalos de  $C_{pn}$  que tiene cada gráfica podemos afirmar que la distribución de las presiones sobre la cubierta sí es simétrica debido a la geometría de la estructura, por lo tanto, para fines de esta investigación fue suficiente muestrear las cubiertas para el intervalo de ángulos desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$  debido a que estos son simétricos a los ángulos desde  $180^\circ$  hasta  $360^\circ$  por la geometría de la estructura y la distribución de los sensores.

Se muestran los coeficientes de presión neta medios en la Figura 6.17 de un ángulo de incidencia en la que no es ortogonal a la cubierta ( $45^\circ$ ) y en la Figura 6.18 es cuando se presenta el  $C_{pn}$  medio más desfavorable para  $\theta=150^\circ$ .

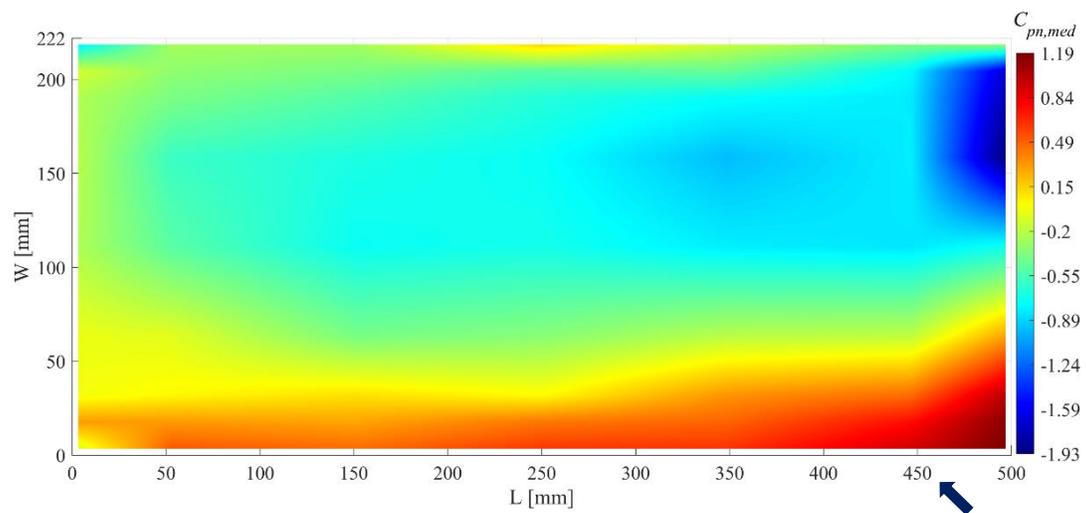


Figura 6.17 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 45^\circ$

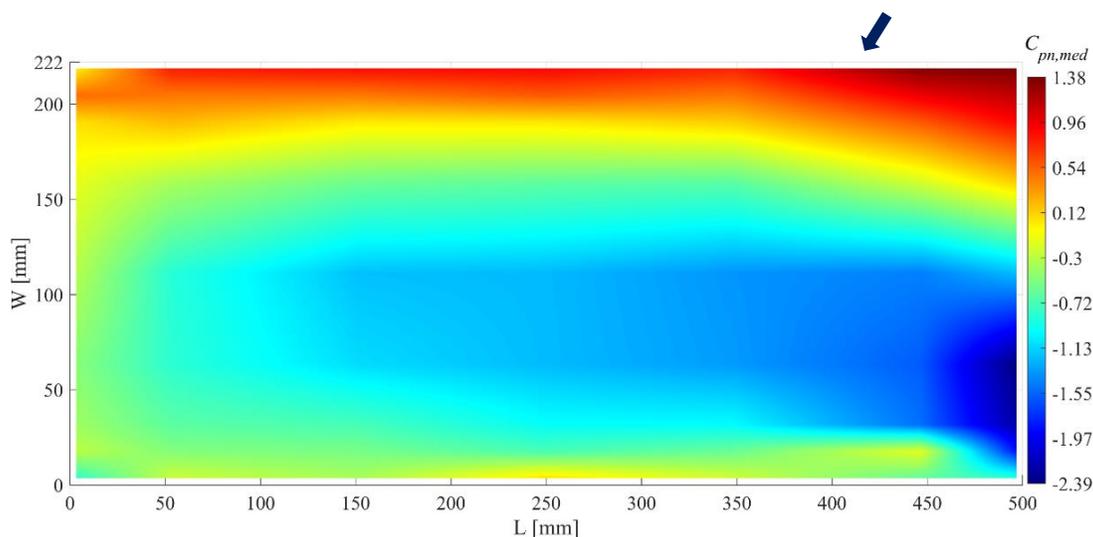


Figura 6.18 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 150^\circ$

El ángulo de  $\theta=150^\circ$  es simétrico a  $-30^\circ$ , por lo tanto, cuando  $\theta=45^\circ$  el viento en estos dos casos actúa sobre la cubierta en forma de espejo con respecto al sentido longitudinal.

Como se ha observado, el ángulo de  $\theta=150^\circ$  es más crítico para estas cubiertas, resultando el ángulo de incidencia donde se presentan las succiones más altas con un  $C_{pn}$  mínimo de -2.39.

Cuando  $\theta=90^\circ$  (Figura 6.19), el comportamiento general del viento y los intervalos de los  $C_{pn}$  también son muy similares al que se observó en el Modelo 1, al igual que las zonas donde actúan las presiones, por lo tanto, cuando el viento es paralelo a la curvatura de la cubierta, al ángulo de la curvatura no tiene un efecto muy notorio.

En la Figura 6.19 se observa un efecto particular que es la presencia de altas succiones en las esquinas, en las cuales se ubicación columnas, el contacto del viento con las columnas pueden desprender vórtices que originen las pequeñas concentraciones de succiones que se observan.

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

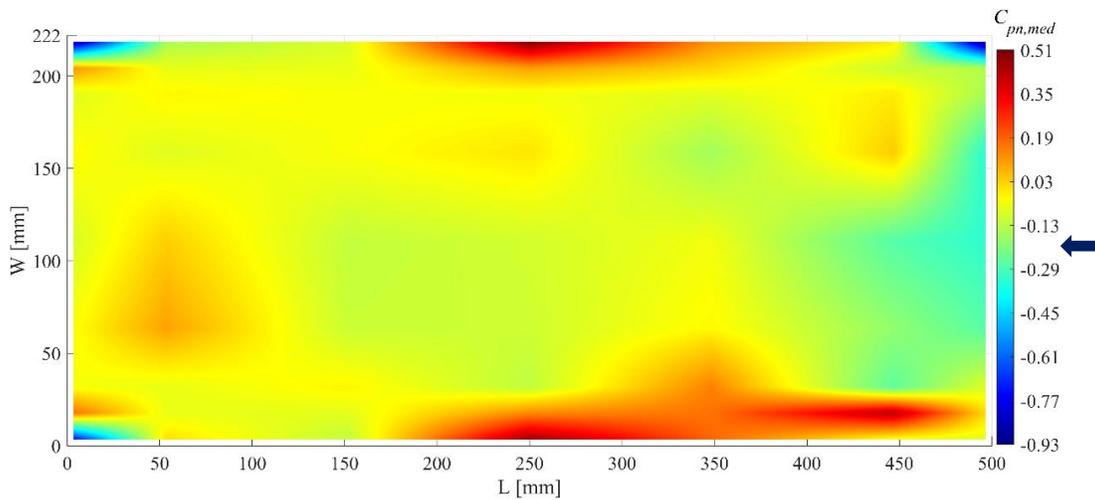


Figura 6.19 Coeficientes de presión neta medios para  $\theta = 90^\circ$

En los contornos de la Figura 6.20 se presenta un comportamiento muy similar al Modelo 1 para  $\theta=0^\circ$ , en los cuales las presiones máximas solo están presentes en el extremo longitudinal de la cubierta, además los  $C_{pn}$  mayores a 2 se encuentran limitados a una distancia no mayor a  $W/5$ .

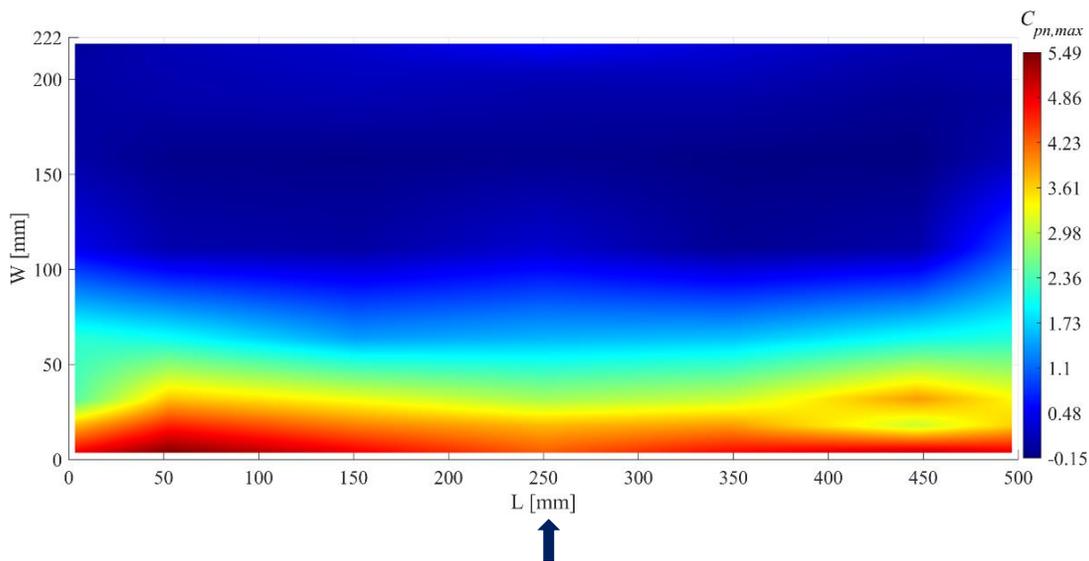


Figura 6.20 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 0^\circ$

En la Figura 6.21 se muestran los coeficientes de presión neta máximos para  $\theta=90^\circ$ , observando una concentración de presiones solo en la parte transversal de barlovento de la cubierta, con pequeñas concentraciones locales donde inicia la curvatura la cubierta.

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

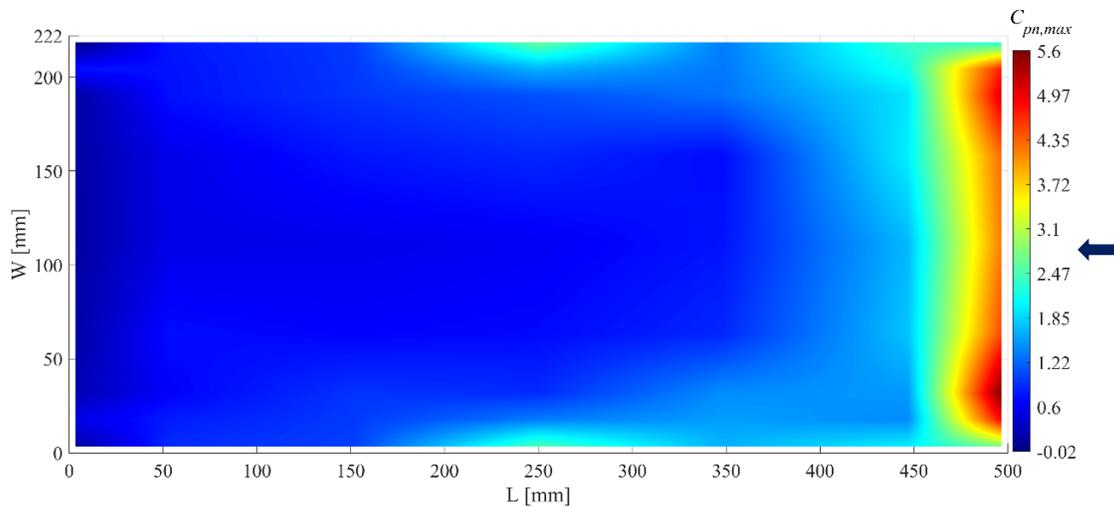


Figura 6.21 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 90^\circ$

La Figura 6.22 muestra el ángulo de análisis más desfavorable cuando incurren las presiones máximas, concentrándose solo en el vértice de la cubierta con un  $C_{pn}$  de 6.74.

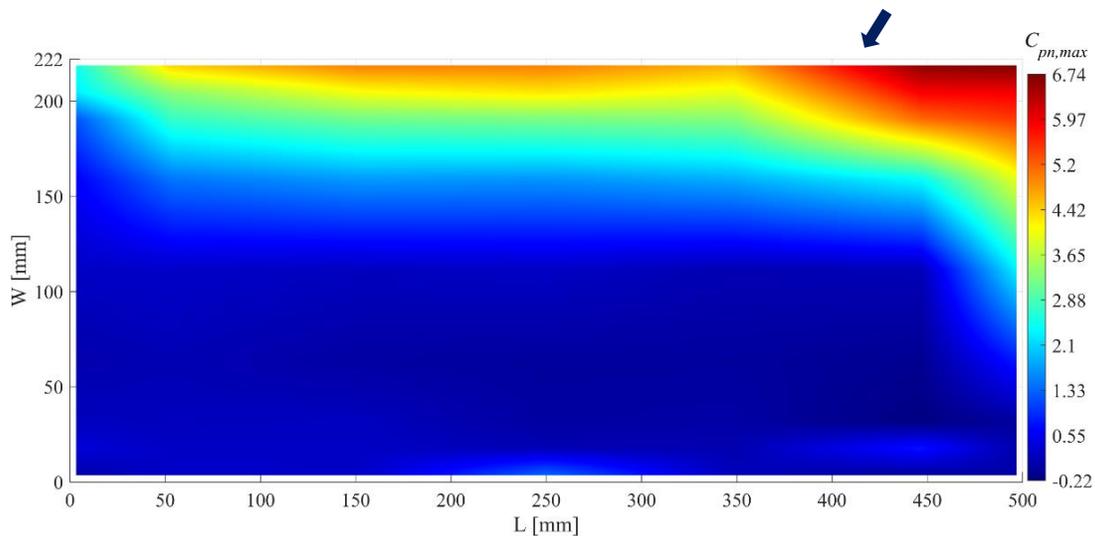


Figura 6.22 Coeficientes de presión neta máximos para  $\theta = 150^\circ$

A continuación, se muestra la condición cuando actúan las succiones sobre la cubierta para dos ángulos ortogonales a la cubierta. La Figura 6.23 muestra los coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta=0^\circ$  y en la Figura 6.24 se presentan los resultados de los coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta=90^\circ$ .

Cuando el viento es paralelo a la sección longitudinal de la estructura ( $0^\circ$ ) se observa que las succiones más altas se encuentran concentradas en pequeñas zonas en los extremos,

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

en estas zonas es donde el flujo del viento tiene contacto con la parte curva interna de la cubierta provocando el desprendimiento de vórtices que generan estas succiones locales.

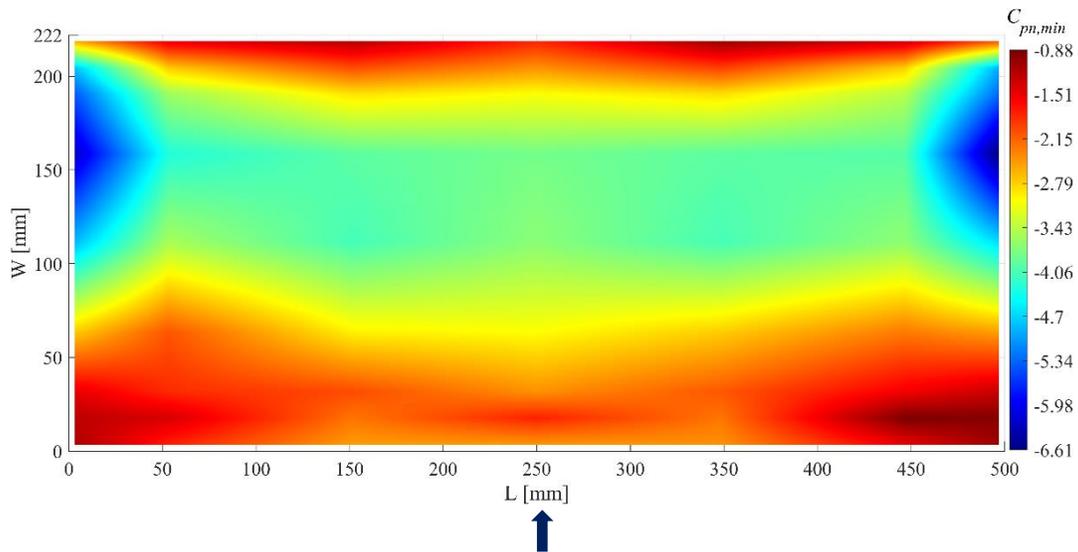


Figura 6.23 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 0^\circ$

En la Figura 6.24 se observa que las succiones máximas están limitadas a una franja en sección transversal que no es mayor a una distancia de  $L/10$  y el resto de la cubierta también se encuentra en succión, pero con  $C_{pn, \min}$  cercanos a la unidad.

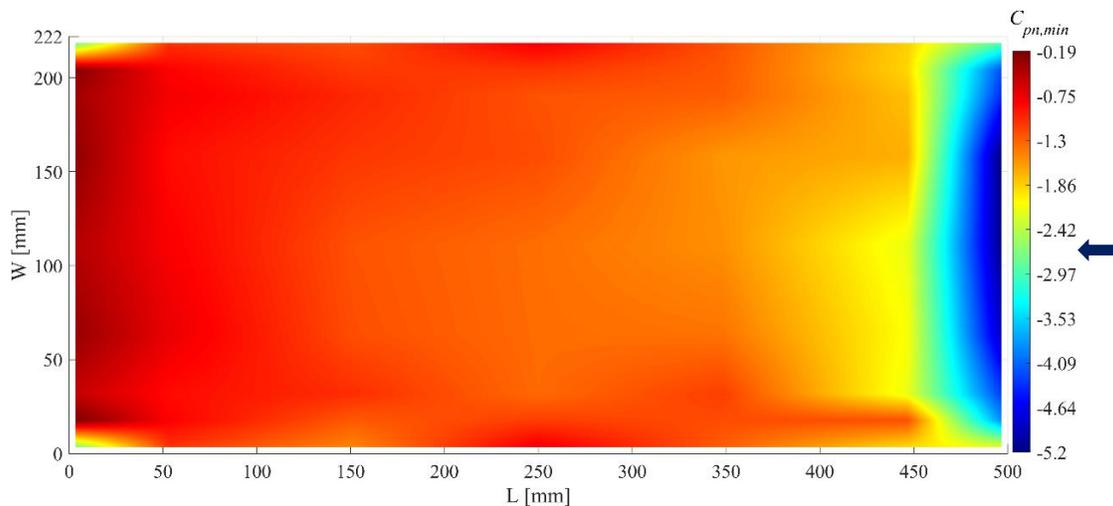


Figura 6.24 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 90^\circ$

Finalmente, se presentan los resultados para  $\theta=150^\circ$  (Figura 6.25), es la condición más desfavorable debido que se presenta la succión más alta con un valor de  $C_{pn}$  igual a  $-9.11$ , este valor es comparable a los presentados en otras literaturas en términos de máximos para estructuras diferentes a las de este estudio.

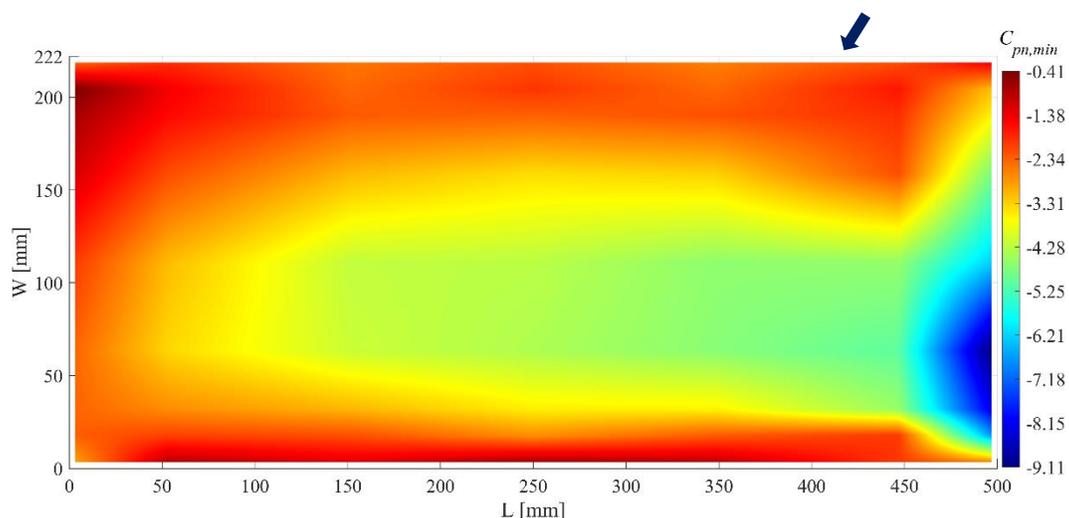


Figura 6.25 Coeficientes de presión neta mínimos para  $\theta = 150^\circ$

En una investigación donde se estudia una nave industrial cerrada a dos aguas (Mehta et al., 1992) en los cuales se muestran las presiones debidas al viento en las esquinas de la cubierta, obteniendo resultados en  $C_{pn}$  mínimos de -12. En otra investigación con succiones altas (Krishna, 1995) también se estudia una estructura cerrada a dos aguas con cubierta escalonada, donde se obtuvieron coeficientes de presión máxima locales desfavorables medidos de hasta -7.7.

Es importante mencionar que no se cuenta con referencia de otros estudios experimentales de naves industriales con cubiertas circulares aisladas donde se muestren resultados de  $C_{pn}$  máximos y mínimos.

## 6.2 Comparativa de Modelo 1 y Modelo 2

Los coeficientes de presión obtenidos de cada sensor se graficaron para observar el comportamiento del viento en las regiones instrumentadas con el fin de identificar aquellas que resulten más desfavorables.

A continuación, se emplearon los diagramas de cajas y bigotes para representar los valores obtenidos en términos de coeficientes de presión de las repeticiones de las pruebas para ambos modelos para poder comparar de mejor manera la distribución de los resultados por medio de anillos.

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

En los diagramas de caja es fácil observar algunos estadísticos como la media de los datos, identificar si hay algunos valores atípicos en los resultados. En un diagrama de caja se toma como referencia la diferencia entre el primer y el tercer cuartil; se considera un valor atípico aquel que se encuentra más alejado 1.5 veces esa distancia de uno de esos cuartiles. Para no hacer extensa esta sección de los resultados solo mostraremos algunos ángulos de análisis.

En la Figura 6.26 se muestra el diagrama de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta=0^\circ$ .

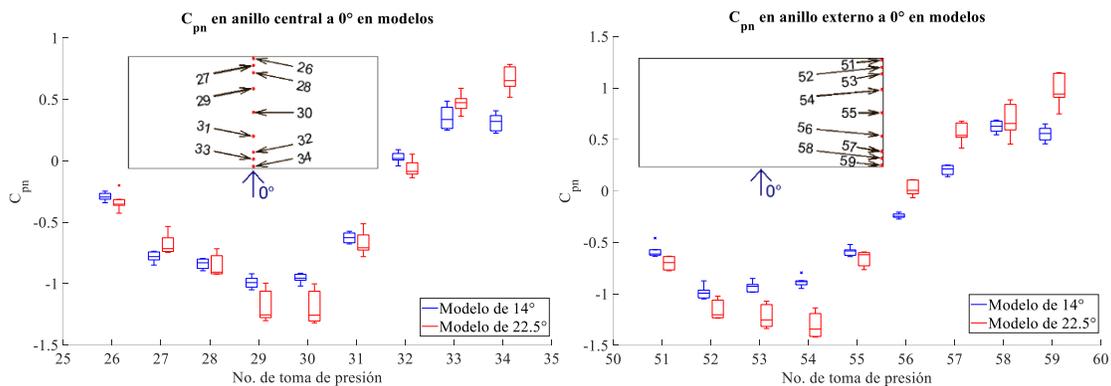


Figura 6.26 Diagrama de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta = 0^\circ$

Como se observa en la Figura 6.26, los resultados de los taps 29 y 30 que se ubican en la parte central del arco del anillo central tienen mayores dispersiones, pero no ocurre lo mismo con los taps del anillo externo, donde los taps que tienen valores más dispersos son los 58 y 59 que se ubican en el vértice inferior de los modelos. En el Modelo 1 se aprecia una semejanza en los resultados de las repeticiones de las pruebas. Además, se puede observar el comportamiento de los coeficientes en el desarrollo de la curvatura, mostrando presiones en la parte de la periferia curva más alejada del ángulo de incidencia y conforme el arreglo de los taps están ubicados en la parte más alta de la cubierta, se observan las succiones más altas.

Los diagramas de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta = 45^\circ$  se muestran en la Figura 6.27.

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

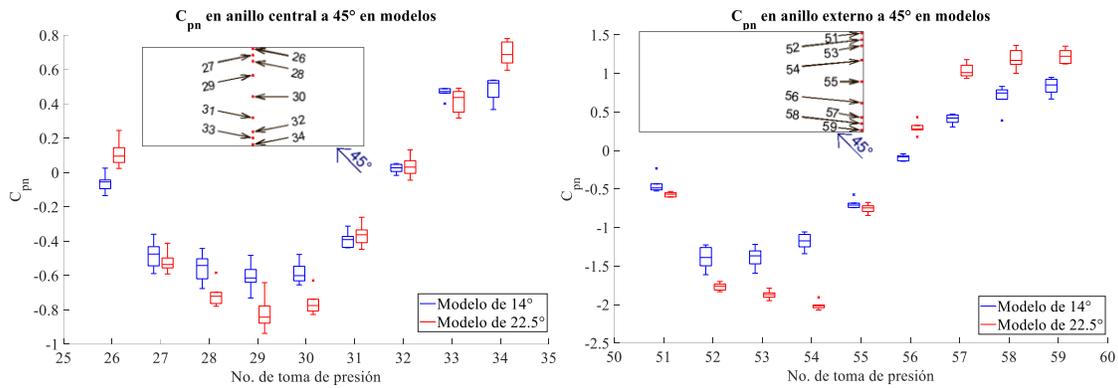


Figura 6.27 Diagrama de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta = 45^\circ$

Cuando el ángulo de incidencia es de  $45^\circ$ , se observa que los sensores en el anillo central tienen mayores dispersiones, mientras que en el anillo externo los valores no varían tanto, particularmente las tomas que se encuentran en la parte central de la cumbrera, donde también se puede apreciar las mayores succiones en el anillo analizado.

Los diagramas de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta=90^\circ$  se muestran en la Figura 6.28.

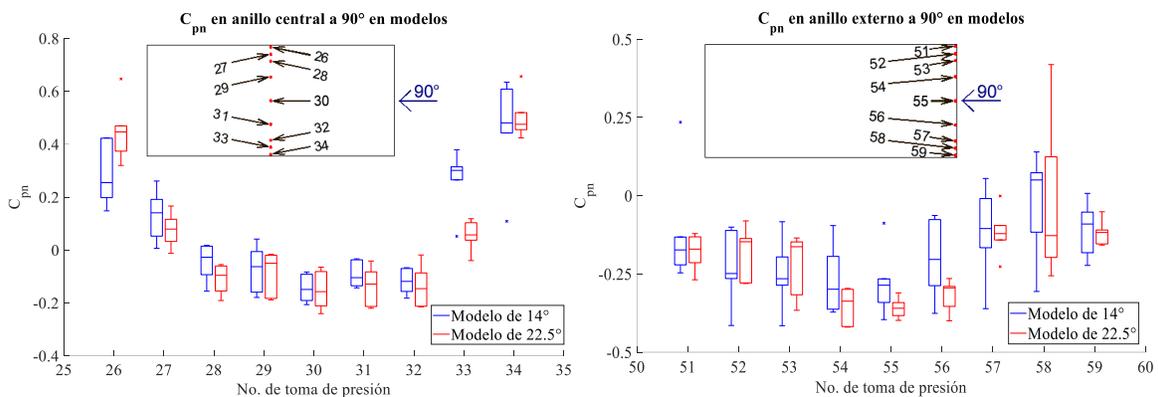


Figura 6.28 Diagrama de cajas de coeficientes de presión medios,  $\theta = 90^\circ$

En la Figura 6.28 se muestra cuando el ángulo de incidencia es paralelo a la curvatura de la cubierta, en la cual, se observan que en las repeticiones que se llevaron a cabo, los resultados tienen mayores dispersiones, mostrando algunos taps con valores atípicos, de acuerdo con lo definido en los diagramas de cajas.

Particularmente el comportamiento del anillo externo muestra que no hay un cambio de sentido en los coeficientes de presiones a succiones, es decir, para este grado de incidencia en ese anillo se mantienen las succiones en el desarrollo de la curvatura de la cubierta.

Con base a los diagramas de cajas de las repeticiones de las pruebas, se observó que los sensores con mayor dispersión entre sí son los que están localizados en los extremos de la cubierta, teniendo la máxima dispersión en los vértices. Es probable que las succiones tengan grandes variaciones debido a la alta turbulencia en esas zonas, lo que aumenta la dispersión observada.

La representación de los coeficientes de las succiones más desfavorables cuando el ángulo de incidencia es  $0^\circ$ , se muestra en la Figura 6.29.

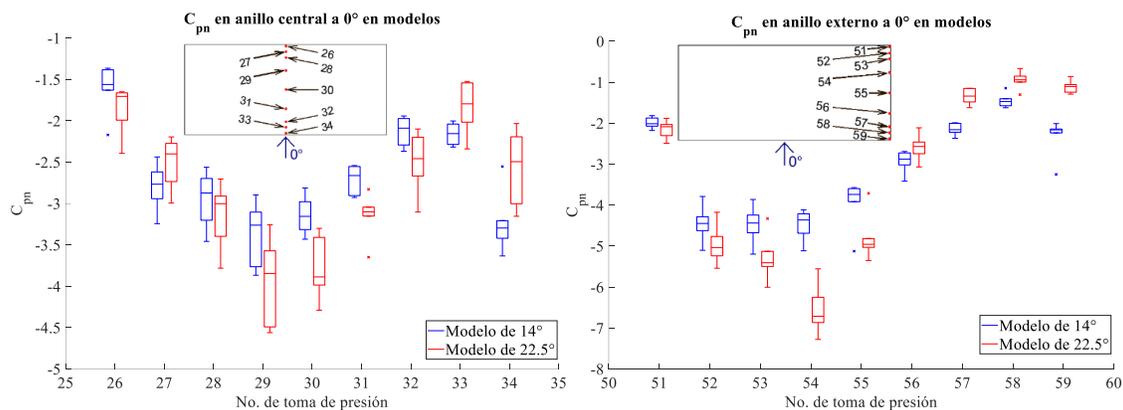


Figura 6.29 Diagrama de cajas de coeficientes presión en succiones maximas,  $\theta = 0^\circ$

En la Figura 6.29 se observa que las tomas ubicadas en el anillo central tienen más dispersión, sobre todo en la cumbre de la cubierta, lo que sucede contrario cuando las tomas se ubican en el extremo para este ángulo de análisis, los resultados de los coeficientes de las tomas en las esquinas de la cubierta se mantuvieron casi constantes en las repeticiones.

En la Figura 6.30 se representan las succiones máximas para los taps que conforman los anillos de la cubierta cuando  $\theta=90^\circ$ . Una observación importante es que en comparación con los coeficientes de presión medios, cuando se inducen las succiones maximas los valores en las tomas ubicadas al extremo de la cubierta son bastantes altos en comparación

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

con las tomas que se ubican al centro de la cubierta, con lo cual podemos inferir que las magnitudes de las demandas en las zonas periféricas de la cubierta son mayores.

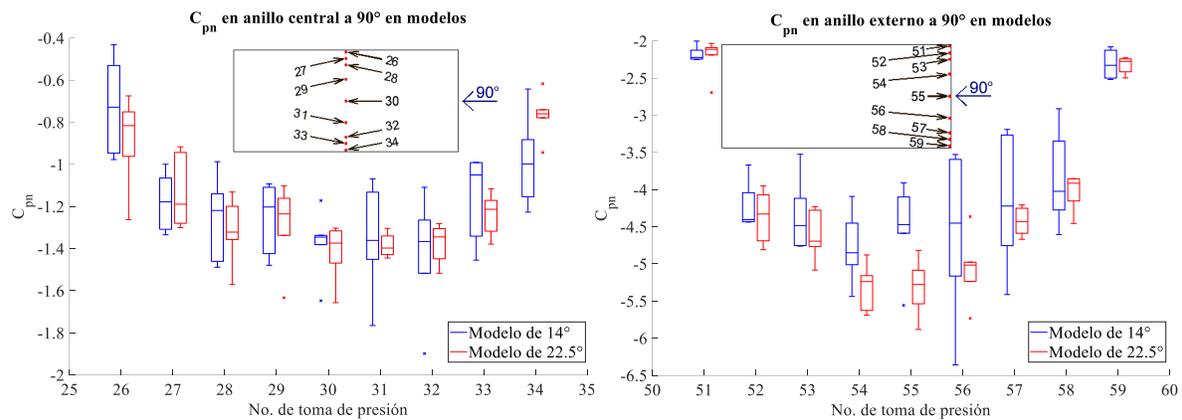


Figura 6.30 Diagrama de cajas de coeficientes presión en succiones máximas,  $\theta = 90^\circ$

De manera complementaria se muestran dos ángulos cuando se presentan las presiones máximas en los modelos. En la Figura 6.31 cuando  $\theta=0^\circ$ , se observa que hay tomas donde las presiones son bajas y casi nulas tanto para el anillo central como para el anillo externo, y en ambos casos va en aumento las presiones cuando se acerca a la periferia más cercana al flujo de viento.

Este comportamiento presente es algo que se esperaba, debido que para ese ángulo de incidencia los taps que se encuentran en la parte inferior del arco son los que tienen las presiones más altas porque que es donde el flujo tiene el primer contacto con el área de la cubierta.

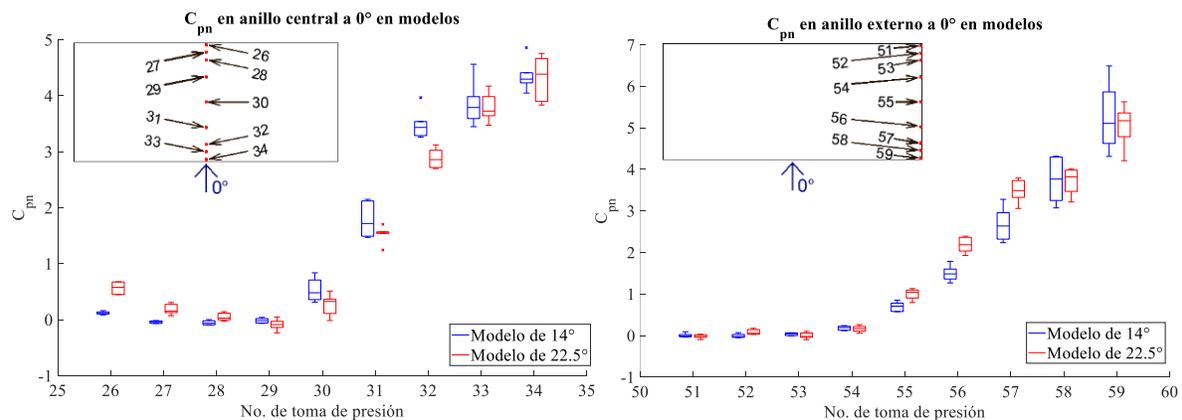


Figura 6.31 Diagrama de cajas de coeficientes de presiones máximas,  $\theta = 0^\circ$

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

Adicionalmente, los taps 34 y 59 se encuentran ubicados a la misma altura de los modelos, pero en diferentes ubicaciones, donde se observa que las presiones más altas en la cubierta están en el vértice (esquina inferior derecha) y también están más dispersos los resultados en comparación con los taps ubicados en los mismos anillos, esta dispersión puede originarse por que en esa zona se generan los mayores desprendimientos de vórtices.

Los diagramas de cajas de coeficientes de presiones máximas,  $\theta=90^\circ$  se muestran en la Figura 6.32.

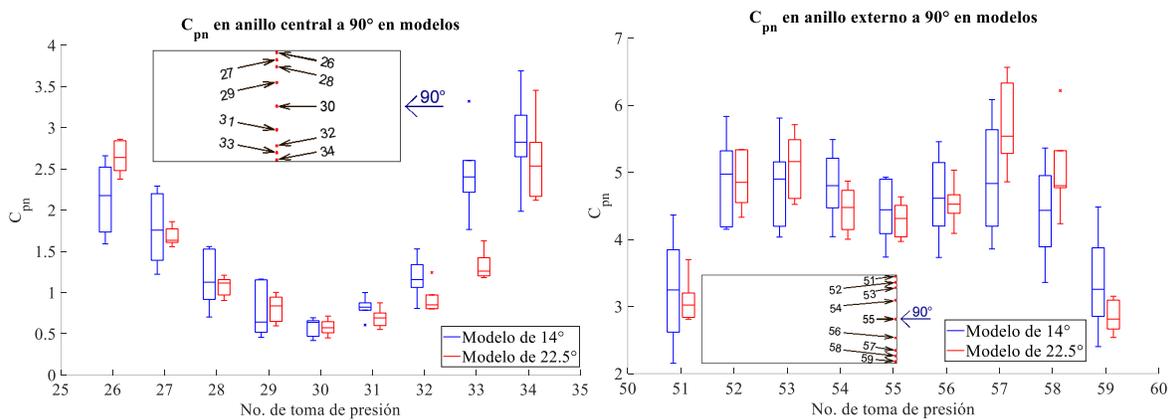


Figura 6.32 Diagrama de cajas de coeficientes de presiones maximas,  $\theta = 90^\circ$

La Figura 6.32 muestra el comportamiento de las pruebas cuando el ángulo de incidencia es paralelo a la curva de la cubierta, en el cual se observa que sigue manteniendo el mismo patrón de dispersión los resultados obtenidos en el anillo externo, que son los taps donde tiene el primer contacto el flujo de viento, para el caso del anillo central si observamos una variación de los valores conforme se desarrolla la curvatura, pero su comportamiento es similar al de los mostrados con anterioridad, donde los valores más altos se encuentran en los extremos de la cubierta.

Para hacer más visual la comparativa, se muestran las gráficas de contorno de los  $C_{pn}$ . En la Figura 6.33 se muestran en que magnitud se presentan los  $C_{pn}$  medios más desfavorables para cada modelo, resultando en el mismo ángulo de análisis. Se observa que las presiones y succiones son más altas en el Modelo 2 ( $\beta=22.5^\circ$ ) por lo que se confirma que el ángulo de curvatura de las cubiertas si genera un efecto en los resultados de los coeficientes.

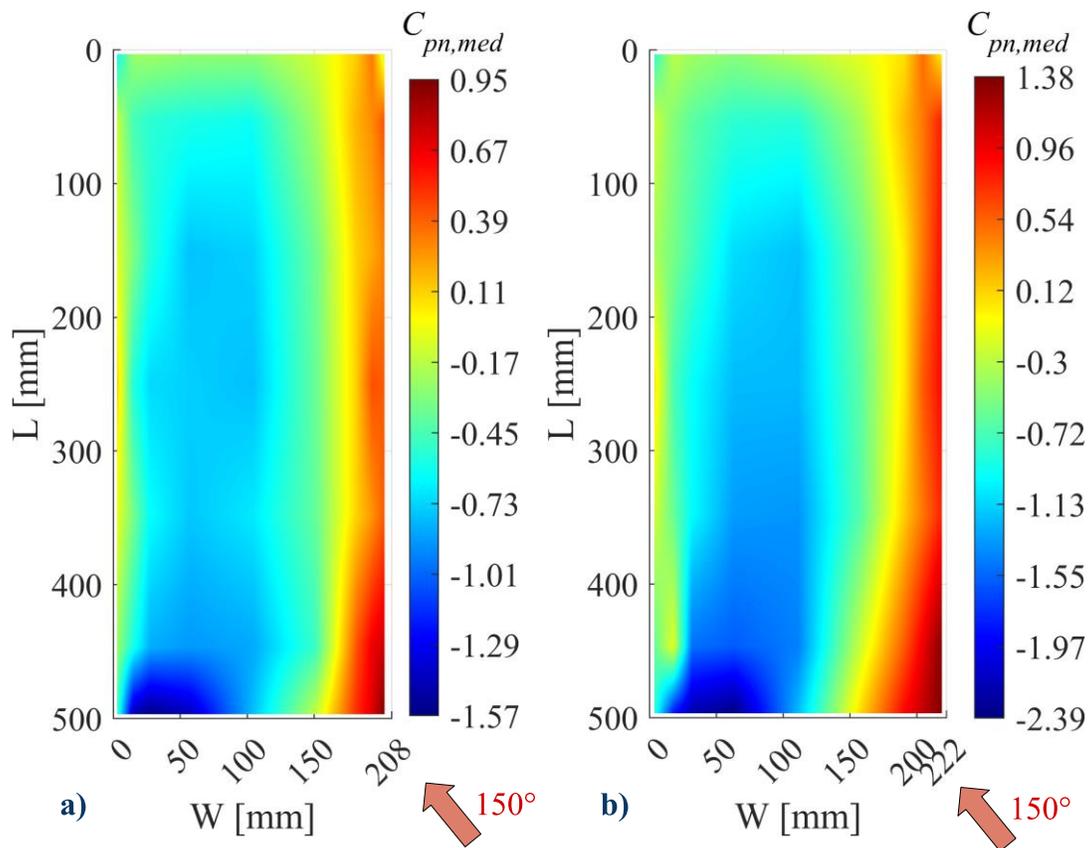


Figura 6.33  $C_{pn,med}$  medios más desfavorables: a) Modelo 1,  $\theta = 150^\circ$ ; b) Modelo 2,  $\theta = 150^\circ$

Una observación importante de la Figura 6.33 es que las presiones ocurren a todo lo largo de la cubierta pero solo en el borde en una distancia no mayor a  $W/5$ . También las gráficas de contorno nos indican que las succiones más altas ocurren principalmente en solo una zona de la esquina y su intensidad se va disminuyendo en el sentido longitudinal de la estructura presentándose concentración de succiones en el interior de la curvatura de la cubierta, debido a la misma turbulencia del viento que ocurre en esta zona.

En la Figura 6.34 se muestran los coeficientes de presión neta máximos para el ángulo de incidencia más desfavorables en cada modelo respectivamente.

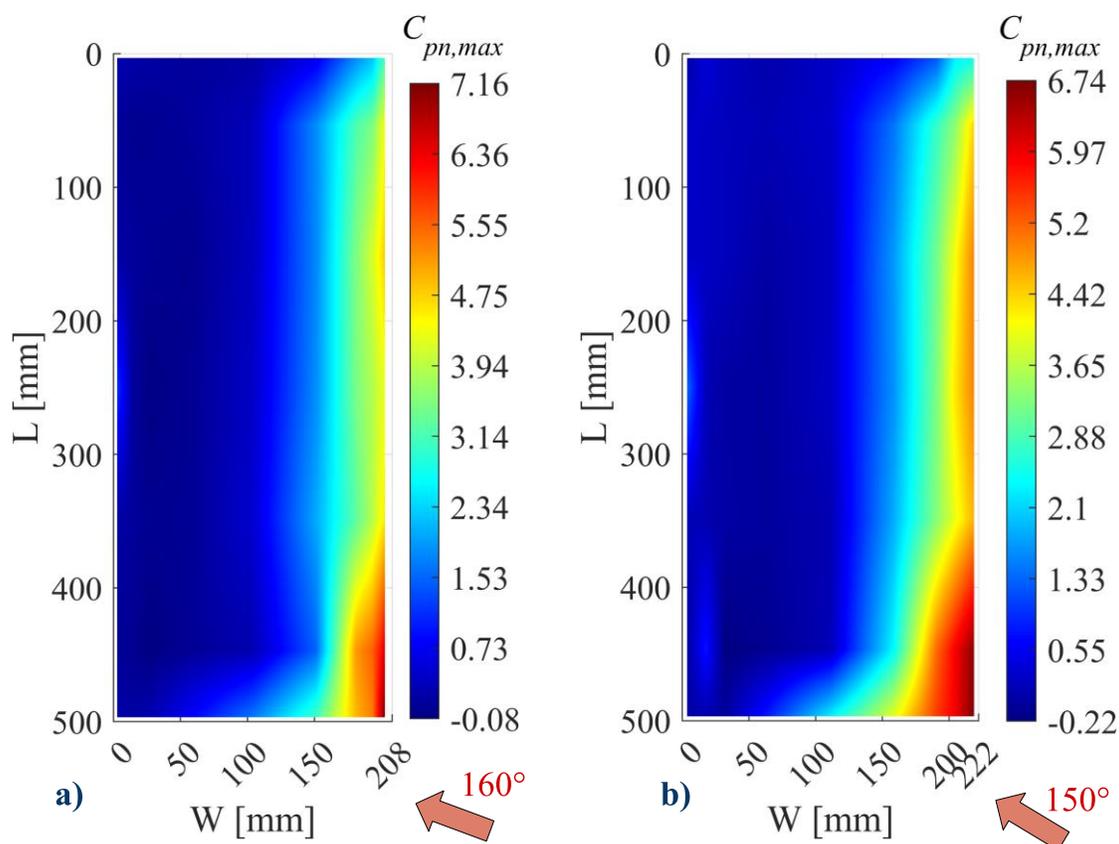


Figura 6.34  $C_{pn}$  máximos más desfavorables: a) Modelo 1,  $\theta=160^\circ$ ; b) Modelo 2,  $\theta=150^\circ$

Comparando las gráficas de contorno en término de  $C_{pn}$  máximos (Figura 6.34) se presenta algo distinto a los resultados ya mostrados, debido a que en el Modelo 1 ( $\beta=14^\circ$ ) para  $\theta=160^\circ$  se obtuvo un  $C_{pn}$  del orden de 7.16, por encima del  $C_{pn}$  presente en el Modelo 2 que resultó de 6.74. En la mayoría de los resultados mostrados las demandas más altas se presentan para la cubierta de mayor curvatura (Modelo 2), pero cuando se presentan las presiones más altas el resultado no siguió la misma tendencia.

En la comparativa de  $C_{pn}$  mínimos más desfavorables (Figura 6.35) se observa que en el Modelo 1 ocurre cuando el ángulo de incidencia es  $160^\circ$  ( $-20^\circ$ ), mientras que en el Modelo 2 ocurre en  $150^\circ$  ( $-30^\circ$ ). En ambos modelos la distribución de presiones en la cubierta es similar, pero con diferente intensidad.

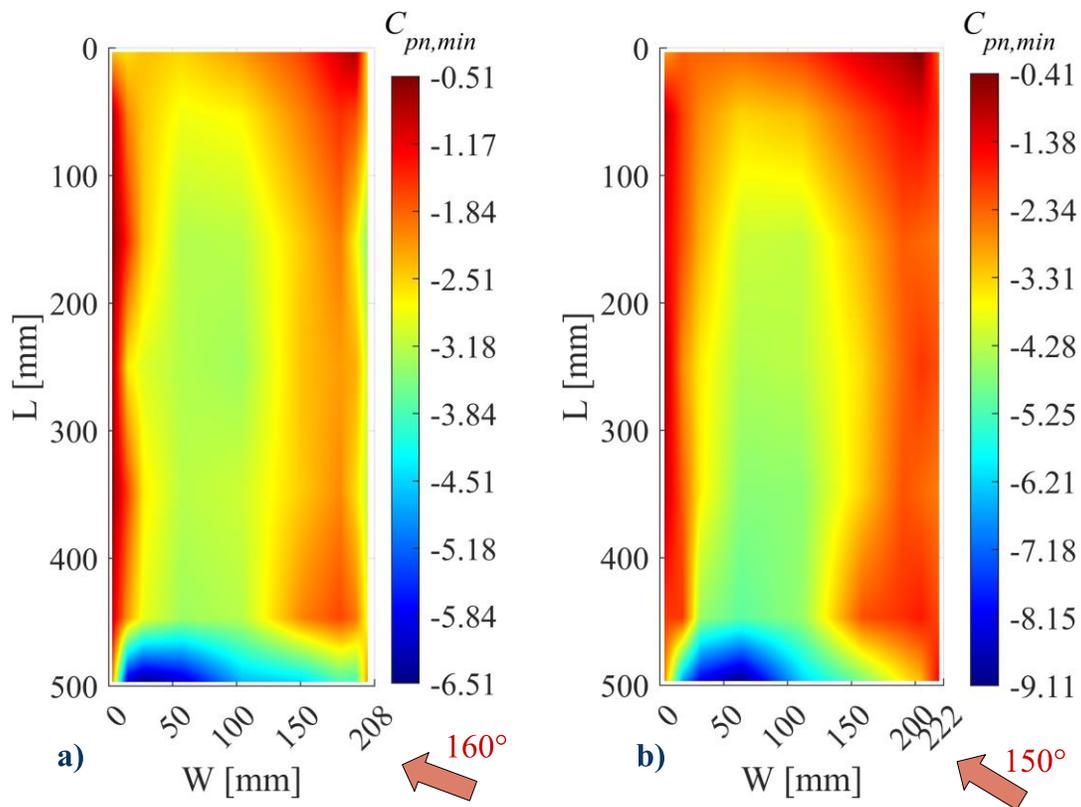


Figura 6.35  $C_{pn}$  mínimos más desfavorables: a) Modelo 1,  $\theta=150^\circ$ ; b) Modelo 2,  $\theta=150^\circ$

En ambos casos las succiones más altas se presentan de manera local cerca de una esquina obteniendo un  $C_{pn}$  de hasta -9.11 para el Modelo 2, mientras que en el Modelo 1 es casi un 30% menos que en el Modelo 2, resultando un  $C_{pn}$  de -6.51. Como se describió anteriormente, este aumento de presión muy puntual puede tener origen debido a que en las esquinas de la estructura se generan desprendimiento de vórtices.

Las presiones máximas negativas están asociadas a los vórtices cónicos generados en las esquinas de las cubiertas de las estructuras de poca altura, para los vientos en diagonal que soplan en la esquina en cuestión, como se observa en la Figura 6.36.

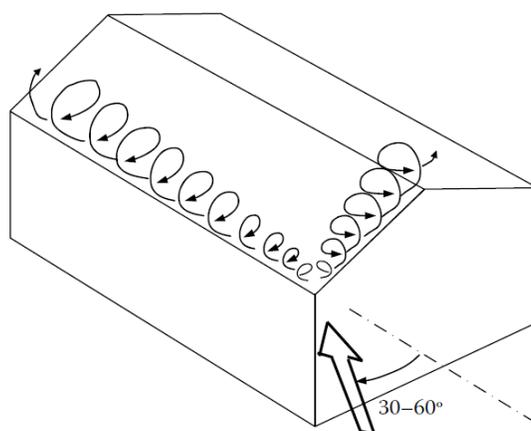


Figura 6.36 Vórtices cónicos para direcciones oblicuas del viento, tomado de (Holmes, 2015)

En la Figura 6.37 se presenta una muestra de una señal de historia en el tiempo de coeficiente de presión de un tap ubicado cercano al punto de formación de uno de estos vórtices. La Figura 6.37(a) es el registro del tap 56 del Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ ) para  $\theta = 150^\circ$  y la Figura 6.37(b) es del edificio de Texas Tech (Mehta et al., 1992).

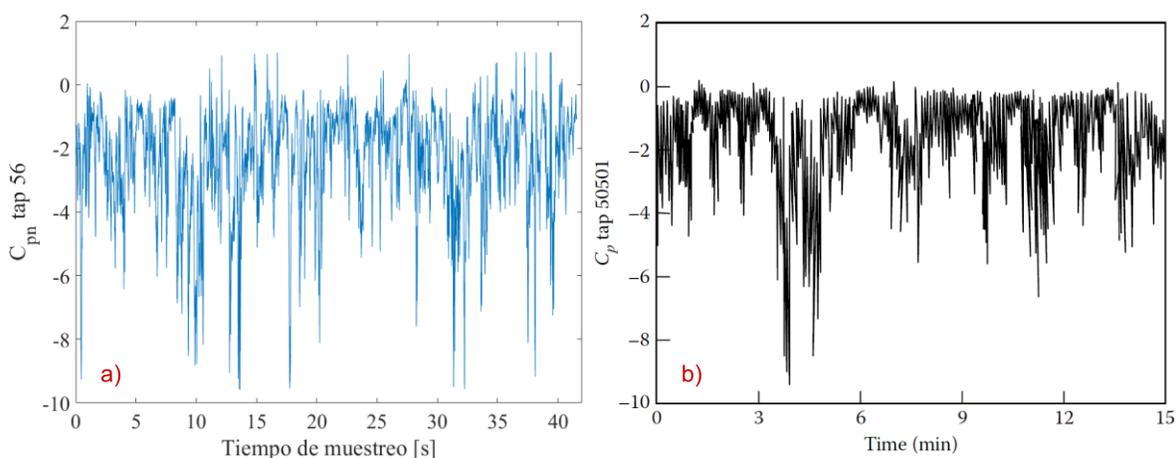


Figura 6.37 Historia en el tiempo de  $C_{pn}$  en toma de presión de esquina: a) Modelo 2; b) (Mehta et al., 1992)

Esto muestra que los  $C_{pn}$  de alta presión o succión se producen como "picos" en periodos de tiempo muy cortos. A menudo se producen valores de coeficientes de presión pico negativos tan altos como de -10, y ocasionalmente se han medido magnitudes de -20 (Holmes, 2015).

Con la finalidad de conocer que efectos tiene el ángulo de incidencia en las cubiertas se grafican los coeficientes de presión más desfavorable para cada uno de ellos en la Figura 6.38.

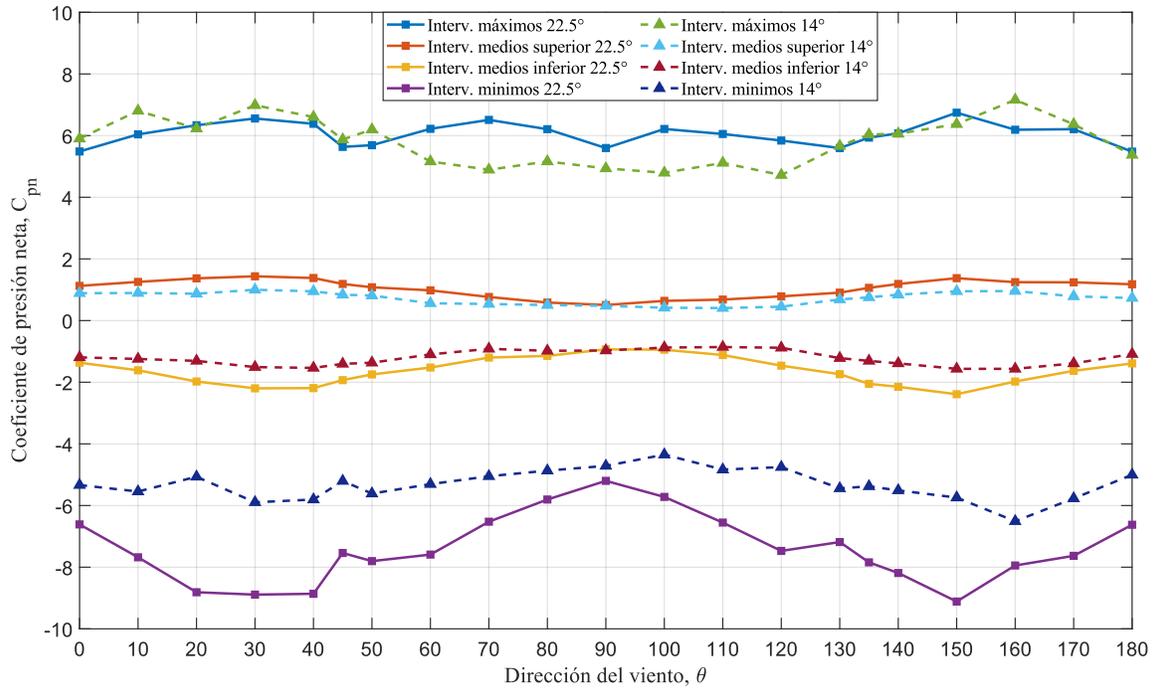


Figura 6.38 Efecto de  $\theta$  en el comportamiento de  $C_{pn}$  en modelos

Para las presiones y succiones máximas mostradas en la Figura 6.38 se promediaron las más altas obtenidas de cada repetición de las pruebas. También se muestran las presiones y succiones medias de ambas cubiertas para cada ángulo analizado. Se observa que existe cierta variabilidad en los coeficientes de presión entre los ángulos de análisis en ambos modelos. En el Modelo 2 para las succiones máximas se observa mayor el efecto que produce el ángulo de análisis lo que ocasiona más variabilidad en los resultados.

La gráfica también muestra que el ángulo de curvatura de las cubiertas si genera un efecto en los resultados de los coeficientes, resultando valores de presiones y succiones más elevadas con un ángulo de curvatura mayor, lo cual es consistente con lo encontrado en la literatura de otras investigaciones (Amaya-Gallardo et al., 2021; G. C. Balbastro, 2009; Natalini et al., 2013).

Los coeficientes para las succiones máximas son elevados en comparación con los coeficientes que se disponen en el código para este tipo de estructuras; sin embargo, en la literatura experimental de naves industriales de cubierta plana (Holmes, 1994; Mehta et al., 1992; Okada & Ha, 1992) se han mostrado que los coeficientes de las succiones máximas se acercan a valores tan altos como 12 o más.

### 6.3 Comparativa con investigaciones experimentales

La comparativa con otras investigaciones experimentales se hace por medio de gráficos de contorno de coeficientes de presión neta medios debido a que la mayor parte de la literatura disponible sobre estudios de estructuras con cubiertas circulares aisladas presentan resultados en términos de  $C_{pn}$  medios.

La orientación de los ángulos de incidencia determinados en ciertas investigaciones pueden ser diferentes a las asumidas en este trabajo pero las comparaciones son en función de la orientación de la dirección del flujo de análisis sobre la cubierta, es decir, en algunas investigaciones en el  $\theta = 0^\circ$  y en esta investigación será de  $90^\circ$ , pero en ambas cubiertas el viento incide en la dirección transversal de las cubiertas, por lo que la distribución de presiones sobre ambas cubiertas pueden ser comparables.

En la Figura 6.39 se hace la comparativa del modelo rugoso en la velocidad de prueba en túnel de 9.49 m/s, con un ángulo de incidencia de viento de  $90^\circ$  de la investigación de (Martínez, 2017) y un ángulo de arco de la cubierta de  $16.7^\circ$ ; contra los resultados obtenidos del Modelo 1 ( $\beta=14^\circ$ ) cuando  $\theta = 0^\circ$ .

Se observa que en ambos casos en la parte central de la cubierta suceden las succiones más altas, pero en referencia a la escala de colores resultan  $C_{pn}$  no resultan en la misma magnitud. La magnitud de las presiones es similar cuando el viento incide en el extremo de la cubierta a la longitud central y de igual manera en ambos casos se concentran las presiones más altas cerca de las esquinas de las cubiertas, obteniendo  $C_{pn}$  entre los intervalos de 1.10 a 1.20.

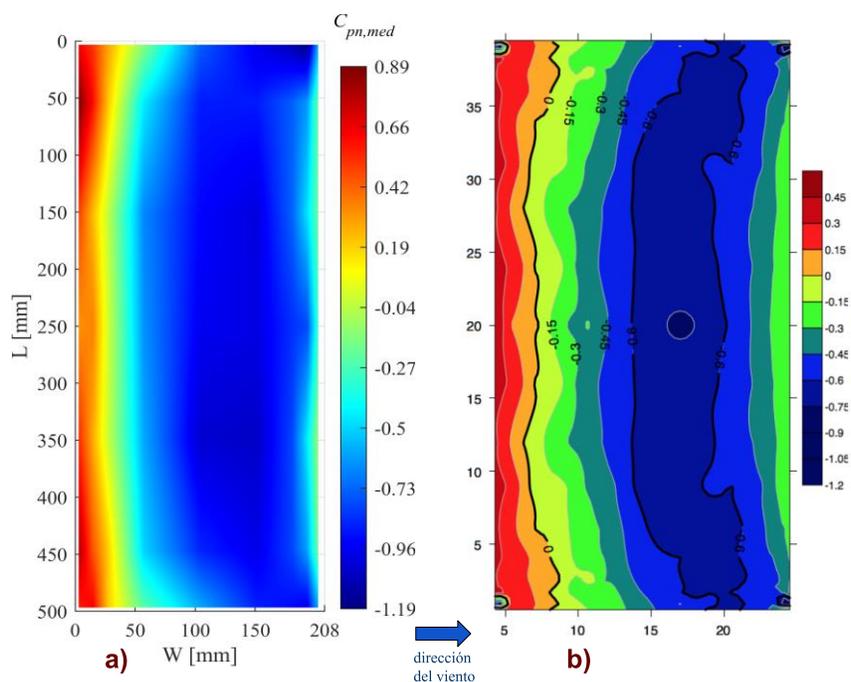


Figura 6.39 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 0^\circ$  en: a) Modelo 1, b) (Martínez, 2017)

Una de las diferencias entre ambos modelos es la forma de instrumentación; en la investigación de (Martínez, 2017) además que solo se instrumentó un cuarto de la cubierta, se requirió un modelo para instrumentar la cubierta superior y otro modelo para la cubierta inferior, es decir, el muestreo se hizo de manera independiente, también se colocaron los sensores de presión por el exterior del modelo.

La comparativa de la Figura 6.40 y la Figura 6.41 es con la investigación realizada en (Balbastro, 2009) en la cual se estudia 2 modelos de cubierta circular aislada, con dimensiones en ambos modelos: 13.3 cm de ancho, 7.1 cm de altura de columnas, 2.4 cm de radio de cubierta y en los cuales varió la longitud de los modelos, el Modelo 1 con 32.4 cm de longitud y el Modelo 2 con 16.2 cm; se comparó los resultados del Modelo 2 de esta investigación con el Modelo 1 de (Balbastro, 2009) debido a las similitudes geométricas.

En la Figura 6.40 se comparan las cubiertas cuando el viento ocurre a lo largo del arco de los modelos, cuando  $\theta = 0^\circ$ , en ambos casos se observa que el desprendimiento de flujo sucede casi inmediatamente en barlovento, lo anterior es importante, debido a que en la realidad se pueden llegar a ocasionar daños importantes en esta zona, sobre todo en la parte

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

central donde se observan succiones altas, posiblemente a la interacción de las presiones externas con las internas.

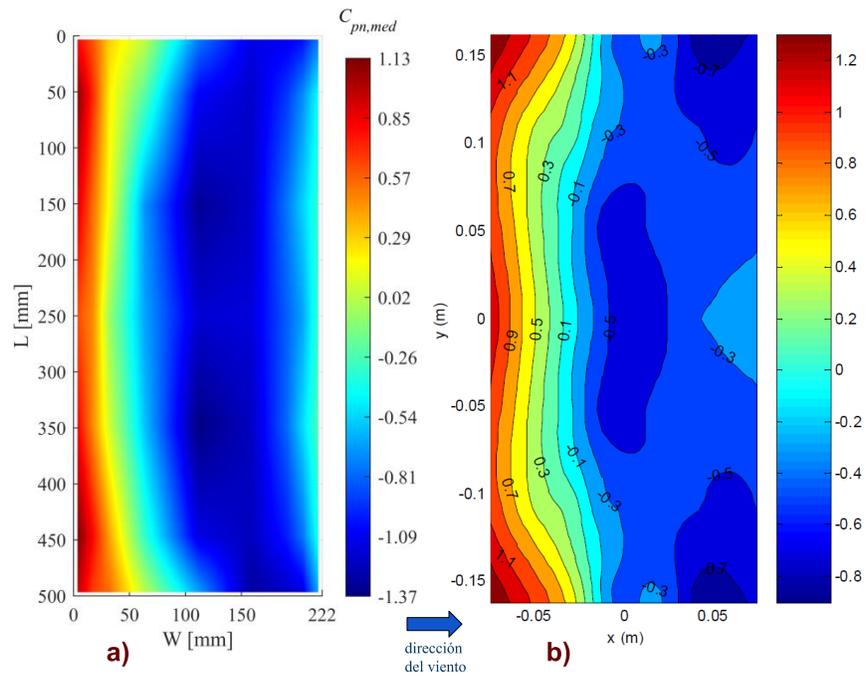


Figura 6.40 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 0^\circ$  en: a) Modelo 2, b) (Balbastro, 2009)

En la Figura 6.41 se muestran los coeficientes de presión neta medios para  $\theta = -45^\circ$ .

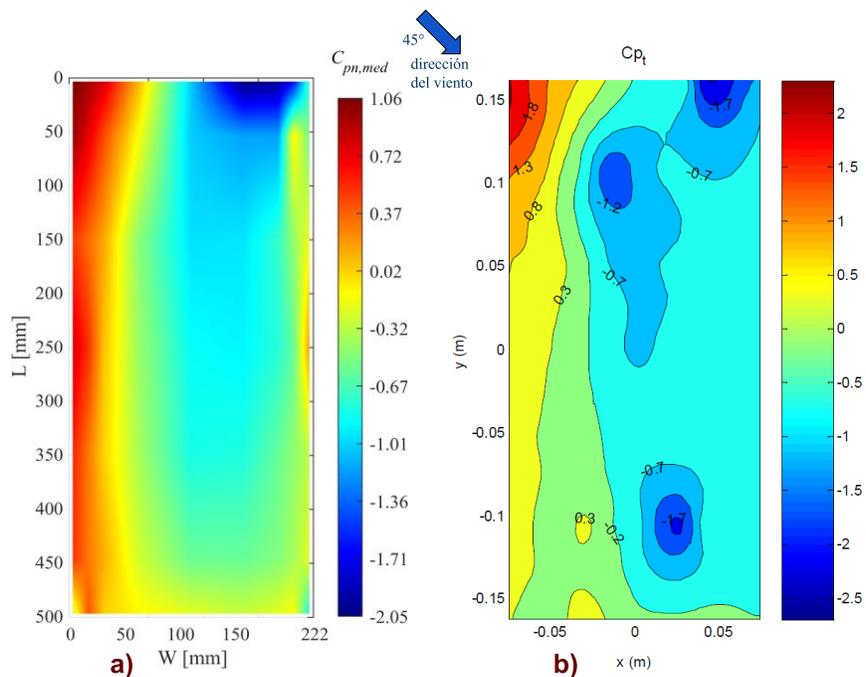


Figura 6.41 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = -45^\circ$  en: a) Modelo 2, b) (Balbastro, 2009)

## 6. Resultados de las pruebas experimentales en túnel de viento de los dos modelos a escala de cubierta curva

Se analizan las cubiertas para un ángulo diferente a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , debido a que pudieran presentarse  $C_{pn}$  más altos debido a la geometría de la estructura, como se observa en la Figura 6.41, en los cuales se presentan succiones más altas que en la condición anterior, con valores mínimos de  $C_{pn}$  hasta de  $-2.5$ . En ambos casos la distribución de los  $C_{pn}$  es similar, en la zona de la cumbrera de la cubierta también se distingue un comportamiento irregular donde se observan las succiones más altas, provocado posiblemente por la misma curvatura de las cubiertas.

En ambas figuras se observó diferentes intensidades de los  $C_{pn}$ , una diferencia fundamental son las dimensiones de ambos modelos, el ángulo de curvatura de la cubierta y la densidad de sensores de presión sobre la cubierta, resultando número de Reynolds diferentes, por tal motivo, los resultados no son totalmente idénticos, aunque si comparables.

En la Figura 6.42 se muestra la comparación de las gráficas de contorno de la cubierta del Modelo 1 para  $\theta = 45^\circ$ , con la cubierta en la investigación de (Ding & Uematsu, 2022) debido a que en cuestión del ángulo de curvatura son los más similares.

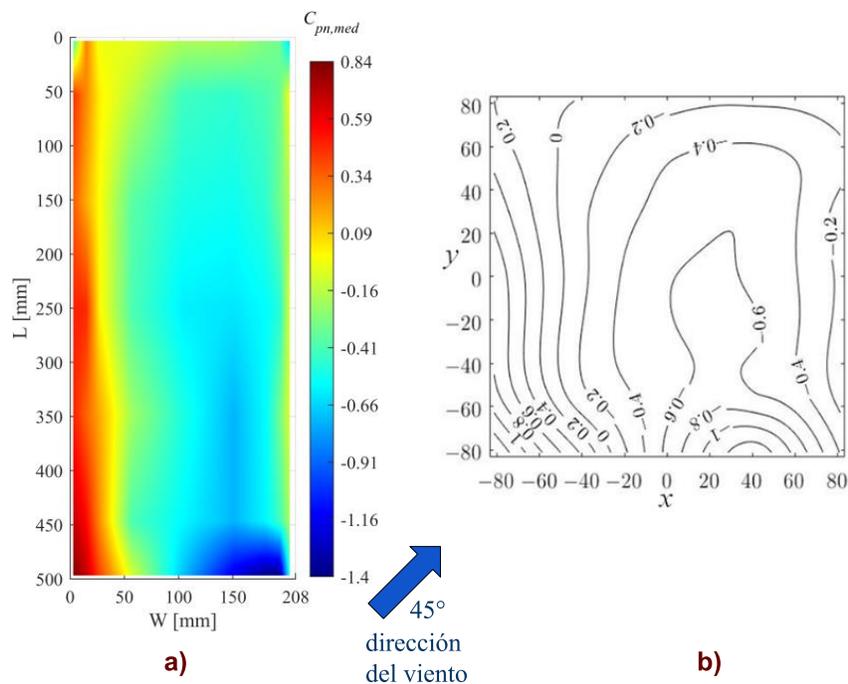


Figura 6.42 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 45^\circ$  en: a) Modelo 2, b) (Ding & Uematsu, 2022)

La geometría es la principal diferencia entre ambos modelos, la cubierta de la Figura 6.42(b) tiene la relación de aspecto ancho-largo de 1:1, una altura de columnas de 8 cm y un  $\beta = 11^\circ$ , con escala geométrica de 1:100, otra diferencia entre estas dos investigaciones es la caracterización del terreno, debido que las condiciones de prueba en (Ding & Uematsu, 2022) es para una categoría 3 (exposición suburbana) con una intensidad de 0.20, mientras que en las pruebas presentes la intensidad de turbulencia fue de 0.39.

En consideración de las diferencias mencionadas con anterioridad, en ambos casos se presentan  $C_{pn}$  cerca de la unidad en la esquina de las cubiertas donde el viento incide directamente, mientras que, en la otra esquina, se forman zonas con las succiones más desfavorables para ambos casos, considerando que en el Modelo 1 la relación ancho-largo es de 2.5 y en el de la Figura 6.42 es de 1:1.

Finalmente, se hace la comparación de  $C_{pn}$  medios obtenidos de ambos modelos analizados en este trabajo con estudios experimentales de estructuración de cubiertas curvas que se han elaborado fuera del país (Figura 6.43); en todos los casos los coeficientes de presión a comparar son considerados a lo largo del arco de los modelos.

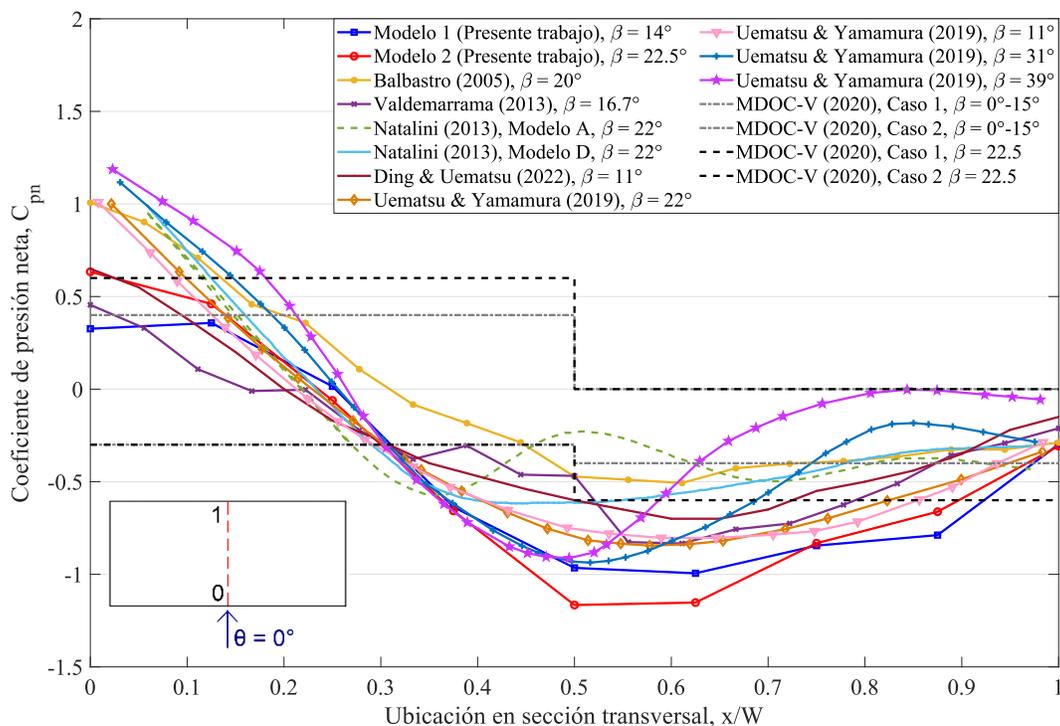


Figura 6.43 Distribuciones de los  $C_{pn}$  medios en anillo central,  $\theta=0^\circ$ : Comparación entre los experimentos en cubiertas circulares actuales y anteriores

Se grafican los  $C_{pn}$  que se contempla en el (MDOC-V, 2020) para techos aislados a dos aguas con pendiente de techo a  $15^\circ$  y  $22.5^\circ$  solo cuando  $\theta=0^\circ$  debido a que es el único ángulo mencionado en manual. Se decidió comparar los resultados obtenidos de las cubiertas curvas aisladas porque en las normativas no hay una estructuración similar que contemple el efecto de conlleva tener la cubierta aislada, es decir, para una estructuración similar a la del estudio no se considera el efecto de la presión interna.

Como se observa en la Figura 6.43 los resultados obtenidos en las pruebas de túnel de viento para ambos modelos siguen el mismo comportamiento que los presentados por diferentes autores en diferentes partes del mundo. En la mayor parte de los estudios se observan presiones en un intervalo del 0.25 a 0.30 de la distancia transversal de la cubierta ( $W$ ), y un desprendimiento de corrientes inmediatamente después. También se observa que en los modelos hay un punto de acoplamiento del flujo aproximadamente a  $x/W \approx 0.95$ .

También se observan succiones en todos los casos a partir del  $0.30W$  hasta el final de la cubierta. Algo importante de mencionar es que se tienen diferentes magnitudes de  $C_{pn}$  debidas a la consideración diferente de diversos parámetros en cada estudio como la geometría, número de Reynolds, rugosidades en la cubierta y perfil de velocidades, pero a pesar de ello, para todos los casos las succiones más altas se observan en la misma zona entre  $0.50W$  y  $0.60W$  de la cubierta.

En muchos casos prácticos para el diseño de las cubiertas curvas aisladas se toma de referencia los  $C_{pn}$  para techos aislados a dos aguas con pendiente de techo establecidos en el (MDOC-V, 2020), pero como se observa, estos  $C_{pn}$  están por debajo de los  $C_{pn}$  obtenidos en la mayoría de los estudios experimentales, sobre todo en la zona donde incurren las succiones más altas.

#### **6.4 Comparativa con investigaciones similares y en CFD**

Debido a la complejidad de realizar pruebas experimentales de estructuras en túnel de viento, y aunado que no en todas instituciones las instituciones de cada país cuentan con la infraestructura necesaria para llevar a cabo estudios de viento en modelos experimentales, hoy en día se recurre cada vez más frecuentes a técnicas de modelado numérico (CFD)

como una aproximación que combina la observación práctica con el poder del modelado computacional, permitiendo una comprensión más completa de cómo las estructuras responden a las fuerzas del viento omitiendo todo lo que conllevan realizar las pruebas experimentales.

En la Figura 6.44 se compara el Modelo 2 ( $\beta=22.5^\circ$ ) con el Modelo 14 en la investigación en (Amaya-Gallardo et al., 2021), en la cual este modelo tiene una configuración geométrica muy similar al Modelo 2, debido a que el Modelo 14 tiene un  $\beta=21.8^\circ$  y una relación de aspecto en planta de 1:2, mientras que en el Modelo 2 cuenta con 1:2.5. (Amaya-Gallardo et al., 2021) presenta una lista de las suposiciones consideradas para desarrollar las simulaciones, de las cuales algunas consideraciones son diferentes a las contempladas en el presente trabajo. En (Amaya-Gallardo et al., 2021) se considera que las cubiertas tienen una superficie lisa y una longitud de rugosidad para terreno abierto con pocos obstáculos.

En la Figura 6.44 se compara cuando el viento incide en la dirección transversal de las cubiertas  $\theta=0^\circ$ .

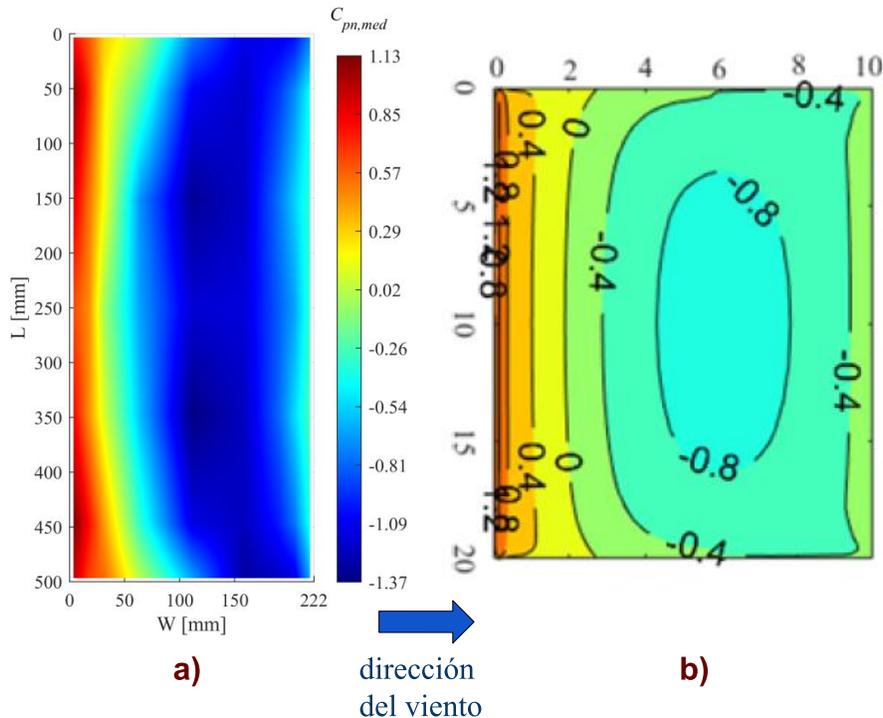


Figura 6.44 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 0^\circ$  en: a) Modelo 2, b)(Amaya-Gallardo et al., 2021)

En la Figura 6.44(b) se observan  $C_{pn}$  en presión muy cercanos a las magnitudes encontradas en el Modelo 2 que superan a la unidad, concentradas en la zona de barlovento en una distancia no mayor a  $W/5$  para ambos casos. La mayor discrepancia en las magnitudes de  $C_{pn}$  se observan en las zonas de succiones, siendo más altas las encontradas en el Modelo 2.

La distribución del flujo sobre ambas cubiertas son similares, inclusive se puede observar en ambos casos que en la zona longitudinal derecha de la estructura los  $C_{pn}$  se reducen significativamente a comparación de las magnitudes maximas que incurren en la zona central.

A continuación, en la Figura 6.45 se sigue comparando las cubiertas tanto del mismo autor como las mismas cubiertas, pero ahora para  $\theta=135^\circ$  ( $-45^\circ$ ). La distribución de las presiones sobre la cubierta es un espejo de lo que se observa en la Figura 6.42 (cuando el ángulo de incidencia es  $45^\circ$ ) y para ambos casos el comportamiento es similar.

Se logra observar que en la esquina donde incide el ángulo de análisis se alcanzan presiones muy similares para ambos casos, pero, en las zonas donde se concentran las succiones más altas hay discrepancias alrededor al 40%.

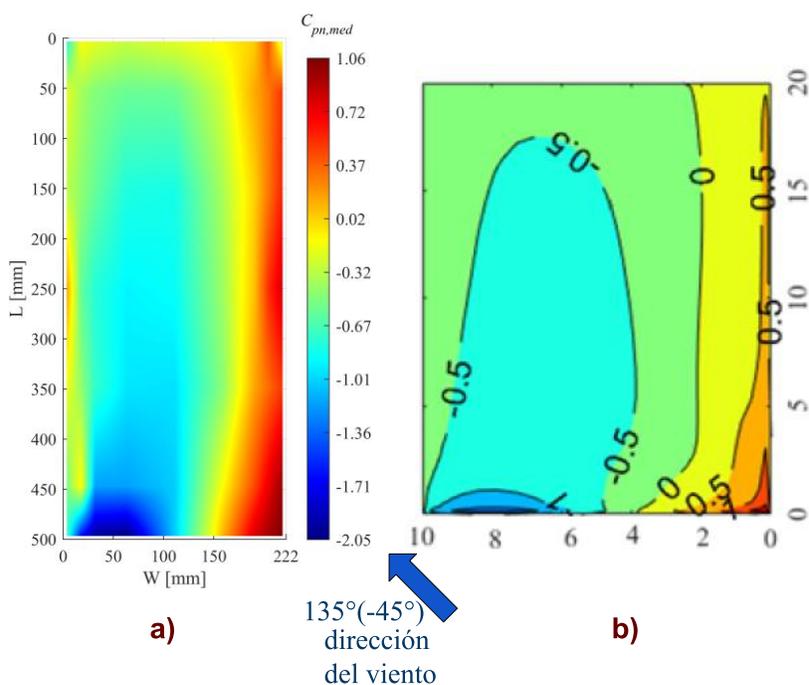


Figura 6.45 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 45^\circ$  en: a) Modelo 2, b)(Amaya-Gallardo et al., 2021)

En (Pagnini et al., 2022) la relación de aspecto de dimensiones en planta es de 1:1.25 con  $\beta=27^\circ$ , número de Reynolds en las pruebas de  $1.56 \times 10^5$  y una intensidad de turbulencia a la altura del modelo de 0.25. Las condiciones de muestreo no son las mismas pero el interés es observar las similitudes y diferencias del comportamiento de las presiones sobre la cubierta.

En la Figura 6.46 se compara el Modelo 2 con la investigación realizada en túnel de viento una cubierta circular que se construirá en un campus universitario (Pagnini et al., 2022). La comparativa con esta estructura se presenta en este apartado porque, aunque se trata de una estructura con la cubierta circular, la condición aislada no se cumple, debido está obstruido de un lateral.

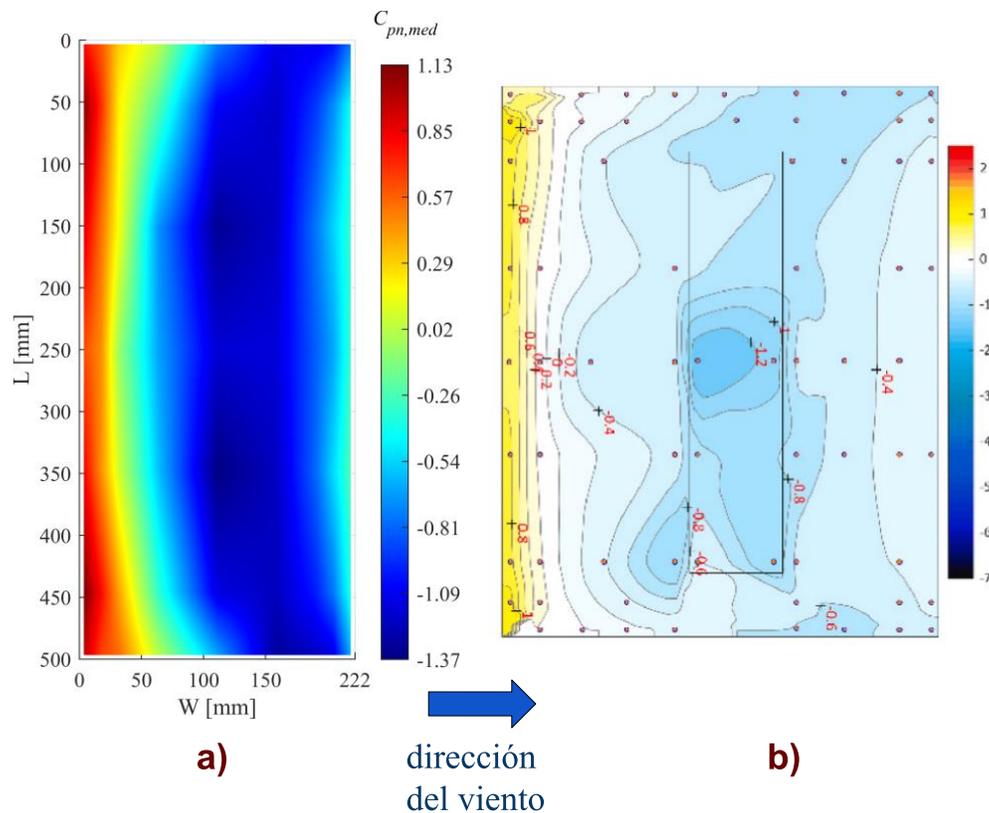


Figura 6.46 Contornos de  $C_{pn}$  medios,  $\theta = 0^\circ$  en: a) Modelo 2, b) (Pagnini et al., 2022)

Como se observa en la Figura 6.46, los  $C_{pn}$  sobre la cubierta son similares, inclusive se observa que en la parte central de la cubierta se presentan succiones altas mayores a la unidad, en ambos casos las presiones más altas no se encuentran en el centro de la longitud de la estructura, sino a los extremos.

En resumen, de las investigaciones mencionadas en este apartado, en la Figura 6.47 se grafica el comportamiento de los  $C_{pn}$  conforme se desarrolla la curva de las cubiertas circulares. Lo más importante a destacar es que todos los resultados siguen el mismo comportamiento, pero en con diferentes magnitudes debidas a las diversas consideraciones en los parámetros de análisis en cada caso.

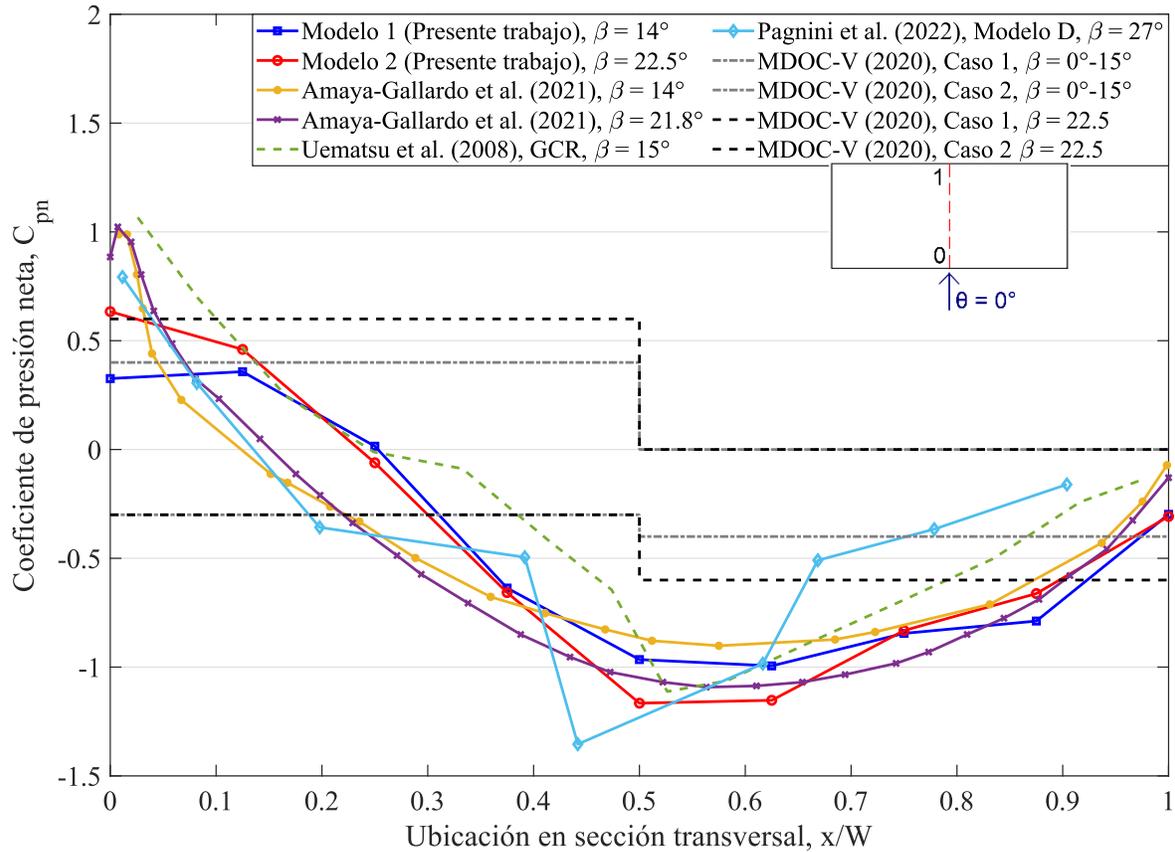


Figura 6.47 Distribuciones de los  $C_{pn}$  medios en anillo central,  $\theta = 0^\circ$ : Comparación de pruebas en cubiertas circulares en CFD y estructuraciones similares.

En un primer instante se presentan presiones y conforme se desarrolla la curvatura de la cubierta se van presentando las succiones, en la mayoría de los casos las succiones más desfavorables se presentan en el intervalo aproximado de 0.44 a 0.60 de  $x/W$ . Al igual que en la comparativa abordada con los estudios experimentales de cubiertas circulares se grafica los  $C_{pn}$  del (MDOC-V, 2020) para techos aislados a dos aguas con pendiente de techo.

En la actualidad no es posible verificar con total certeza la confiabilidad y exactitud del CFD y, por ende, ninguna norma estipula su empleo para determinar las fuerzas de viento; sin embargo, se puede emplear como complemento de las pruebas experimentales en túnel de viento, por tal motivo, esta comparativa fue otro aspecto importante para abordar en este trabajo.

Los resultados encontrados de las comparativas realizadas en los apartados 6.3 y 6.4 son muy interesantes porque son evidencias que, en cuestión del diseño de revestimientos y anclajes, conforme a los códigos existentes se está subestimando las posibles demandas que se pueden presentar en las zonas donde se concentran de manera puntual las presiones y succiones más altas.

# Capítulo 7. Propuesta de coeficientes de presión para diseño de cubiertas curvas aisladas con área libre debajo

---

A continuación, se presenta las propuestas de coeficientes de presión netos para ambos modelos, obtenidos mediante pruebas experimentales en túnel de viento para diseño por viento de estructuras con cubiertas de arco circular aisladas. Los ángulos de incidencia son de 0° y 90°, con el fin de homologar el diseño que se presentan en las normativas por viento de estructuras similares. Los  $C_{pn}$  de diseño para 0° y 90° son los resultados de analizar todos los ángulos de incidencia a las que se muestrearon en las pruebas, es decir, se contempla los efectos de las direcciones oblicuas del viento.

Una observación para destacar es que los coeficientes de presión más altos en las pruebas ocurrieron cuando el ángulo de incidencia entre 20° y 30° (160° y 150° respectivamente), los cuales están contemplados para  $\theta=0^\circ$  en las tablas de coeficientes de presión neta en cubiertas de arco circular libres debajo.

En la propuesta de los  $C_{pn}$  para cada dirección de análisis se determinaron 3 zonas de análisis: Barlovento, Central y Sotavento, considerando los códigos de diseño y la distribución de presión de los resultados obtenidos. En cada toma de presión se determinó la magnitud más desfavorable en los ángulos de incidencia comprendidos.

Para la determinación de las zonas tanto de Barlovento, Central y Sotavento (Figura 7.1 y Figura 7.2) en términos de  $C_{pn}$  medios, como para las zonas Central y Externa (Figura 7.4) para los  $C_{pn}$  máximos y mínimos, se realizó el cálculo de áreas tributarias de cada tap, mediante el método CAD (Omura, 2009) validado por (Aly, 2013) con error de al menos 1% para distribuciones regulares y simétricas. El planteamiento básicamente utiliza las coordenadas disponibles de las tomas de presión y las dimensiones de la superficie. El coeficiente de presión promediado por área para cada área tributaria se genera utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{pn,A} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pn} \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

7. Propuesta de coeficientes de presión para diseño de cubiertas curvas aisladas con área libre debajo

donde  $C_{pn,A}$  son los coeficientes de presión del viento promediados por área;  $A_i$  es el área que contribuye a la  $i$ -ésima toma de presión y  $N$  es el número de tomas de presión en el área especificada  $A$ . Los errores potenciales durante la integración se minimizan utilizando una densidad de tomas de presión alta para los modelos probados en el túnel de viento (Alrawashdeh, 2015).

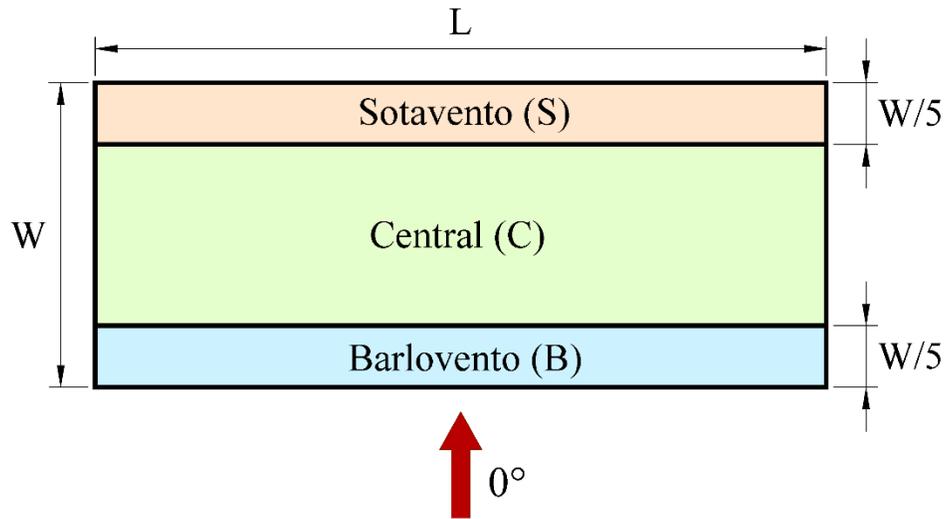


Figura 7.1 Identificación de zonas en cubierta de arco circular,  $\theta = 0^\circ$

A continuación, en la Tabla 7.1 se presentan los  $C_{pn}$  medios para el diseño de la estructura principal y secundarios de cubiertas de arco circular libres debajo de las zonas determinadas para una incidencia del viento perpendicular a las generatrices de la cubierta (Figura 7.1).

Tabla 7.1 Coeficientes de presión neta medios,  $\theta = 0^\circ$

Característica	Caso	Coeficiente de presión neta ( $C_{pn}$ )		
		Zona barlovento (B)	Zona central (C)	Zona sotavento (S)
Modelo 1 $V/W = 0.13$	1	0	-0.95	-0.85
	2	0.65	0	0
Modelo 2 $V/W = 0.21$	1	0	-1.15	-1.20
	2	0.95	0	0

En la Figura 7.2 se muestran las zonas de Barlovento, Central y Sotavento cuando el ángulo de incidencia del viento es paralelo a las generatrices de la cubierta ( $\theta = 90^\circ$ ).

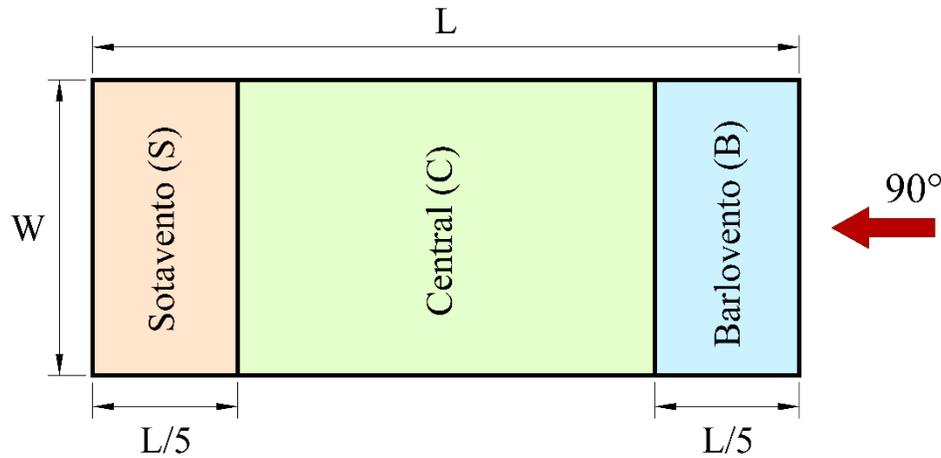


Figura 7.2 Identificación de zonas en cubierta de arco circular,  $\theta = 90^\circ$

En la Tabla 7.2 se muestra los valores de los  $C_{pn}$  de las zonas identificadas en la Figura 7.2 para  $\theta=90^\circ$ .

Tabla 7.2 Coeficientes de presión neta medios,  $\theta = 90^\circ$

Característica	Caso	Coeficiente de presión neta ( $C_{pn}$ )		
		Zona barlovento (B)	Zona central (C)	Zona sotavento (S)
Modelo 1 $V/W = 0.13$	1	-0.65	-0.45	-0.35
	2	0.50	0.25	0.15
Modelo 2 $V/W = 0.21$	1	-0.65	-0.55	-0.35
	2	0.70	0.30	0.20

En la Figura 7.3 se grafican los  $C_{pn}$  de diseño en el anillo central para el ángulo de incidencia de  $0^\circ$ ; se comparan con los  $C_{pn}$  que se contempla en el MDOC-V (2020) para techos aislados a dos aguas con pendiente de techo a  $15^\circ$  y  $22.5^\circ$  por las razones antes mencionadas.

Se observa que los  $C_{pn}$  para diseño de estructuras con cubiertas de arco circular libres debajo son más conservadores con los disponibles para una cubierta con similar condición, sobre todo para las zonas donde ocurren las succiones (zona central y sotavento).

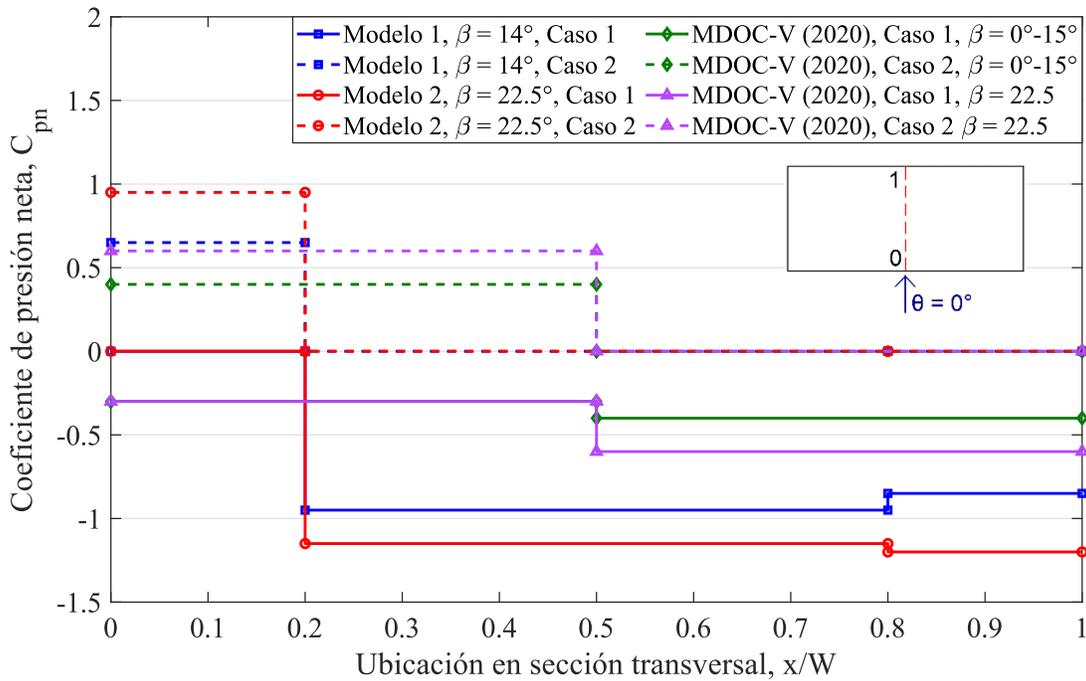


Figura 7.3 Distribuciones de  $C_{pn}$  de diseño en anillo central,  $\theta=0^\circ$ : Comparación con  $C_{pn}$  para techos aislados a dos aguas

Los coeficientes de presión pico positivo y negativo promediados por área se toma como la media de los 10 valores más altos y pequeños encontrados dentro de la historia en el tiempo de coeficientes de presión. Este enfoque se ha considerado una buena aproximación al valor de moda de la distribución detallada de valores extremos y se ha utilizado en estudios anteriores en túneles de viento (Elsharawy et al., 2014).

La carga de viento de diseño elementos de recubrimiento de cubierta y el sistema de sujeción incluye tanto los coeficientes de presión pico locales (por ejemplo, las cargas de viento en áreas pequeñas como los elementos de fijación con pequeñas áreas tributarias) como los coeficientes de presión de viento promediados por área para las cargas de viento de diseño en grandes áreas (por ejemplo, las cargas de viento en la estructura principal).

En la Figura 7.4 se identifica la zona central y la zona externa para los elementos de recubrimiento y sistema de sujeción en cubiertas curvas, para ambos ángulos de incidencia ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) las zonas de afectación son las mismas.

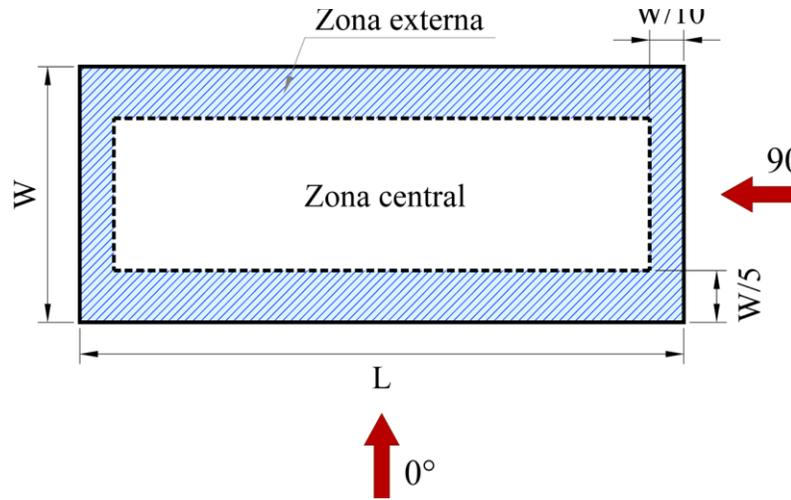


Figura 7.4 Identificación de zonas para elementos de recubrimiento en cubierta de arco circular,  $\theta=0^\circ$  y  $\theta=90^\circ$

Por lo tanto, el alcance de este estudio no se limita únicamente a la propuesta de  $C_{pn}$  para diseño de la estructura principal y secundaria de las cubiertas de arco circular libres debajo, sino que incluye coeficientes de presión neta para diseño del recubrimiento de cubierta y el sistema de sujeción de los recubrimientos (anclajes).

Para el diseño de los elementos de recubrimiento de cubierta y el sistema de sujeción de los recubrimientos de estructuras similares, tanto en el MDOC-V (2020) como en la NTC-Viento (2023), los coeficientes de presión neta se afectan por un factor de presión local, dependiendo de la zona podría adoptar un valor desde 1.5 hasta 3, mientras que en este estudio se obtuvieron valores de empuje en la zona externa para  $\theta=0^\circ$  de 4.60 y valores de succión en la zona central también cuando  $\theta=0^\circ$  de -4.60, ambos casos para el Modelo 2.

En este estudio se brindan directamente los coeficientes de presión neta máximos y mínimos para diseño del recubrimiento de cubierta y el sistema de sujeción de los recubrimientos (anclajes) que se encuentran en las zonas de afectación del viento (Figura 7.4) en cubiertas curvas libres debajo.

7. Propuesta de coeficientes de presión para diseño de cubiertas curvas aisladas con área libre debajo

En la Tabla 7.3 y Tabla 7.4 se presentan los valores de los  $C_{pn}$  para el diseño de anclajes y recubrimientos cuando el viento incide a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , respectivamente.

Tabla 7.3 Coeficientes de presión neta máximos y mínimos,  $\theta = 0^\circ$

Característica	Caso	Coeficiente de presión neta ( $C_{pn}$ )	
		Zona central	Zona externa
Modelo 1 $V/W = 0.13$	1	-3.30	-3.70
	2	1.30	4.60
Modelo 2 $V/W = 0.21$	1	-4.60	-4.40
	2	1.40	4.60

Tabla 7.4 Coeficientes de presión neta máximos y mínimos,  $\theta = 90^\circ$

Característica	Caso	Coeficiente de presión neta ( $C_{pn}$ )	
		Zona central	Zona externa
Modelo 1 $V/W = 0.13$	1	-2.40	-3.10
	2	1.80	4.20
Modelo 2 $V/W = 0.21$	1	-3.50	-3.50
	2	1.50	4.00

Los valores de los coeficientes de presión neta máximos y mínimos resultado de las pruebas experimentales son mayores a los de  $C_{pn}$  que se tienen actualmente para el diseño de elementos de recubrimientos en la normativa mexicana para estructuras similares, inclusive para los valores límites de  $C_{pe}$  que se tienen para elementos de recubrimiento en cubiertas cerradas de arco, por lo tanto, se concluye que en el diseño de este tipo de estructuras para el sistema de recubrimiento de cubierta y sujeción de los recubrimientos no se estaría cumpliendo con los efectos más desfavorables que el viento pudiera llegar a ocasionar en eventos meteorológicos extraordinarios.

## Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

---

En términos generales, al finalizar este estudio, se logran los objetivos establecidos al realizar pruebas en un túnel de viento para los dos modelos a escala de cubiertas curvas soportadas por columnas, con el fin particular de obtener coeficientes de presión totales para el diseño.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados obtenidos y la normativa mexicana de diseño por viento, así como investigaciones similares relacionadas con esta tipología de nave industrial desarrolladas fuera del país. Después de analizar estas comparativas, se concluye que los resultados representan adecuadamente el comportamiento del viento sobre este tipo de estructuras. A pesar de las diferencias observadas en las distintas literaturas, se considera que los resultados obtenidos son fiables para las condiciones específicas del flujo en las que se realizaron las pruebas experimentales debido a que concuerdan con el comportamiento presentado en investigaciones anteriores sobre el mismo tipo estructuras.

Finalmente, se proponen coeficientes de presión neta para diseño de la cubierta de naves industriales tipo arco circular aisladas. Estos coeficientes proporcionarán un criterio práctico para los ingenieros, contribuyendo a garantizar la seguridad en el diseño de estas estructuras.

### 8.1 Conclusiones

Las pruebas efectuadas en un túnel de viento representan la alternativa más fiable para adquirir coeficientes de presión que afectan a las estructuras, no obstante, es fundamental tener en cuenta los diversos parámetros de muestreo como; la adecuada simulación del flujo de viento y la precisa elaboración de los modelos. Estos factores son esenciales para asegurar la obtención de resultados confiables y aplicables a situaciones reales.

Se deduce que las pruebas en túnel de viento tienen un costo económico y conlleva más tiempo que otras alternativas existentes que tienen el mismo propósito, como la Mecánica de Fluidos Computacional; sin embargo, ninguna norma la emplea para determinar las fuerzas de viento.

Al comparar los resultados obtenidos con la normativa mexicana actual para el diseño de estructuras similares sometidas a fuerzas del viento (MDOC-V, 2020; NTC-Viento, 2023), se observa una considerable variación en la magnitud de los coeficientes de presión en comparación con los establecidos para naves industriales a dos aguas con techo aislado. Estas diferencias reafirman la necesidad de realizar investigaciones más extensas y detalladas en esta área.

Con base a los resultados obtenidos se concluye que los coeficientes de presión son más desfavorables en succión, debido a la interacción de las fuerzas internas y externas que actúan sobre una cubierta curva. La zona externa es la más afectada, debido a en esas zonas se originan vórtices en las esquinas y áreas perimetrales de la cubierta, que a su vez genera una sobrepresión localmente.

La propuesta de los coeficientes de presión neta de diseño representa un ejemplo significativo del comportamiento del viento en una nave industrial con cubiertas curvas aisladas, basado en condiciones determinadas. Estos coeficientes no solo constituyen una base para investigaciones posteriores, sino que también proporcionan un punto de referencia para comprender cómo la interacción de presiones internas y externas afecta las cubiertas de este tipo de estructuras, asimismo, se brinda a los ingenieros civiles una base más sólida para respaldar sus decisiones en la práctica.

## **8.2 Recomendaciones**

Debido al enfoque experimental, es esencial comprender las variables involucradas en este estudio. Esto implica tener conocimiento detallado del funcionamiento del túnel de viento y sus componentes, así como de los instrumentos utilizados, incluyendo la rugosidad y la generación de turbulencia. Además, la construcción de modelos de naves industriales requiere habilidades adicionales y cuidado en la instrumentación para evitar lecturas incorrectas. Se recomienda precaución durante la fabricación e instrumentación de los modelos.

En referencia al análisis de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, se aconseja realizar una revisión minuciosa en todas las etapas de cada prueba, ya que los

errores en la calibración del programa de adquisición de datos pueden llevar a lecturas incorrectas.

Se recomienda el uso de programas especializados para el tratamiento eficiente de los datos, evitando errores que puedan alterar los resultados.

Es importante profundizar en los conocimientos previos sobre el comportamiento del viento en estructuras civiles en México, ya que existen variaciones sustanciales en las variables estudiadas en distintos países. Aunque el país está en una etapa temprana en investigaciones sobre los efectos del viento en estructuras, el interés de estudiantes e investigadores puede contribuir eventualmente a un conocimiento extenso, comparado con países desarrollados en la materia.

### **8.3 Trabajos futuros**

Aumentar la cantidad de modelos experimentales, obteniendo un intervalo más amplio de los ángulos de inclinación del arco de la cubierta y de las relaciones geométricas de las cubiertas, con la finalidad de estudiar los efectos que estos parámetros inciden en la distribución de presiones sobre la cubierta. Contando con un aumento en la cantidad de modelos experimentales, es recomendable realizar pruebas experimentales llevando a cabo la caracterización de las 4 categorías de terreno presentes en el territorio mexicano, con el objetivo primordial de anexar una nueva sección de esta tipología de estructuras en la normativa mexicana.

Estudiar en pruebas de túnel de viento los efectos de proximidad que pueden incidir en estructuras con cubiertas curvas aisladas, es decir, estudiar cuando la estructura se encuentre adyacente a una construcción cerrada, expuestas a condiciones de alta turbulencia, debido que, en esas condiciones, los  $C_{pn}$  obtenidos en estas pruebas no son representativos.

Estudiar en pruebas de túnel de viento en estructuras con cubiertas curvas aisladas los efectos en condición obstruida debajo; en el ámbito ingenieril y académico se considera importante revisar su comportamiento ante esta condición adicional que el viento pudiera genera a las cubiertas.

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Referencias

---

- Alrawashdeh, H. (2015). *Wind pressures on flat roof edges and corners of large low buildings* [Concordia University]. <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/980473/>
- Aly, A. M. (2013). Proposed approach for determination of tributary areas for scattered pressure taps. *Wind and Structures, An International Journal*, 16(6), 617–627. <https://doi.org/10.12989/was.2013.16.6.617>
- Amaya Gallardo, E., Pozos Estrada, A., & Gómez Martínez, R. (2019). Base de datos aerodinámica para diseño estructural. *Serie Investigación y desarrollo*. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/DetallePublicacion.aspx?id=5181>
- Amaya-Gallardo, E., Pozos-Estrada, A., & Gómez, R. (2021). RANS Simulation of wind loading on vaulted canopy roofs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(12), 4814–4833. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0246-z>
- Araujo, M. E. (2023, febrero 17). Domo de unidad deportiva en Chiapas colapsó y dejó 10 menores heridos. *Infobae*. <https://www.infobae.com/mexico/2023/02/18/domo-de-unidad-deportiva-en-chiapas-colapso-y-dejo-10-menores-heridos/>
- ASCE 7. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-22). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>
- ASCE 49. (2021). Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. En *ASCE Standard* (ASCE/SEI 49-21). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415740>
- ASCE 67. (1999). *Wind tunnel studies of buildings and structures* (ASCE 67-1999). Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67. American Society of Civil Engineers.
- AS/NZS 1170.2. (2011). *Australian/New Zealand Standard. Structural design actions - Part 2: Wind actions*. Standards Australia Limited/Standards New Zealand.
- Balbastro, G. C. (2009). *Coeficiente de presión en cubiertas abovedadas aisladas sometidas a la acción del viento* [Universidad Tecnológica Nacional]. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/cimec-repo/article/view/2667>
- Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2007). Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD. *Mecánica Computacional*, 44, 3779–3787. <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/1377/1326>
- Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2011). Efecto del viento en cubiertas curvas aisladas con obstrucciones. *Mecánica Computacional*, 30(34), 2599–2607. <http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3938>

- Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2012). The use of CFD to study wind pressures on curve roofs without walls. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2011.11.003>
- Balbastro, G. C., Sonzogni, V. E., & Franck, G. (2005). Simulación numérica del viento sobre una cubierta abovedada. *Mecánica Computacional*, 24, 1261–1278. <http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/98/86>
- Balbastro, G. C., Sonzogni, V. E., Franck, G., & Storti, M. (2004). Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: Simulación numérica. *Mecánica Computacional*, 23, 2079–2095. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/373/360>
- Balbastro, G., & Sonzogni, V. (2006). Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas. *Memorias de XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*.
- Berg, R. (2022). *Hurricane Rick*. [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP172021\\_Rick.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP172021_Rick.pdf)
- Blessmann, J. (1982). The boundary layer tv-2 wind tunnel of the UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10(2), 231–248. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(82\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0167-6105(82)90066-6)
- Bravo Lujano, C. (2014). *Reseña del huracán “Odile” del Océano Pacífico*.
- Comisión Federal de Electricidad, & Instituto de Investigaciones Eléctricas. (2020). *Manual de diseño de obras civiles “Diseño por viento”*.
- Counihan, J. (1969). An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 3, 197–214. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(69\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(69)90008-0)
- Counihan, J. (1973). Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 7, 673–689. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90150-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90150-9)
- Demartino, C., & Ricciardelli, F. (2017). Aerodynamics of nominally circular cylinders: A review of experimental results for Civil Engineering applications. En *Engineering Structures* (Vol. 137, pp. 76–114). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.023>
- Ding, W., & Uematsu, Y. (2022). Discussion of design wind loads on a vaulted free roof. *Wind*, 2(3), 479–494. <https://doi.org/10.3390/wind2030026>
- Duarte Ribeiro, J. L. (1991). Effects of surface roughness on the two-dimensional flow past circular cylinders II: fluctuating forces and pressures. En *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (Vol. 37). [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(91\)90015-O](https://doi.org/10.1016/0167-6105(91)90015-O)
- Elsharawy, M., Galal, K., & Stathopoulos, T. (2014). Comparison of wind tunnel measurements with NBCC 2010 wind-induced torsion provisions for low- and medium-rise buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(5), 409–420. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0239>

- ESDU 85020. (2001). *Characteristics of atmospheric turbulence near the ground Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)*. ESDU Series on Wind Engineering.
- Eurocódigo 1. (1998). *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2023). *Normas técnicas complementarias para diseño por viento*. <https://smie.com.mx/smie-2022/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-diseno-viento-2017.pdf>
- García, A. (2023, febrero 20). El domo de Motozintla aún sin ser levantado, FGE realizará investigaciones. *Diario del sur*. <https://www.diariodelsur.com.mx/local/domo-de-motozintla-colapsado-esperan-investigaciones-por-parte-de-la-fge-9650187.html>
- Holmes, J. D. (1994). Wind pressures on tropical trousing. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 53, 105–123. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90021-3)
- Holmes, J. D. (2015). *Wind loading of structures* (3a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18029>
- Irminger, J. O. V., & Nökkentved, C. (1936). *Wind-pressure on Buildings: Experimental Researches* (2a ed.). Danmarks naturvidenskabelige samfund.
- Irwin, H. P. A. H. (1981). The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361–366. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90058-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90058-1)
- Krishna, P. (1995). Wind loads on low rise buildings - A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 383–396. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00055-I](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00055-I)
- Magaña, E. (2021, octubre 28). El huracán Rick provocó daños en la infraestructura. *Diario abc de Zihuatanejo*. <https://abcdezihuatanejo.com/unidad-deportiva-de-zihuatanejo-permanecera-cerrada-hasta-nuevo-aviso/>
- Mai, H. (2015, noviembre). *tunnel testing*. All Sensors Corporation. <https://allsensors.com/blog/tag/tunnel-testing/>
- Marighetti, J. O., Canavesio, O., Natalini, B., & Natalini, M. B. (2002). Comparación entre coeficientes de presión media en cubiertas aisladas planas y curvas. *Memorias de las XVII Jornadas Argentina de Ingeniería Estructural*.
- Martínez Valderrama, J. C. (2017). *Estudio experimental de los efectos del viento en una nave industrial con cubierta tipo arco, considerando diferentes rugosidades en la cubierta* [Universidad Nacional Autónoma De México]. <http://132.248.9.195/ptd2017/septiembre/0764707/Index.html>

- Mehta, K. C., Levitan, M. L., Iverson, R. E., & McDonald, J. R. (1992). Roof corner pressures measured in the field on a low building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 181–192. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90408-3)
- Meseguer Ruiz, J., Sanz Andrés, Á., Perales Perales, J. M., & Pindado Carrión, S. (2001). *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*. McGraw-Hill Profesional.
- Murià Vila, D., Chávez Cano, M. M., García Arróliga, N. M., Jaimes Téllez, M. Á., López López, A., Nava Sánchez, S., Peña Mondragón, F., Pérez Gavilán Escalante, J. J., Pozos Estrada, A., Sánchez Sesma, J., & Reinoso Angulo, E. (2015, octubre). El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California. *Serie Investigación y desarrollo*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2107.5282>
- Natalini, M. B. (2005). *Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas*. Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas.
- Natalini, M. B., Canavesio, O., Natalini, B., & Paluch, M. J. (2001, junio). Wind tunnel modelling of mean pressures on curved canopy roofs. *Proceeding of the Americas conference on wind engineering*.
- Natalini, M. B., Canavesio, O., Natalini, B., & Paluch, M. J. (2002). Pressure distribution on curved canopy roof. *Proceedings of the Second International Symposium on Advances in Wind and Structures*.
- Natalini, M. B., Morel, C., & Natalini, B. (2013). Mean loads on vaulted canopy roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 119, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.05.001>
- Nava-González, R. (2019). *Comparación de los efectos del viento en un edificio esbelto: Metodología analítica vs metodología experimental en túnel de viento* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2019/agosto/0793454/Index.html>
- Niemann, H.-J., & Holscher, N. (1990). A review of recent experiments on the flow past circular cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197–209. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90035-B](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90035-B)
- Okada, H., & Ha, Y.-C. (1992). Comparison of Wind Tunnel and Full-Scale Pressure Measurement Tests on the Texas Tech Building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1601–1612. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90375-K](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90375-K)
- Omura, G. (2009). *Mastering AutoCAD 2010 and AutoCAD LT 2010* (1a ed.). Wiley Publishing, Inc.
- Pagnini, L., Torre, S., Freda, A., & Piccardo, G. (2022). Wind pressure measurements on a vaulted canopy roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104934>

- 
- Patiño Eliut. (2021, octubre 27). Cierran unidad deportiva de Zihuatanejo; abrirá el 29 de octubre. *Meganoticias*. <https://www.meganoticias.mx/ixtapa-zihuatanejo/noticia/cierran-unidad-deportiva-de-zihuatanejo-abrira-el-29-de-octubre/281936>
- Pozos Estrada, A., Amaya Gallardo, E., & Velázquez Santiago, M. (2020). *Estudio analítico para determinar la distribución de presiones inducidas por el viento sobre cubiertas curvas soportadas por columnas*.
- Pozos Estrada, A., & Gómez Martínez, R. (2010). *Apuntes de clase: Ingeniería de Viento*.
- Sachs, P. (1978). *Wind forces in engineering* (2a ed.). Pergamon Press.
- Simiu, E., & Scandan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures: An introduction to wind engineering* (3a ed.). John Wiley & Sons.
- The MathWorks Inc. (2022). *MATLAB versión: 9.13.0 (R2022b)*. The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
- Uematsu, Y., & Yamamura, R. (2019). Wind loads for designing the main wind-force resisting systems of cylindrical free-standing canopy roofs. *Czasopismo Techniczne*, 7, 125–136. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.19.076.10727>

*- Página intencionalmente en blanco -*



*- Página intencionalmente en blanco -*

## Anexo A. Gráficas de contorno del Modelo 1 ( $\beta = 14^\circ$ )

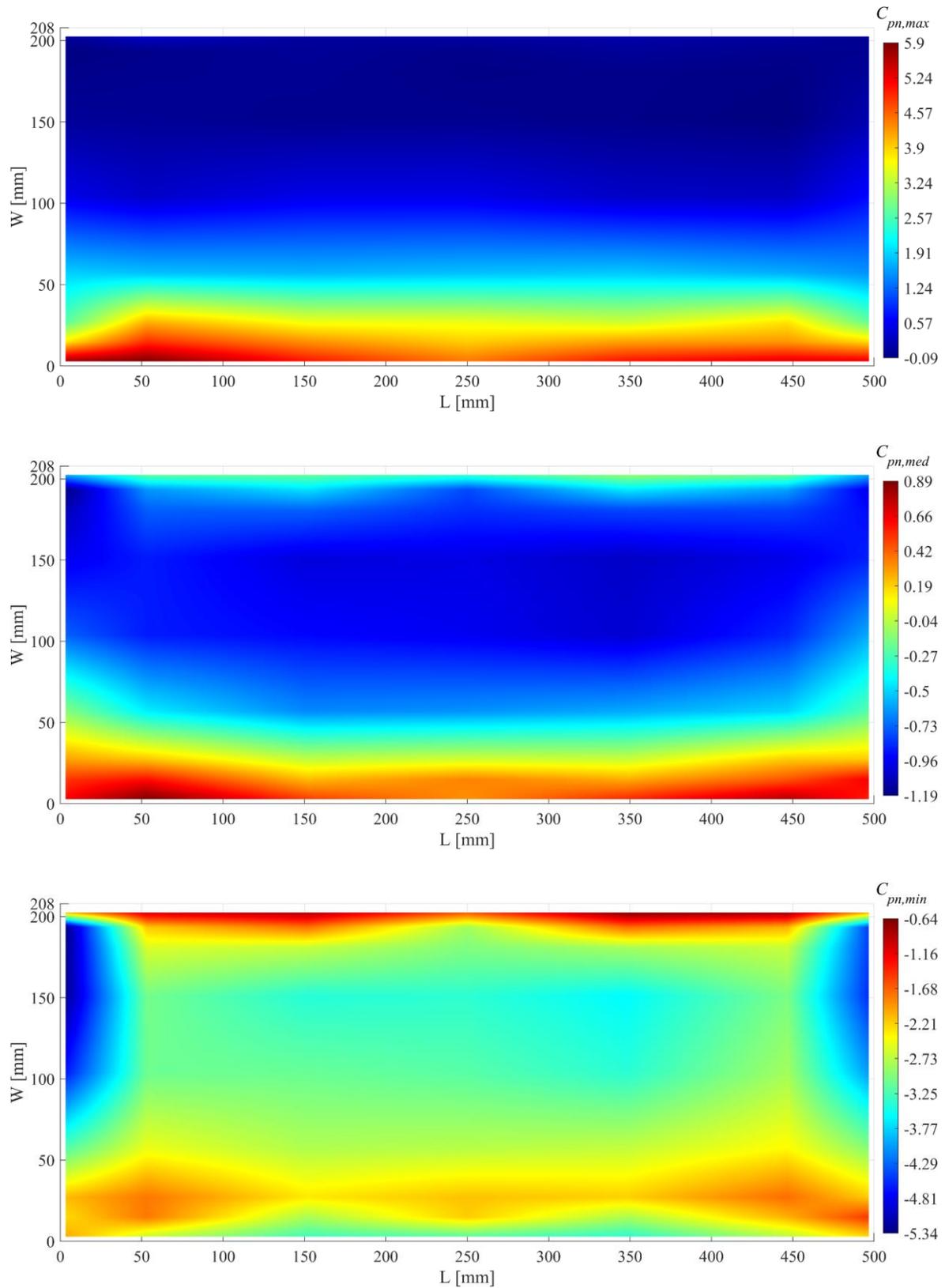


Figura A.1 Coeficientes de presión para  $\theta = 0^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

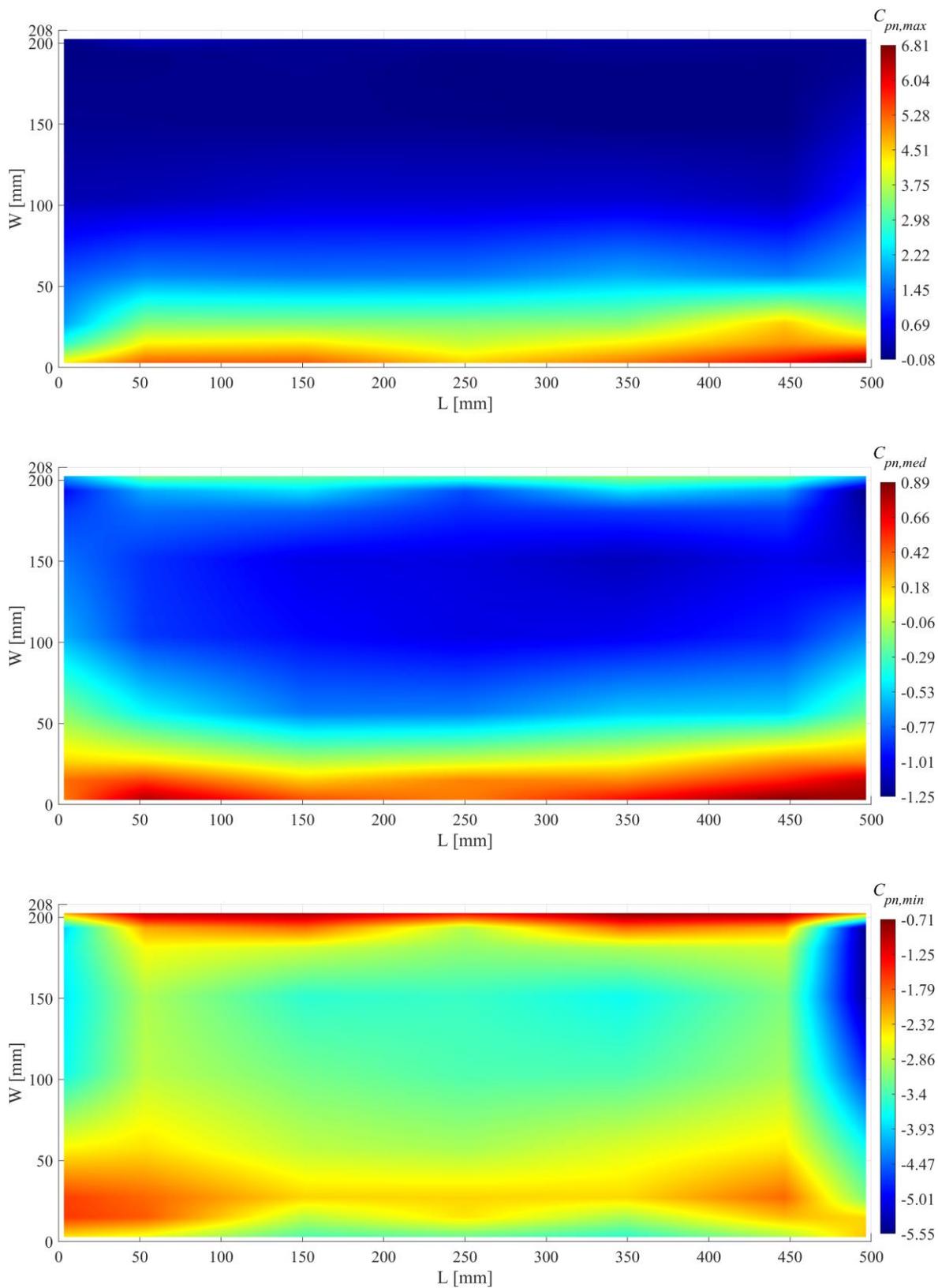


Figura A.2 Coeficientes de presión para  $\theta = 10^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

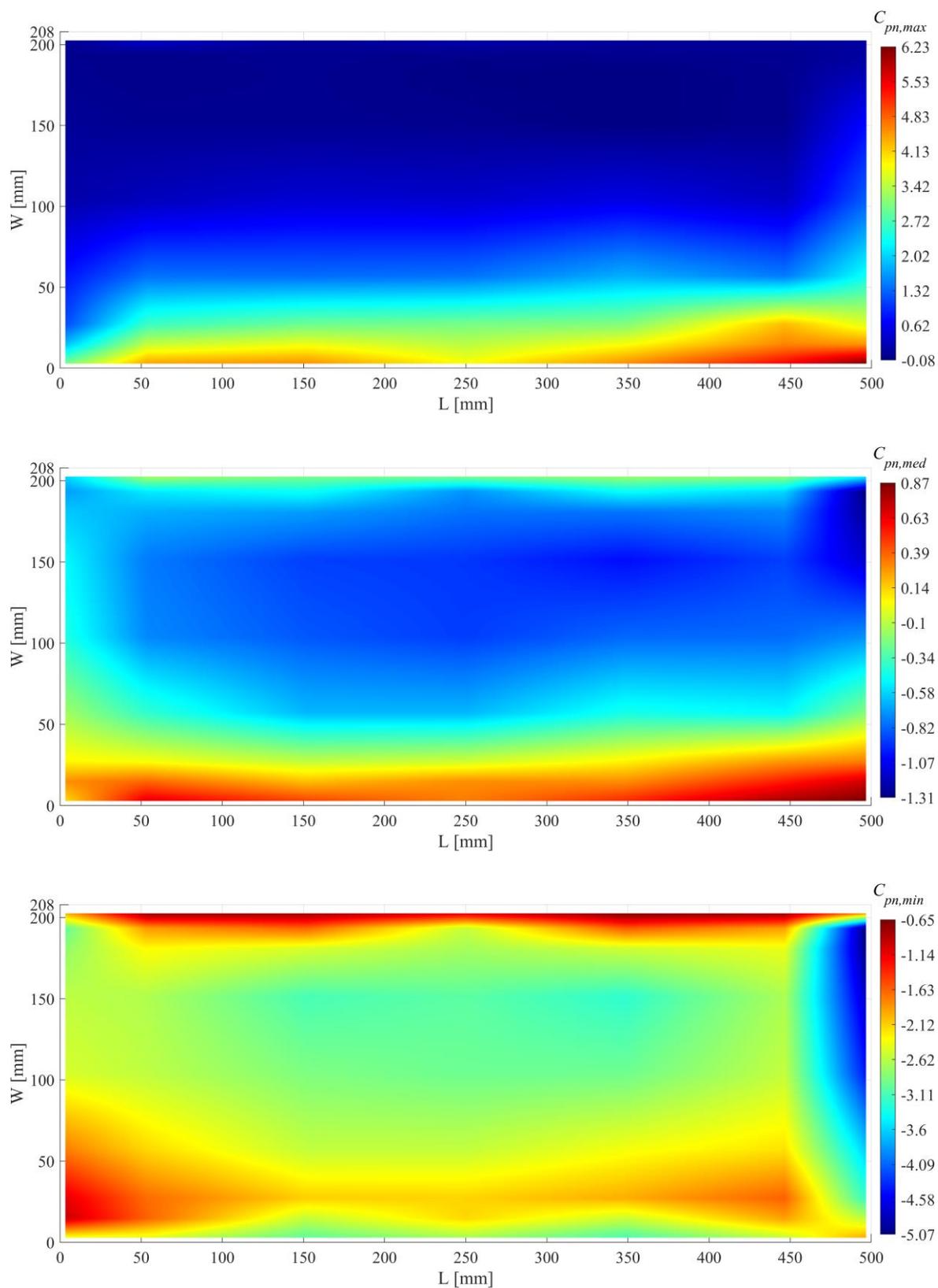


Figura A.3 Coeficientes de presión para  $\theta = 20^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

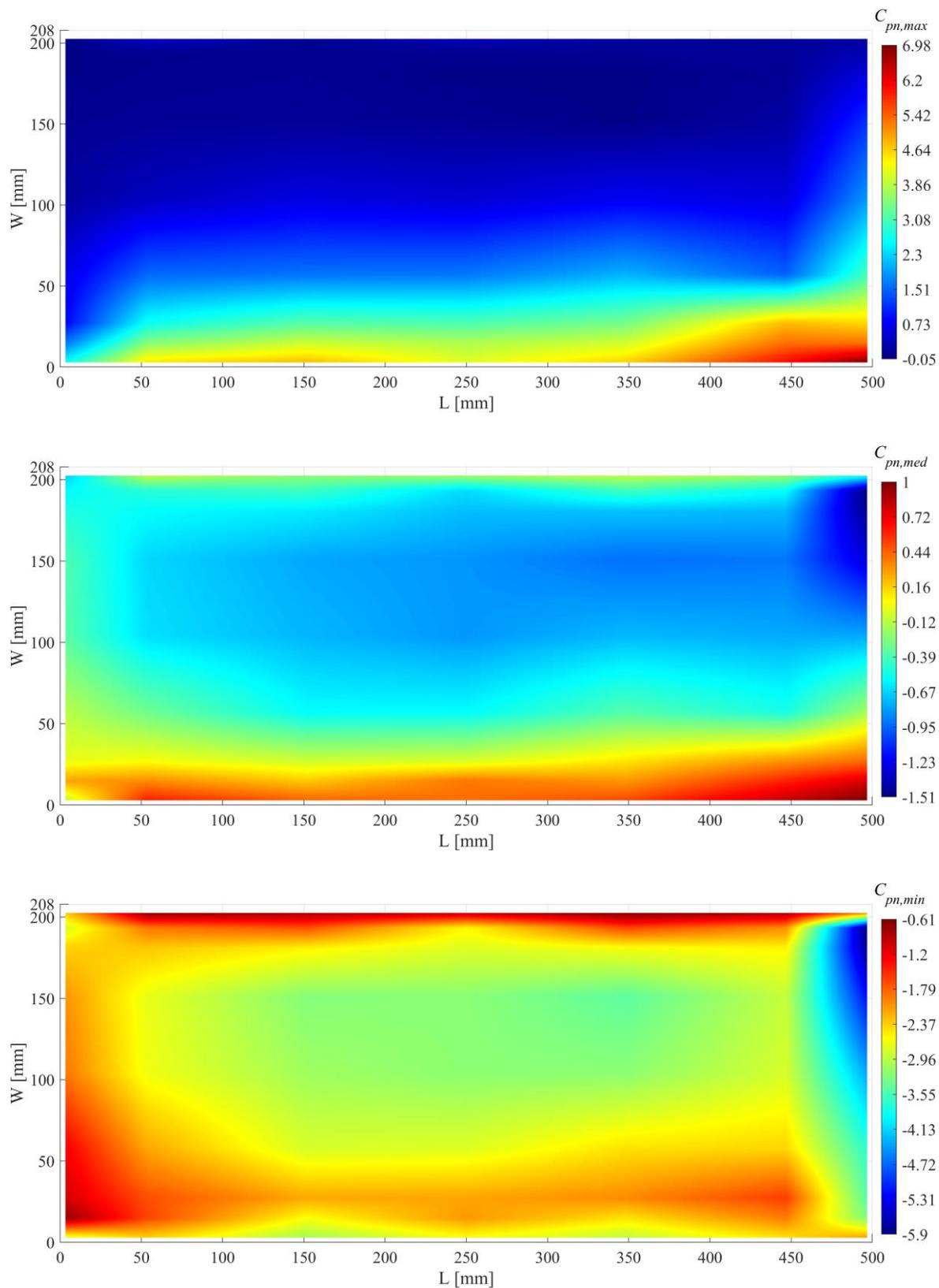


Figura A.4 Coeficientes de presión para  $\theta = 30^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

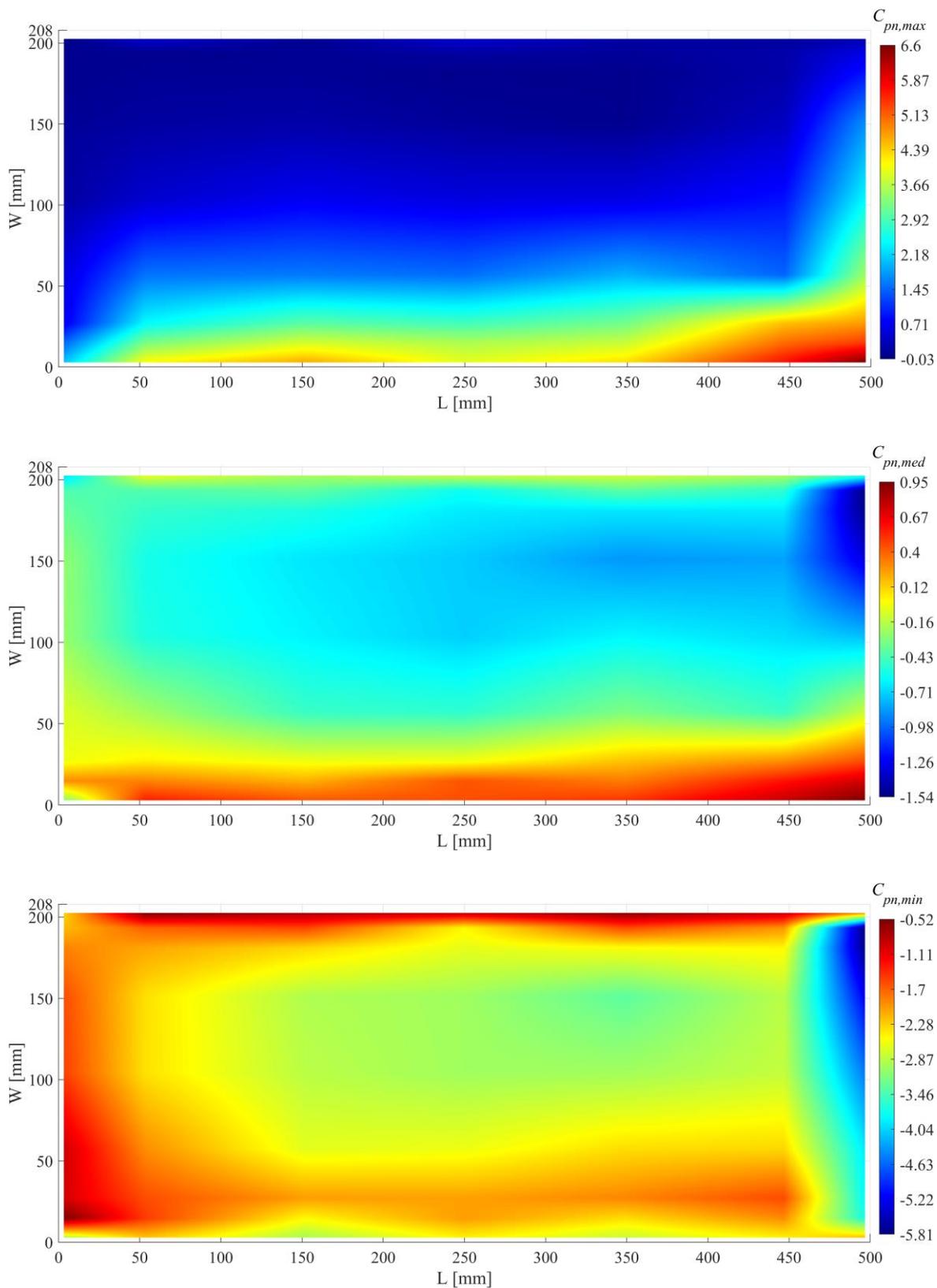


Figura A.5 Coeficientes de presión para  $\theta = 40^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

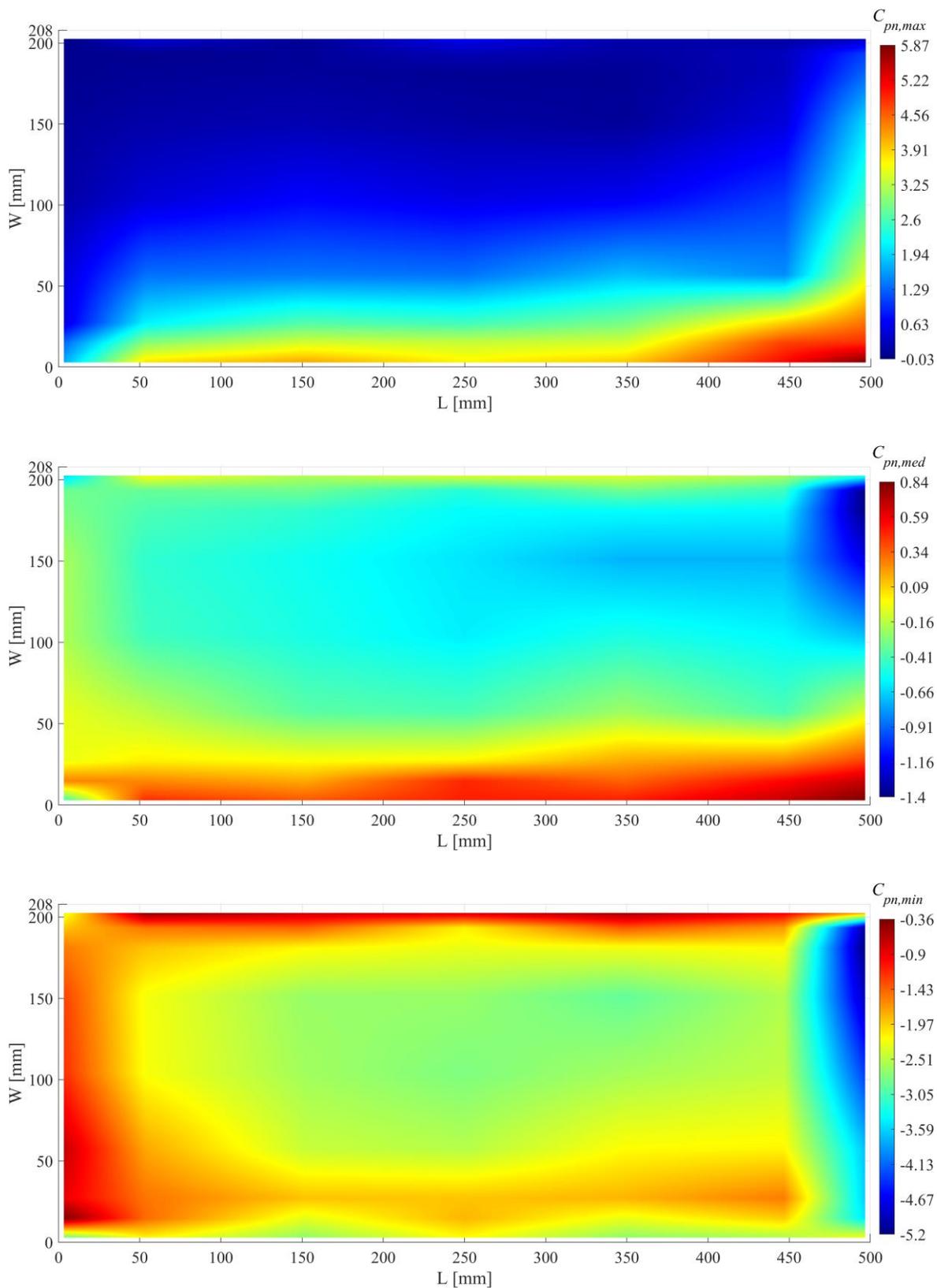


Figura A.6 Coeficientes de presión para  $\theta = 45^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

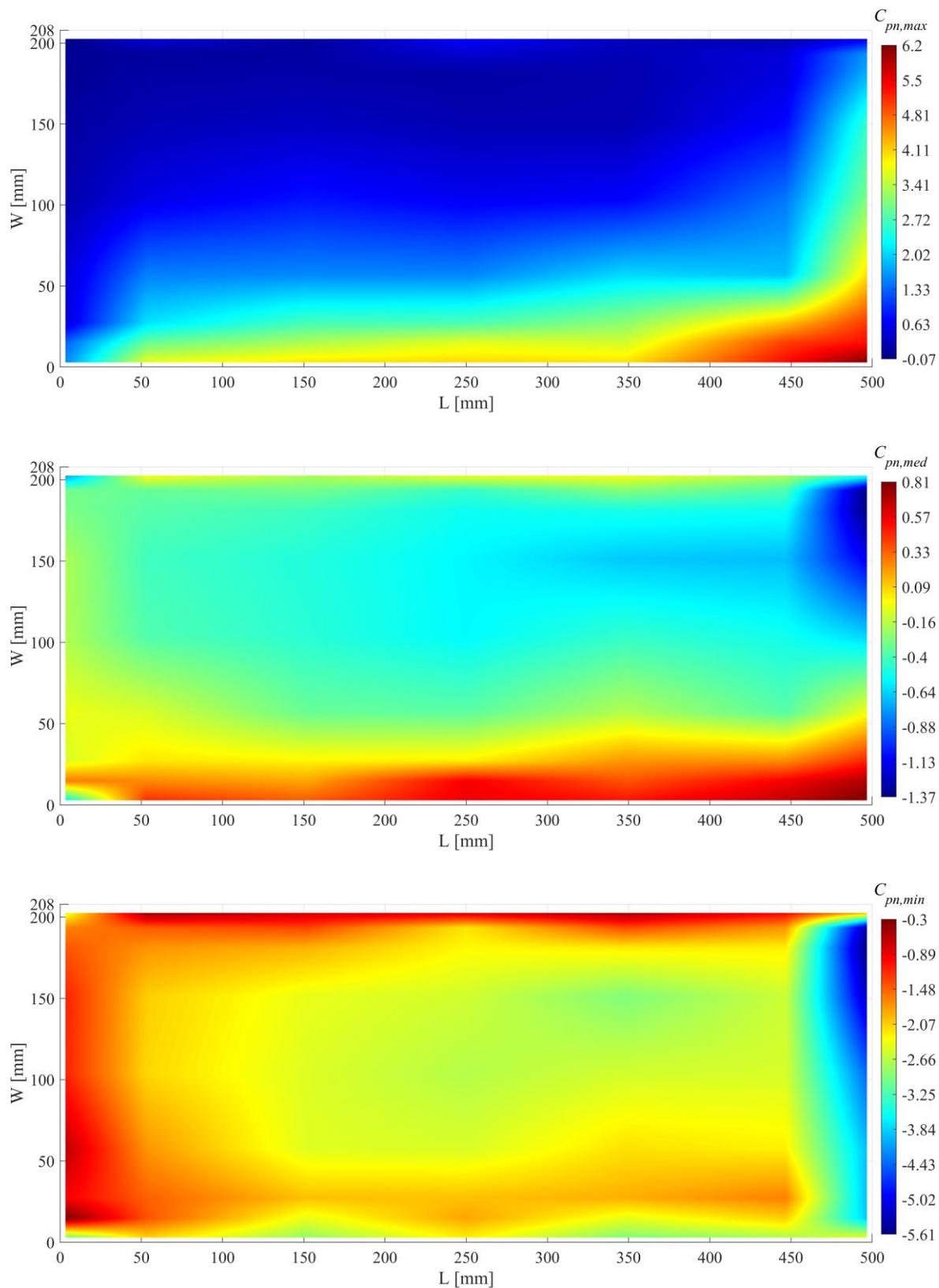


Figura A.7 Coeficientes de presión para  $\theta = 50^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

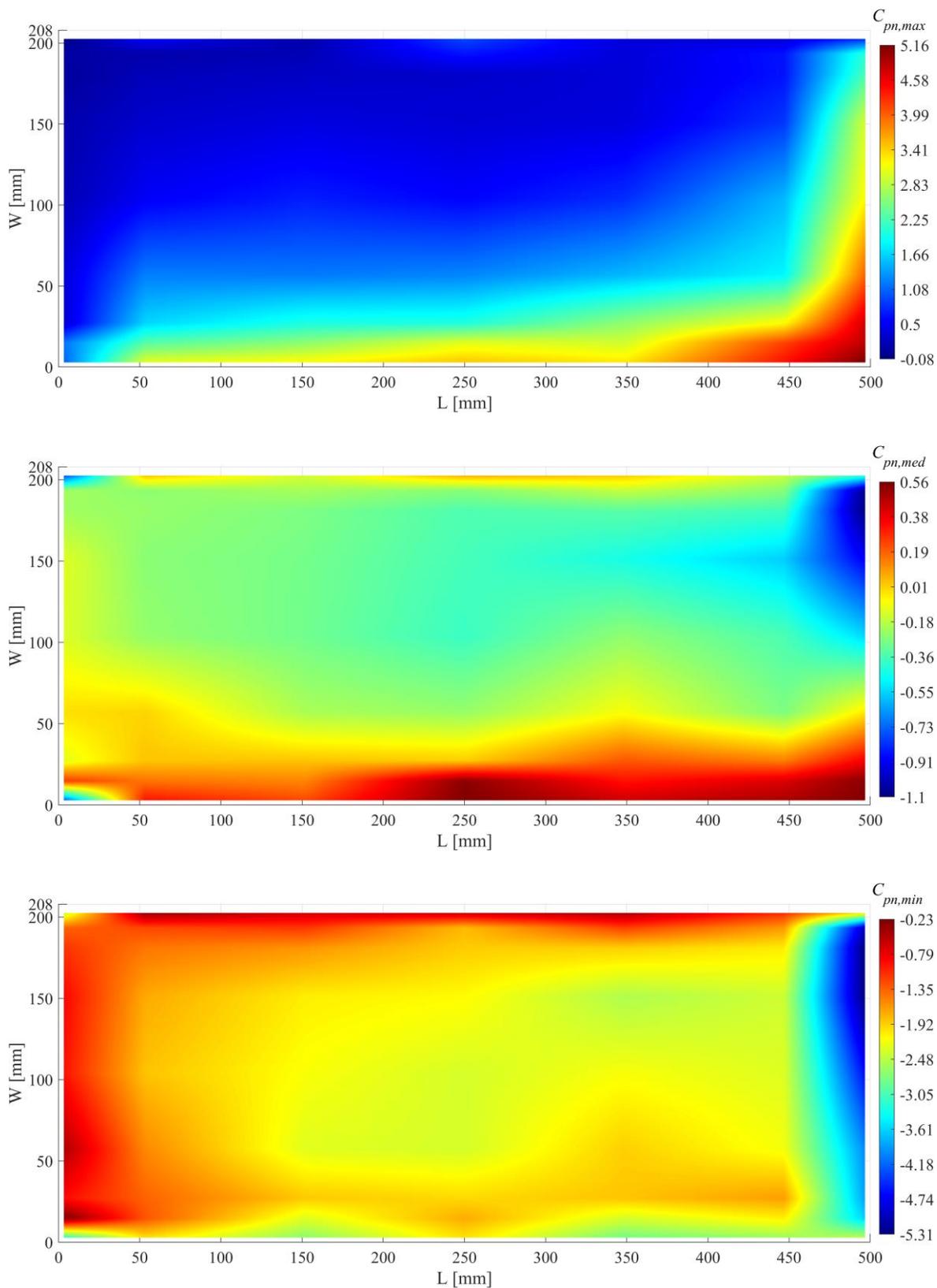


Figura A.8 Coeficientes de presión para  $\theta = 60^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

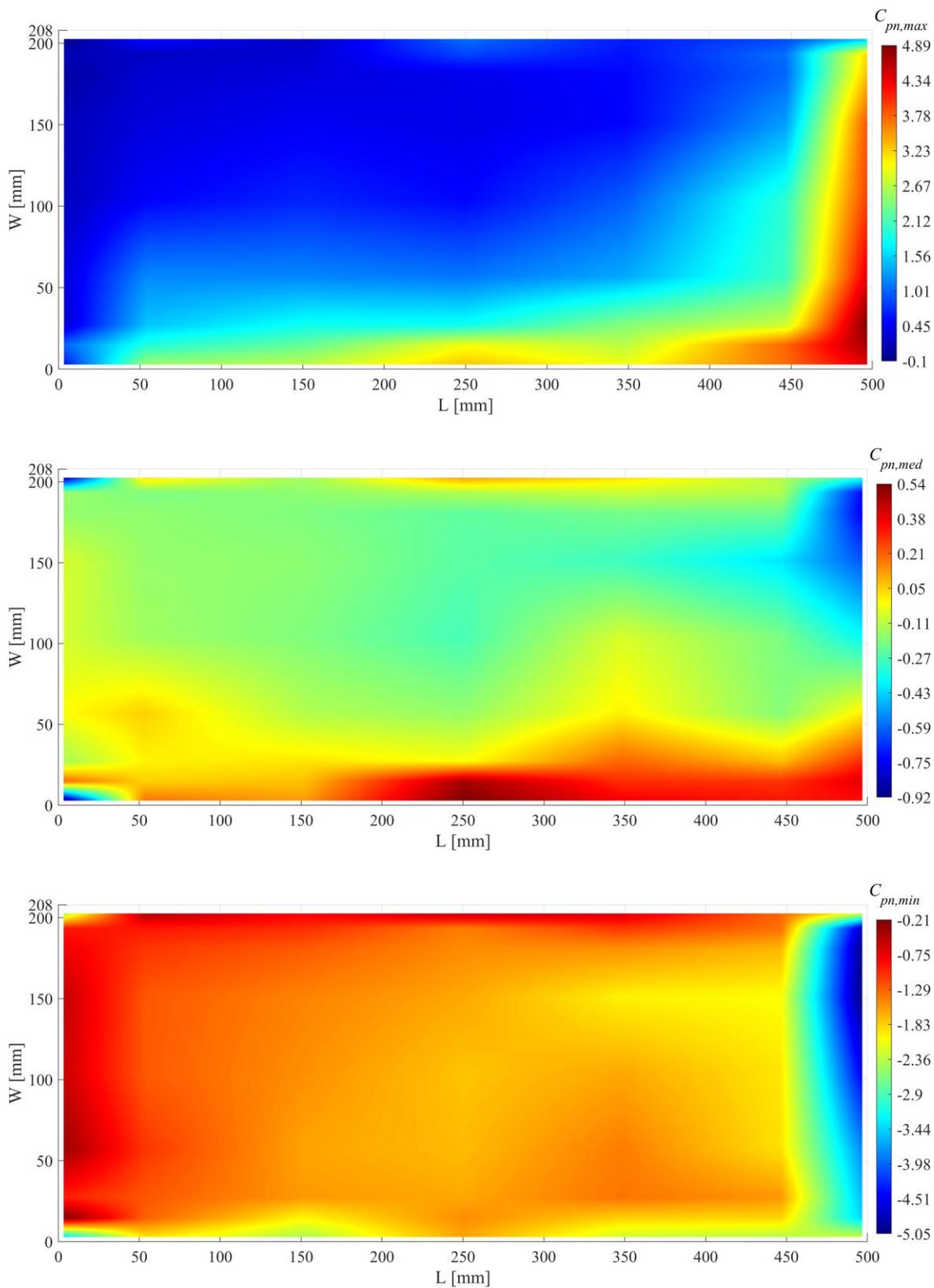


Figura A.9 Coeficientes de presión para  $\theta = 70^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

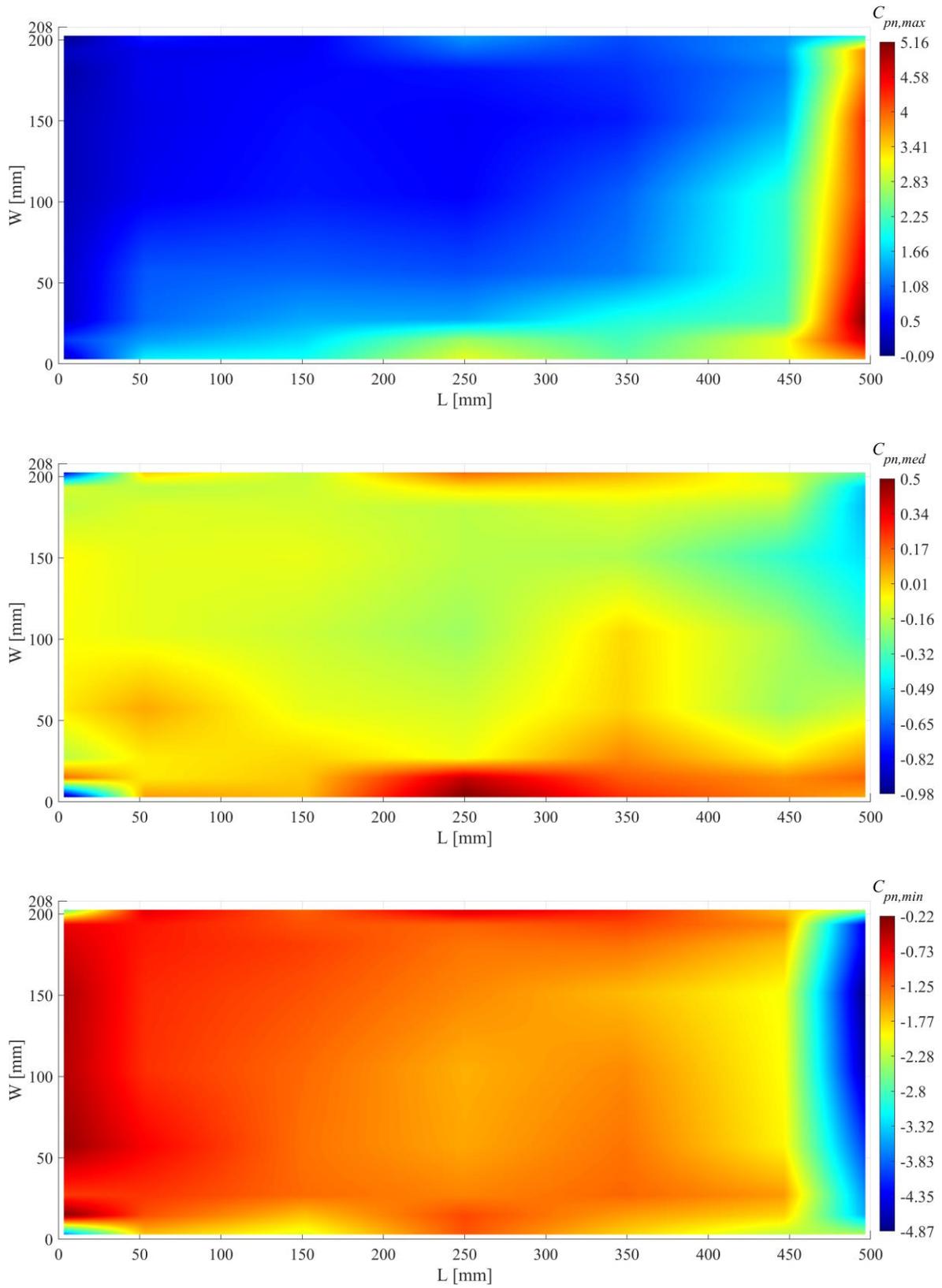


Figura A.10 Coeficientes de presión para  $\theta = 80^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

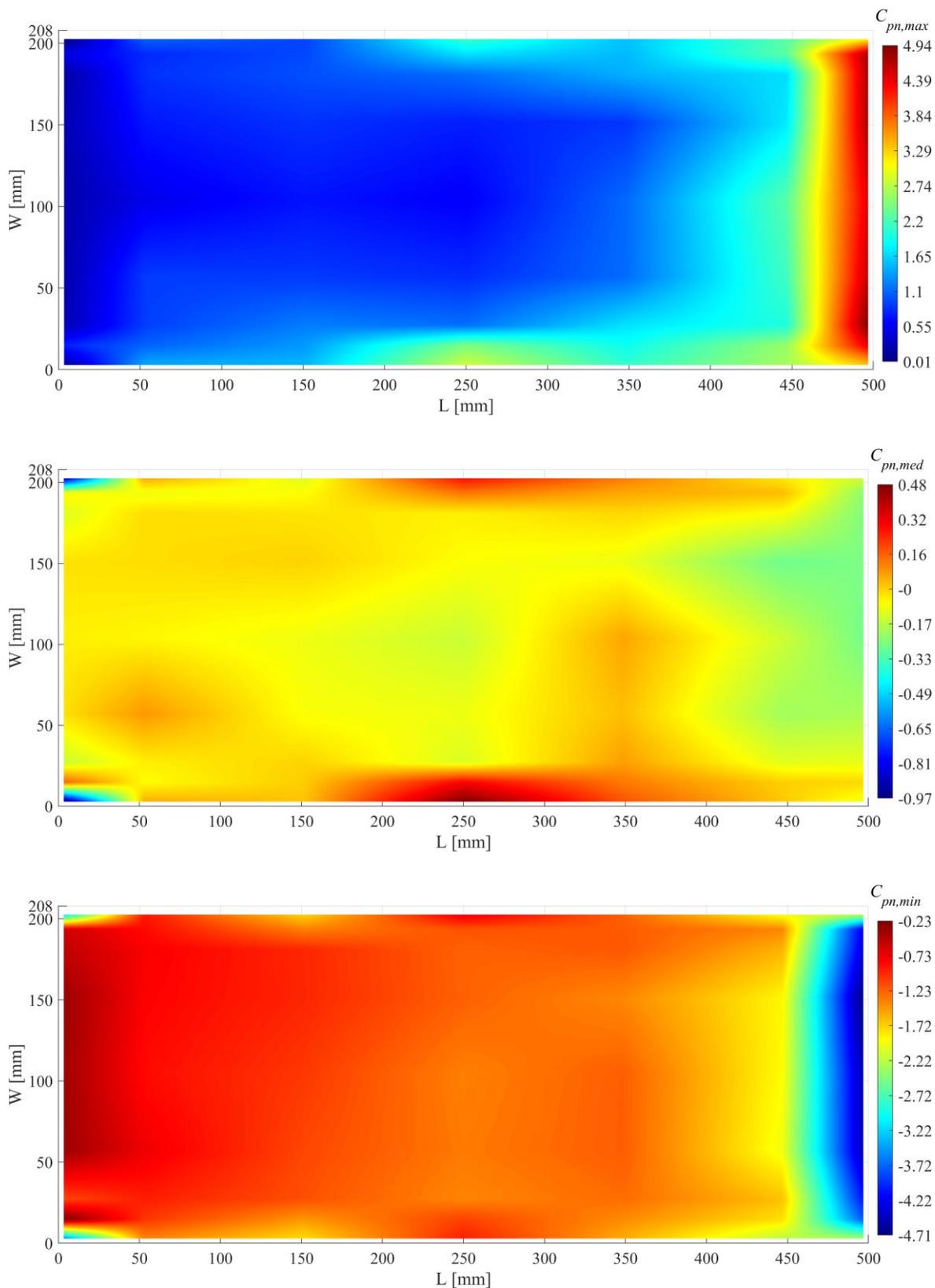


Figura A.11 Coeficientes de presión para  $\theta = 90^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

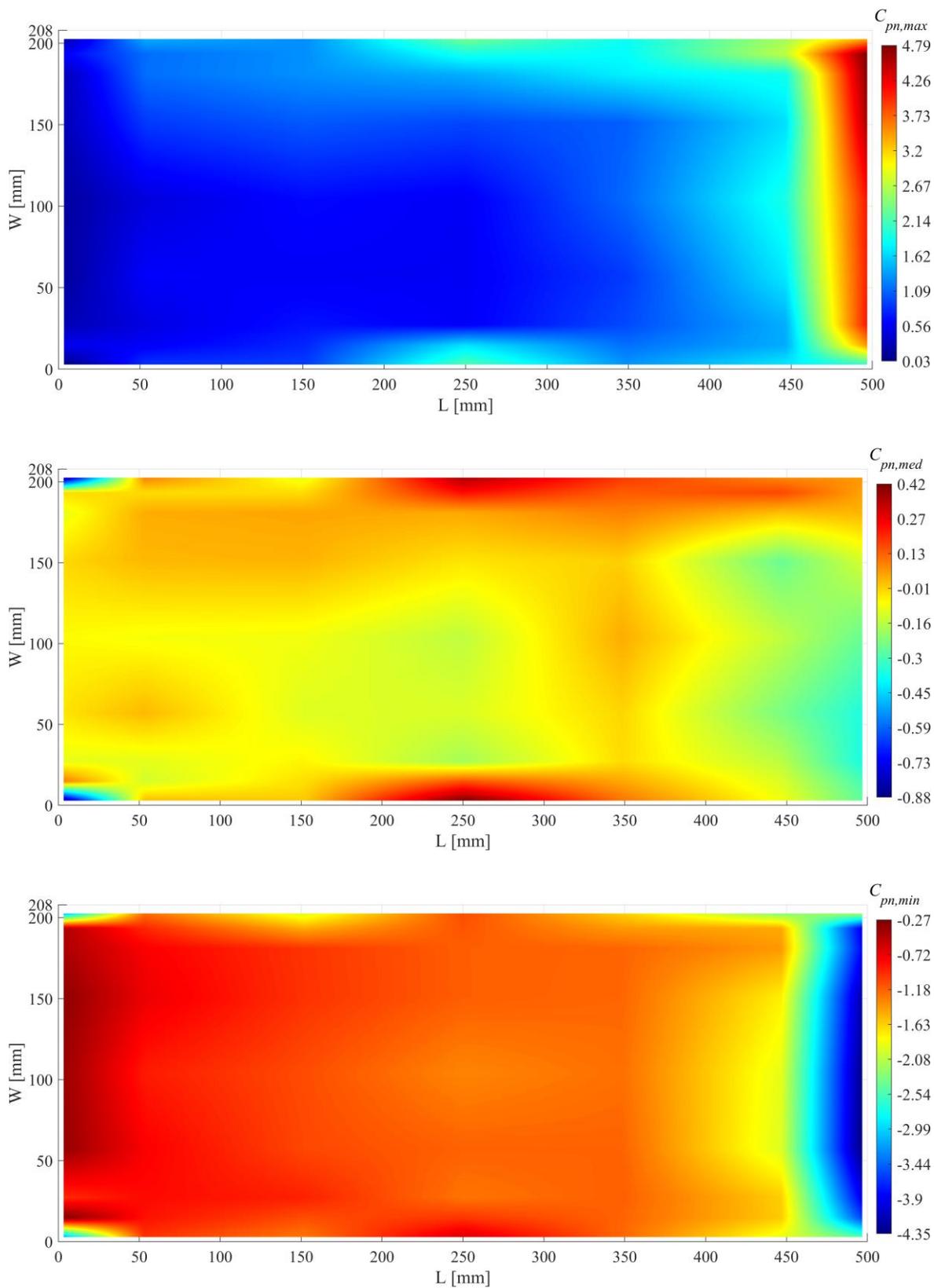


Figura A.12 Coeficientes de presión para  $\theta = 100^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

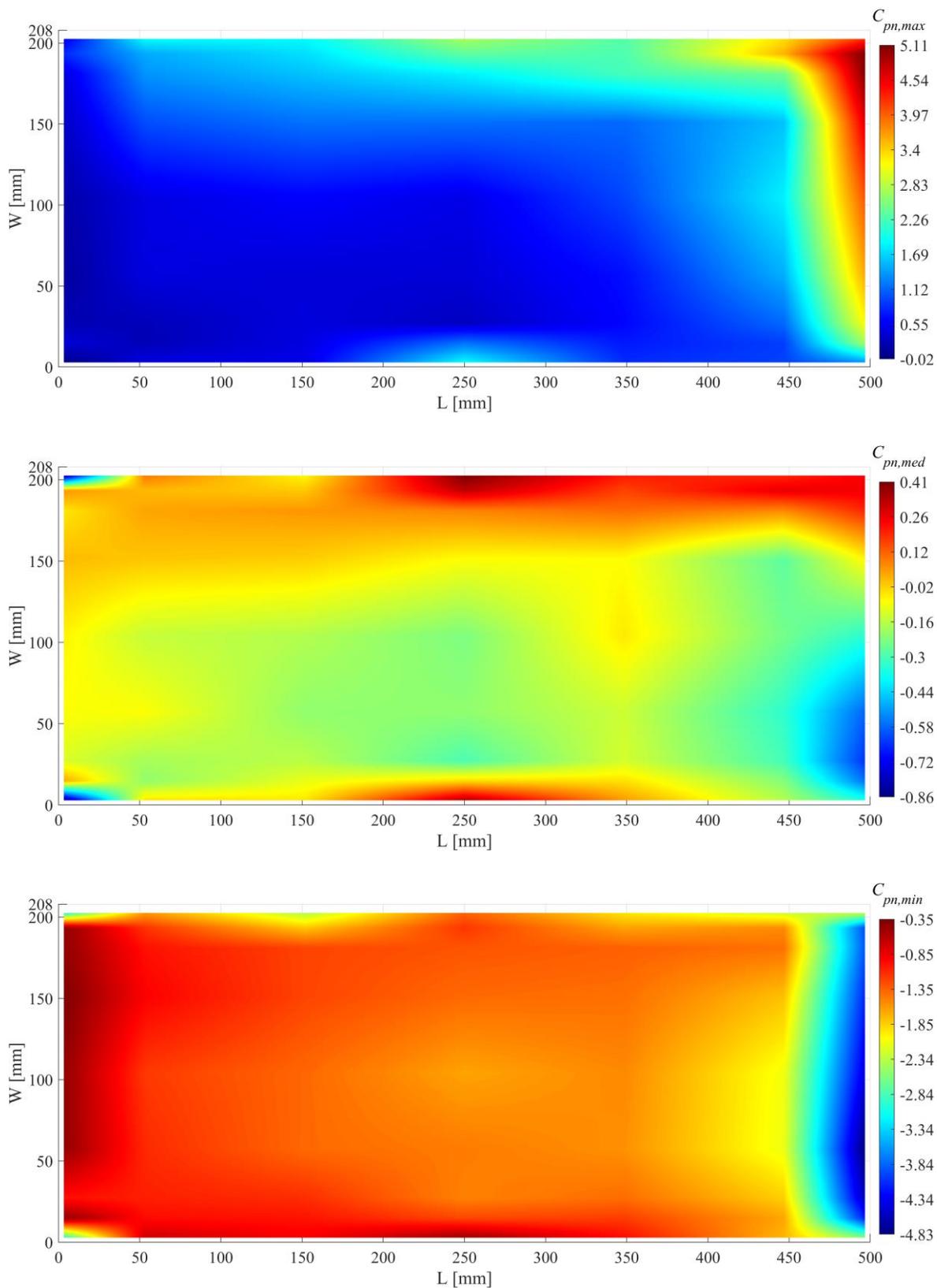


Figura A.13 Coeficientes de presión para  $\theta = 110^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

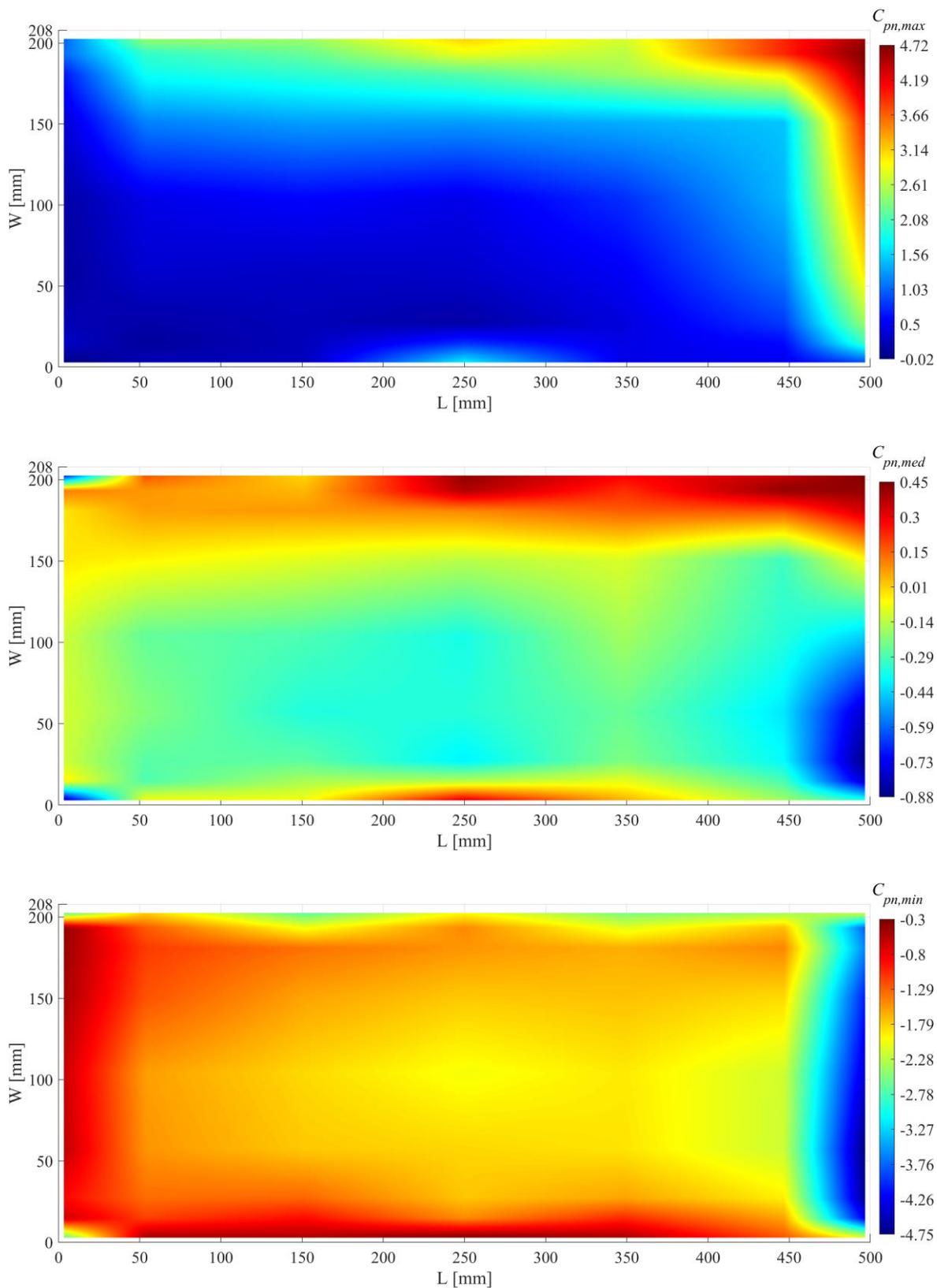


Figura A.14 Coeficientes de presión para  $\theta = 120^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

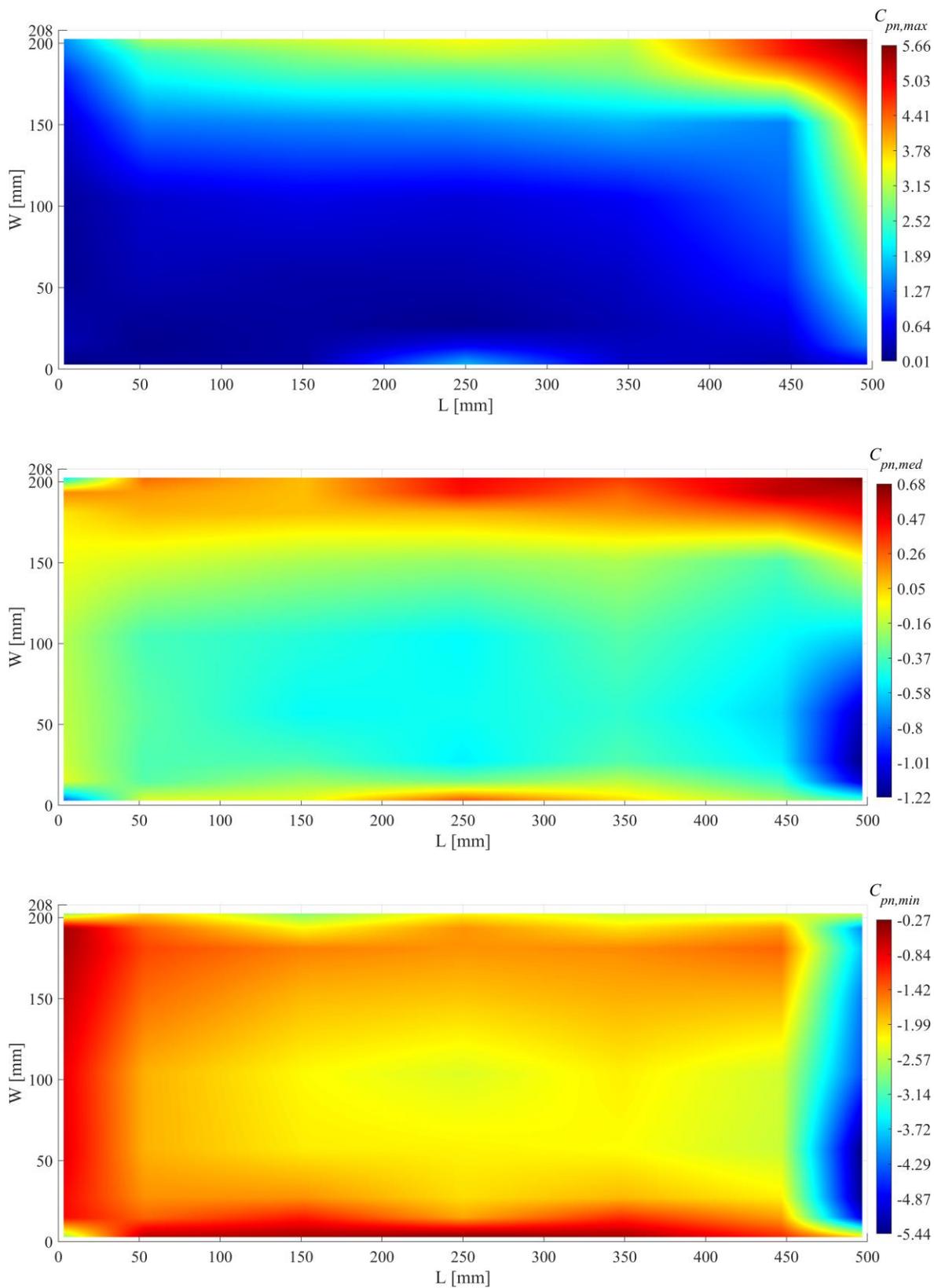


Figura A.15 Coeficientes de presión para  $\theta = 130^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

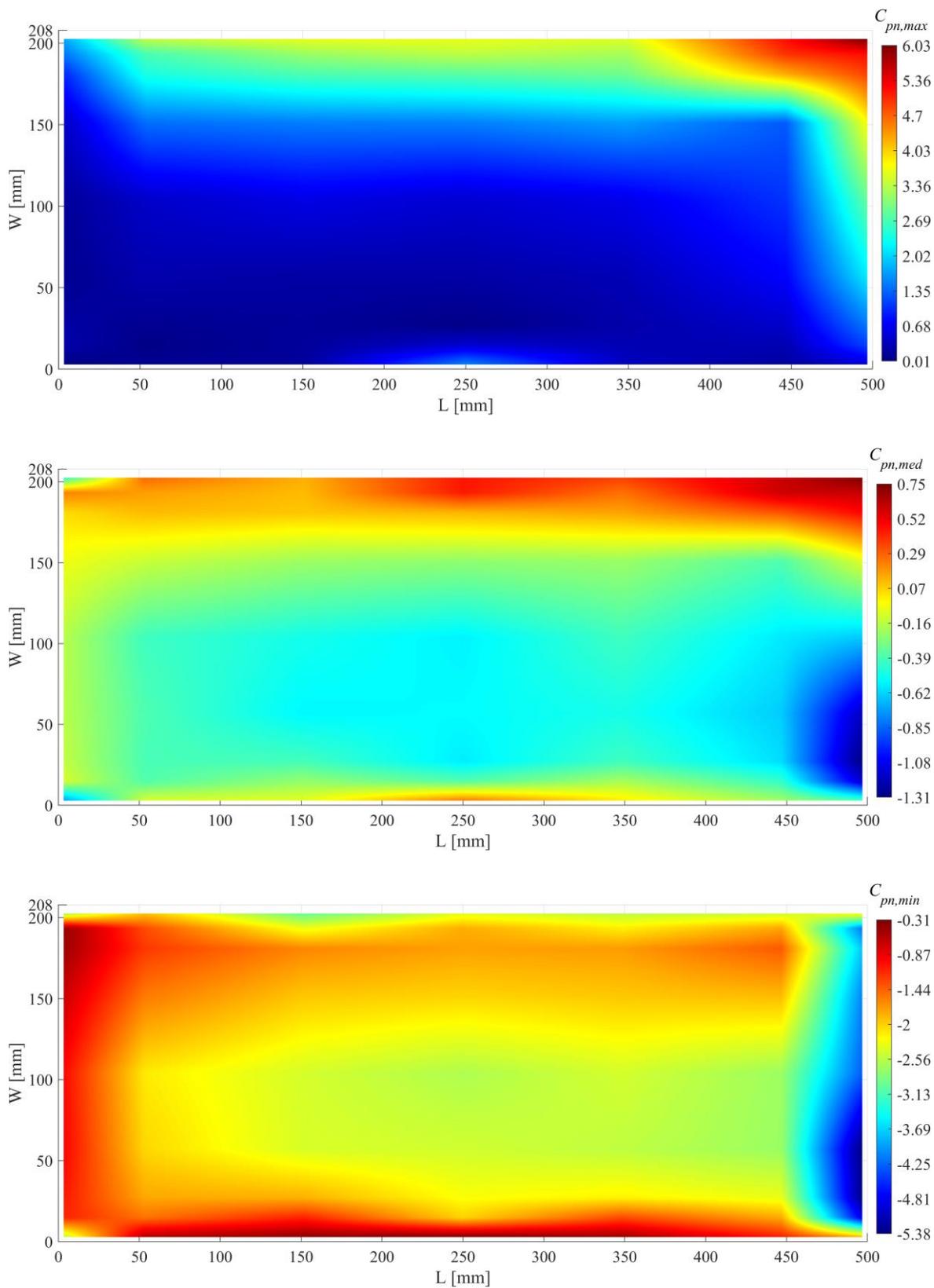


Figura A.16 Coeficientes de presión para  $\theta = 135^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

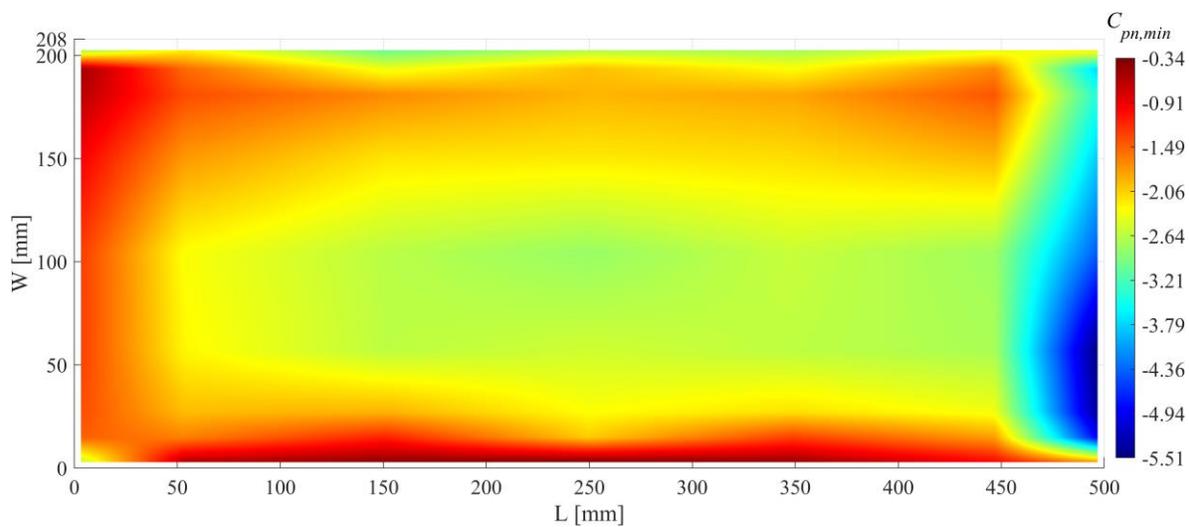
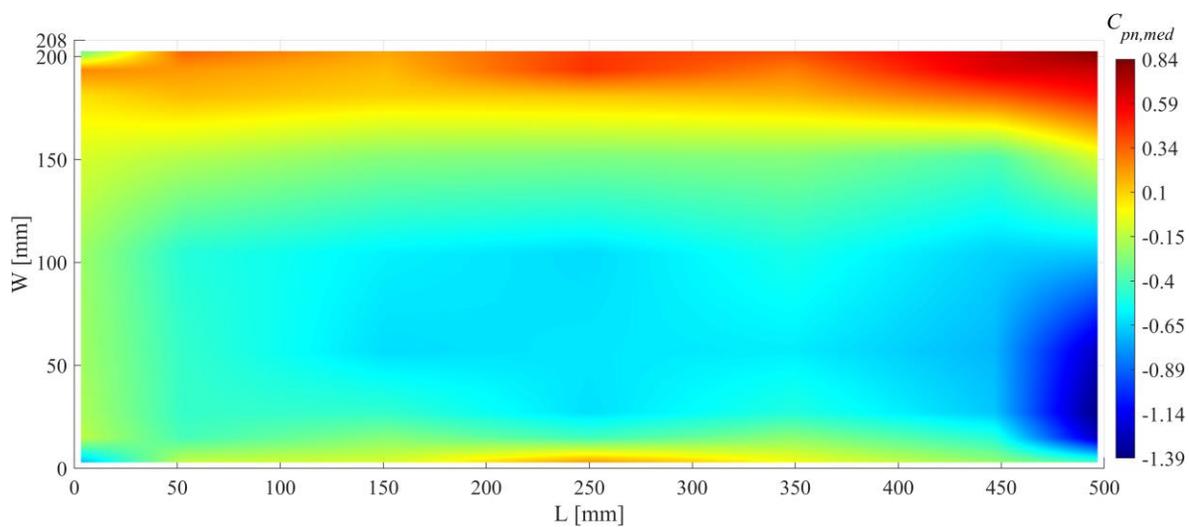
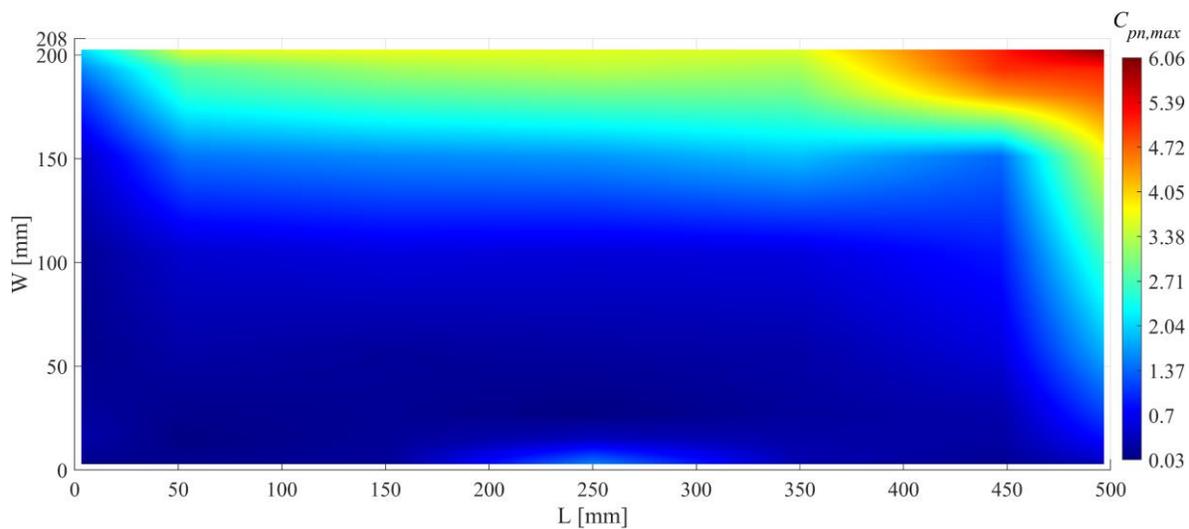


Figura A.17 Coeficientes de presión para  $\theta = 140^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

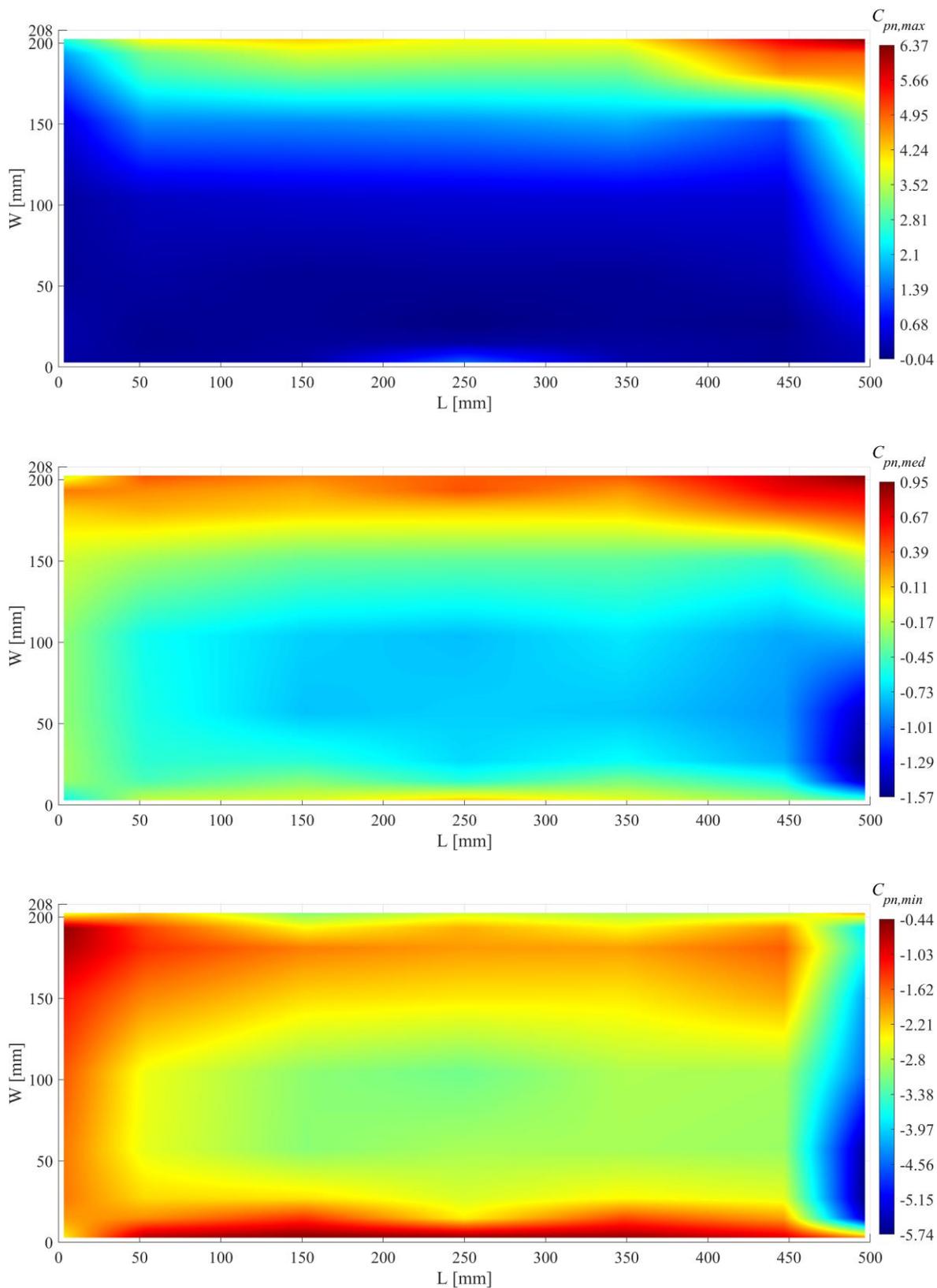


Figura A.18 Coeficientes de presión para  $\theta = 150^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

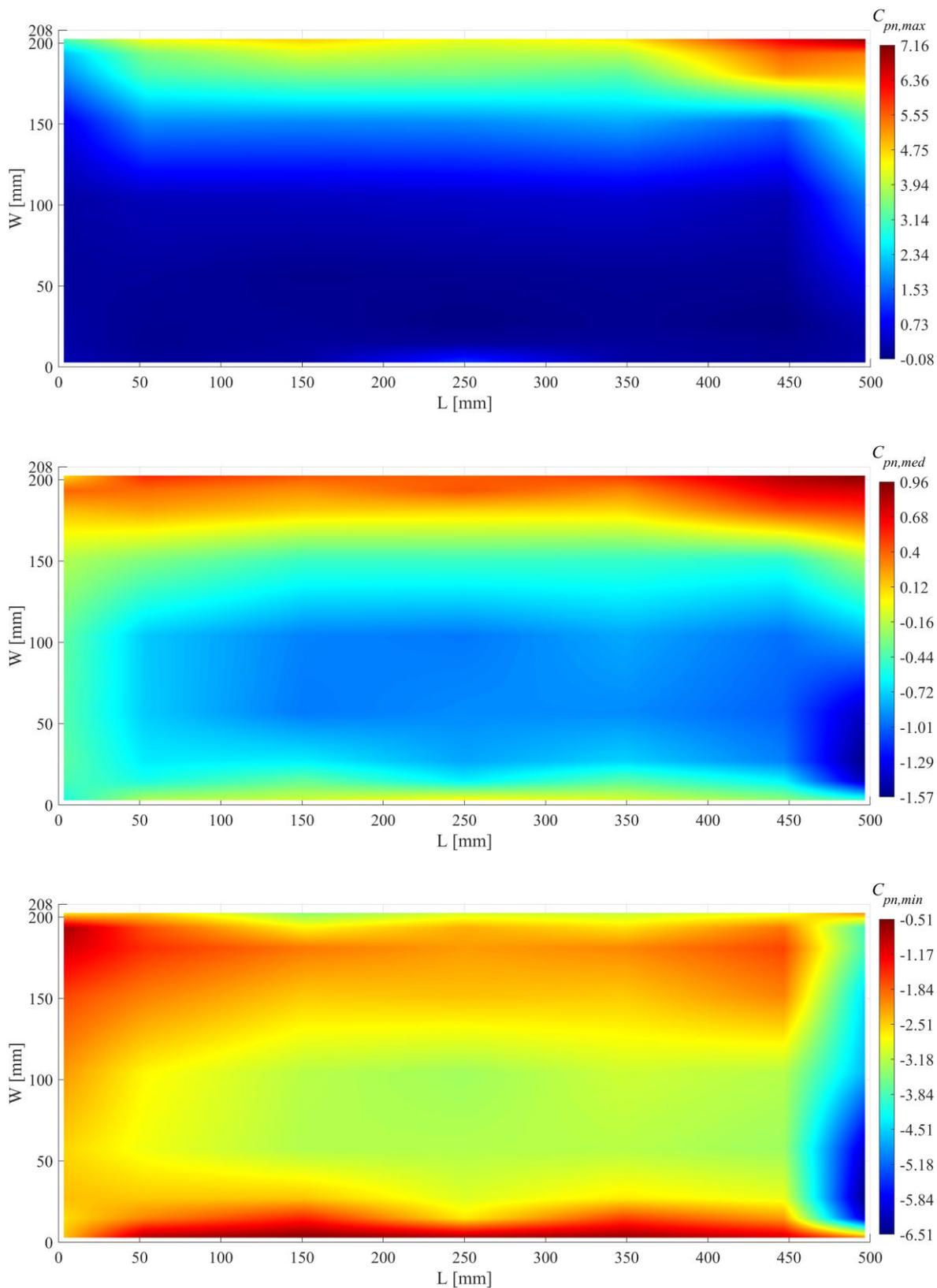


Figura A.19 Coeficientes de presión para  $\theta = 160^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

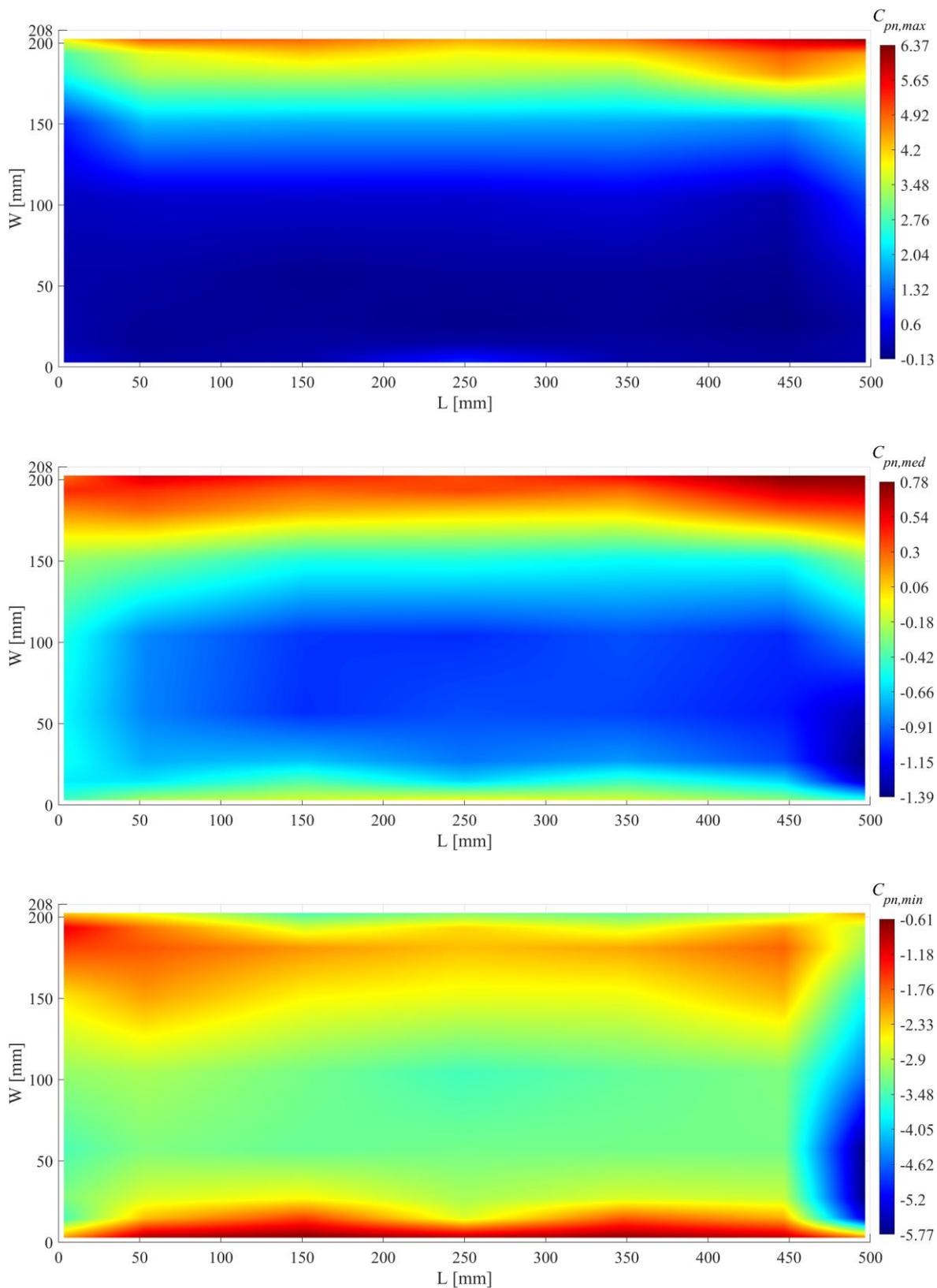


Figura A.20 Coeficientes de presión para  $\theta = 170^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

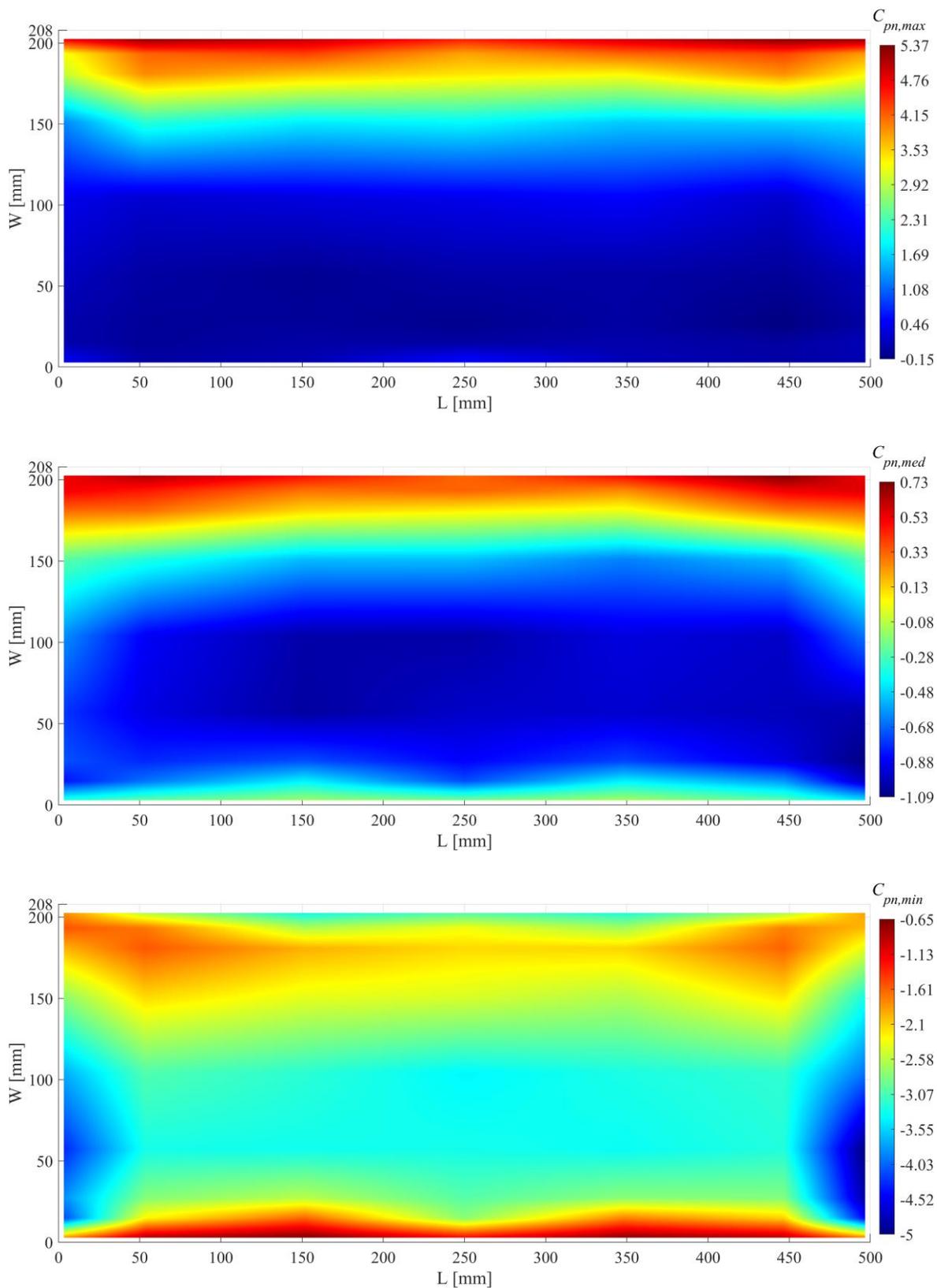


Figura A.21 Coeficientes de presión para  $\theta = 180^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

*- Página intencionalmente en blanco -*

## Anexo B. Gráficas de contorno del Modelo 2 ( $\beta = 22.5^\circ$ )

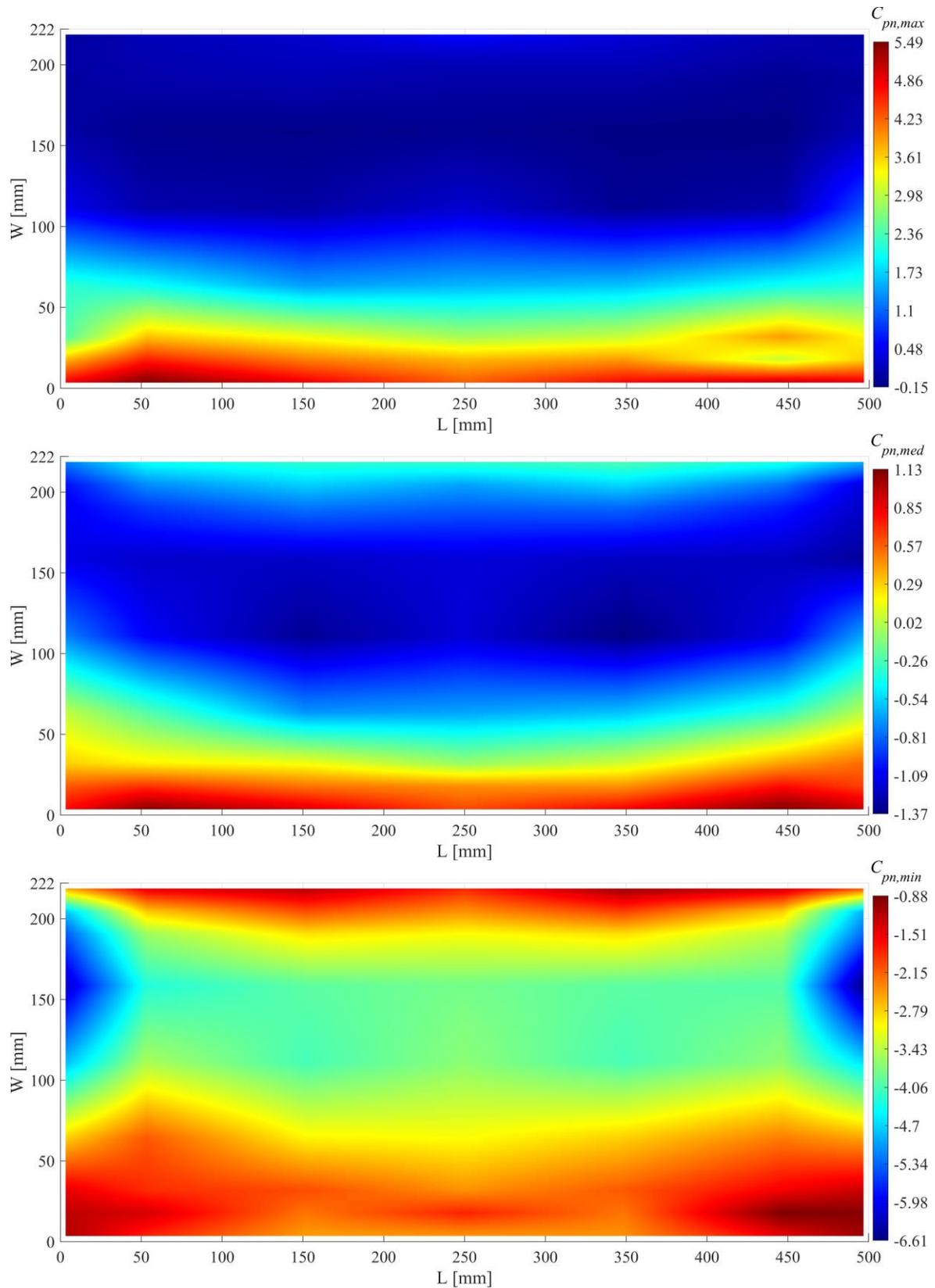


Figura B.1 Coeficientes de presión para  $\theta = 0^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

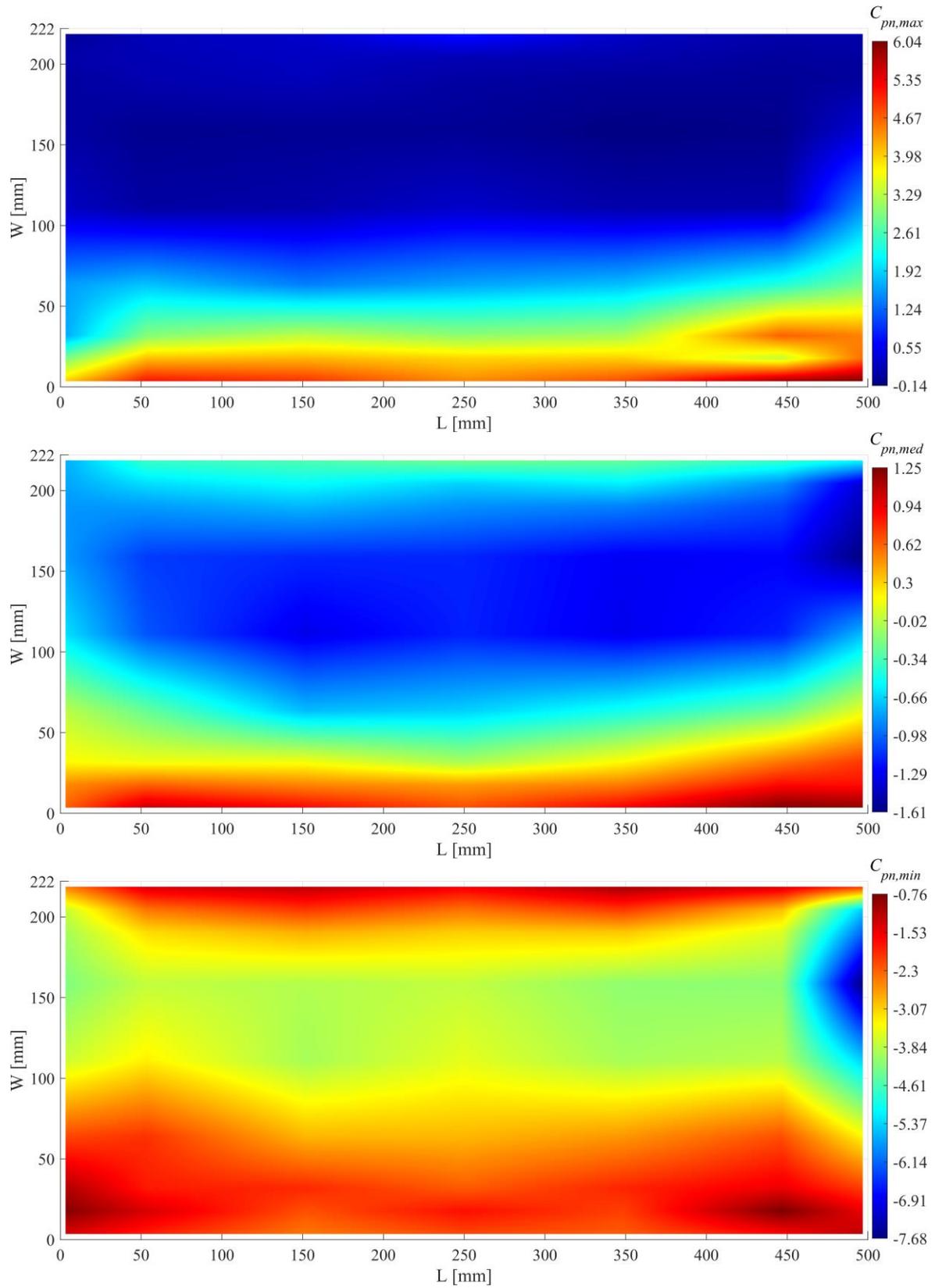


Figura B.2 Coeficientes de presión para  $\theta = 10^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

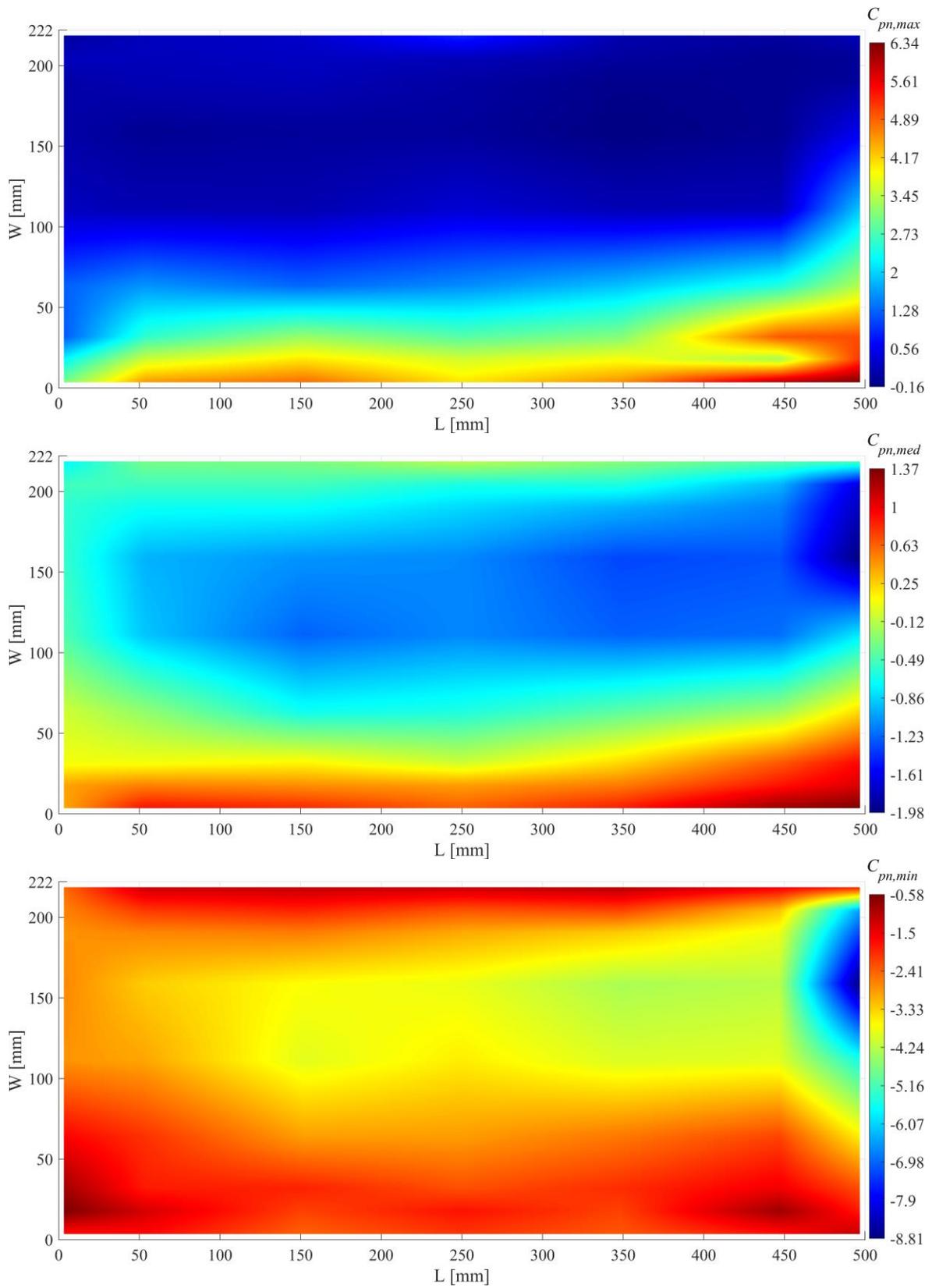


Figura B.3 Coeficientes de presión para  $\theta = 20^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

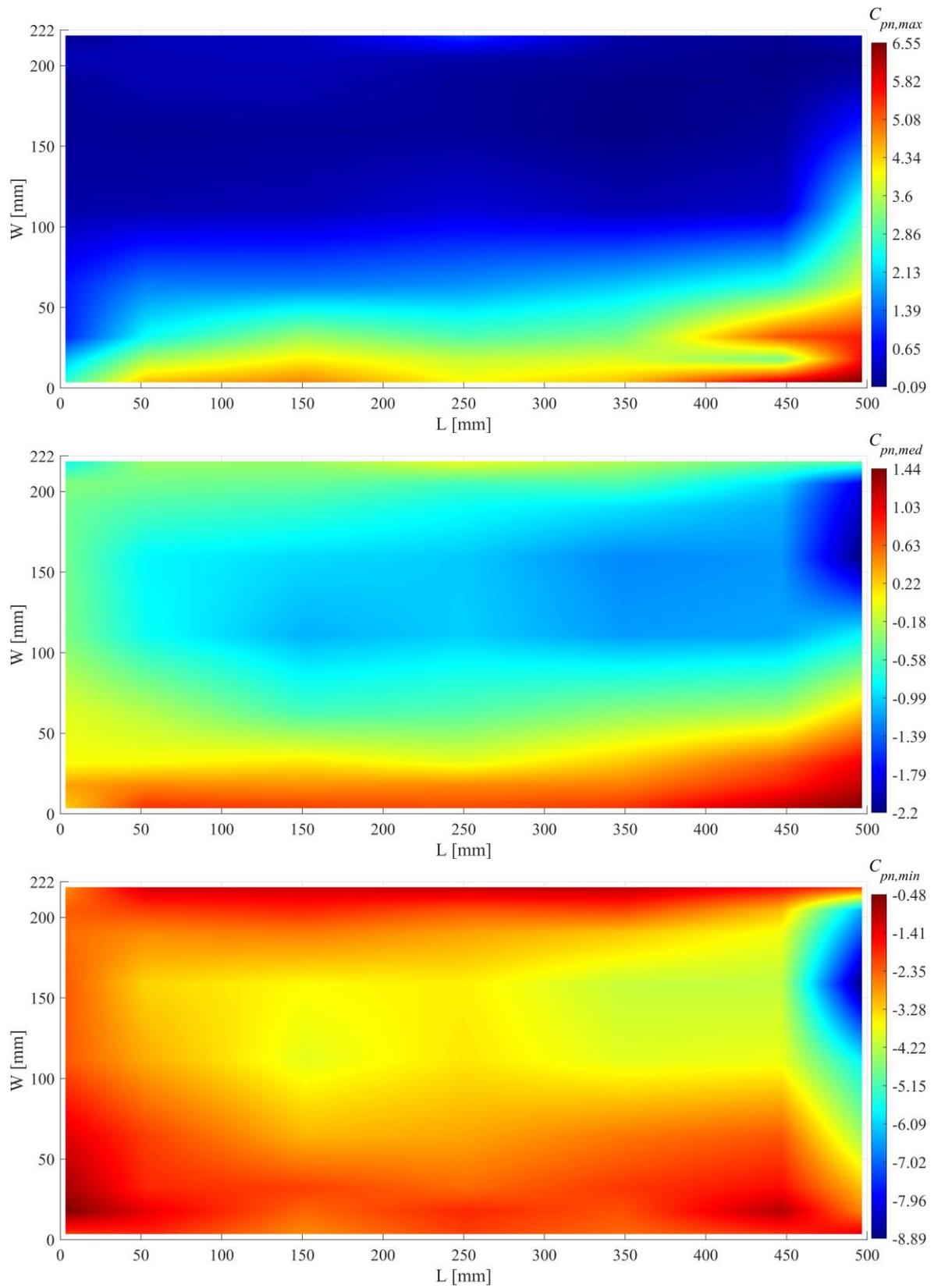


Figura B.4 Coeficientes de presión para  $\theta = 30^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

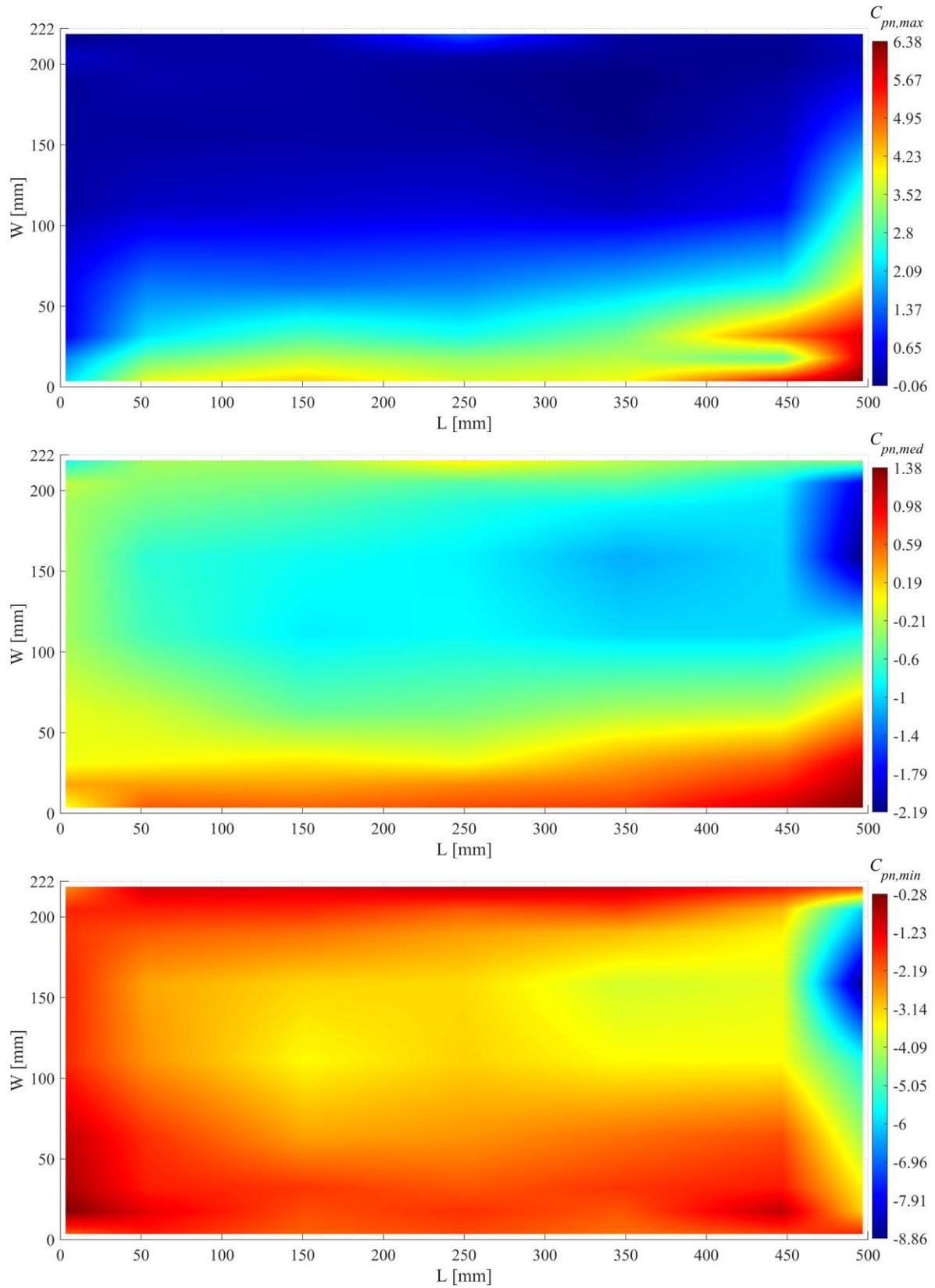


Figura B.5 Coeficientes de presión para  $\theta = 40^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

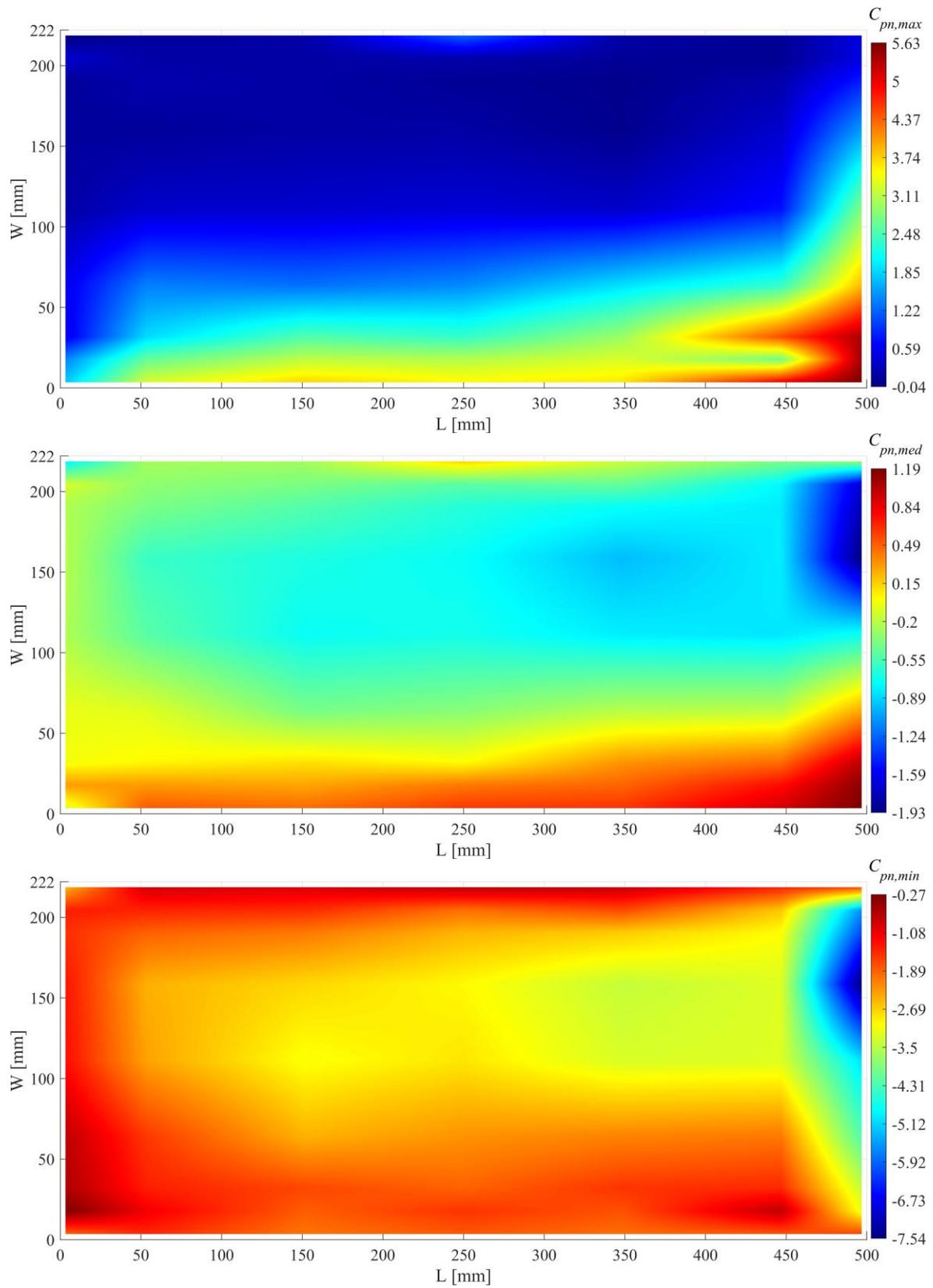


Figura B.6 Coeficientes de presión para  $\theta = 45^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

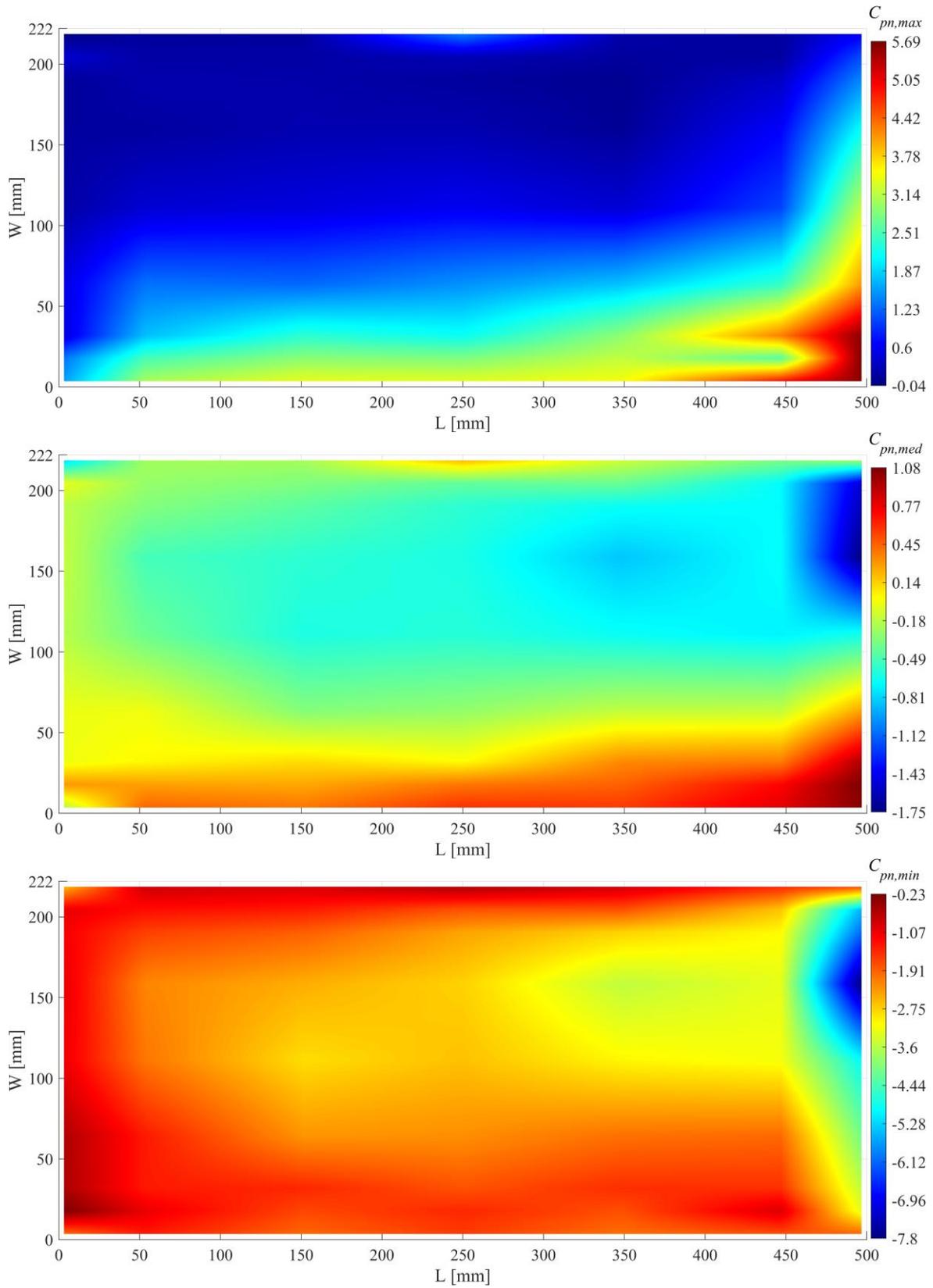


Figura B.7 Coeficientes de presión para  $\theta = 50^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

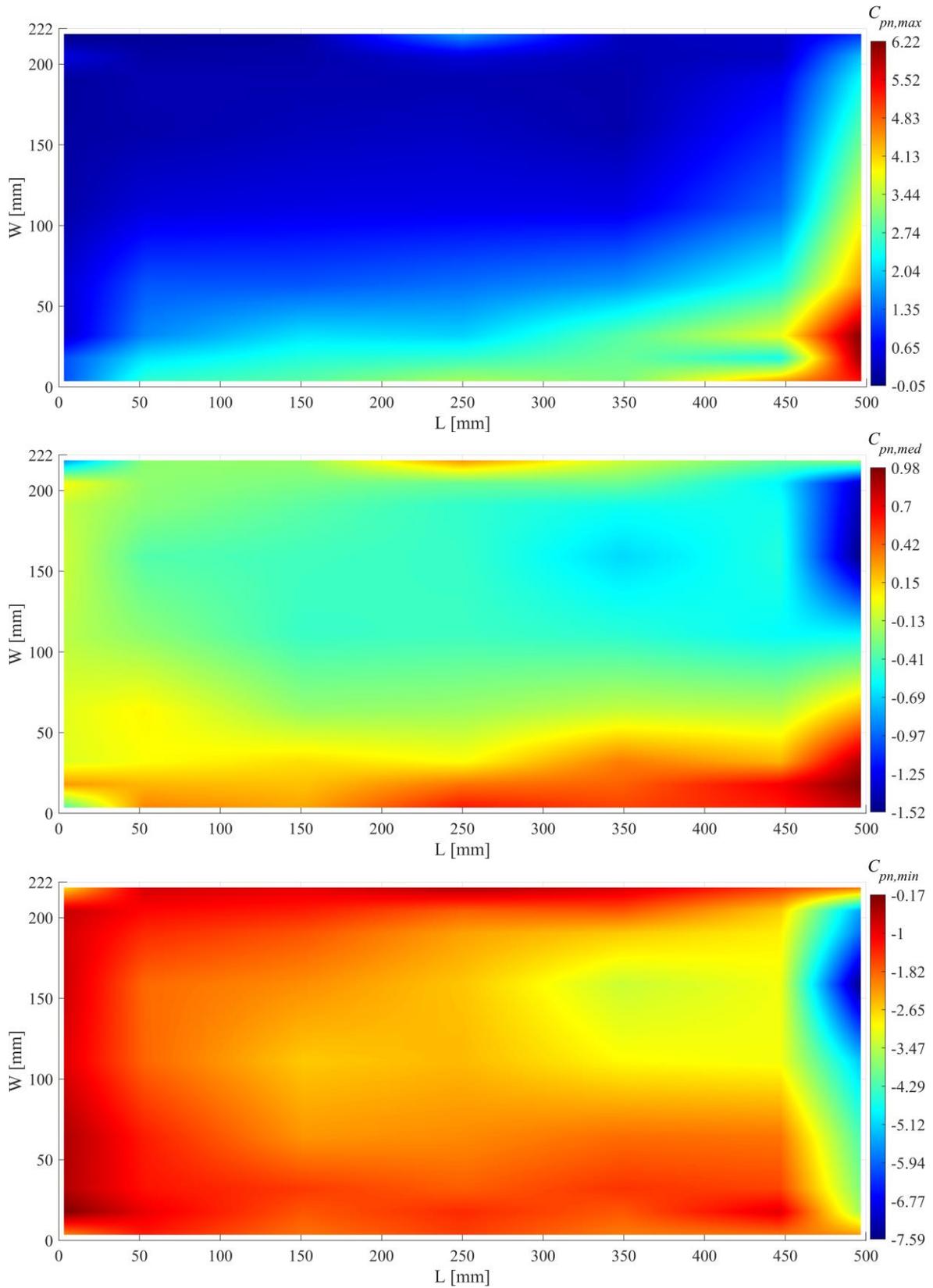


Figura B.8 Coeficientes de presión para  $\theta = 60^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

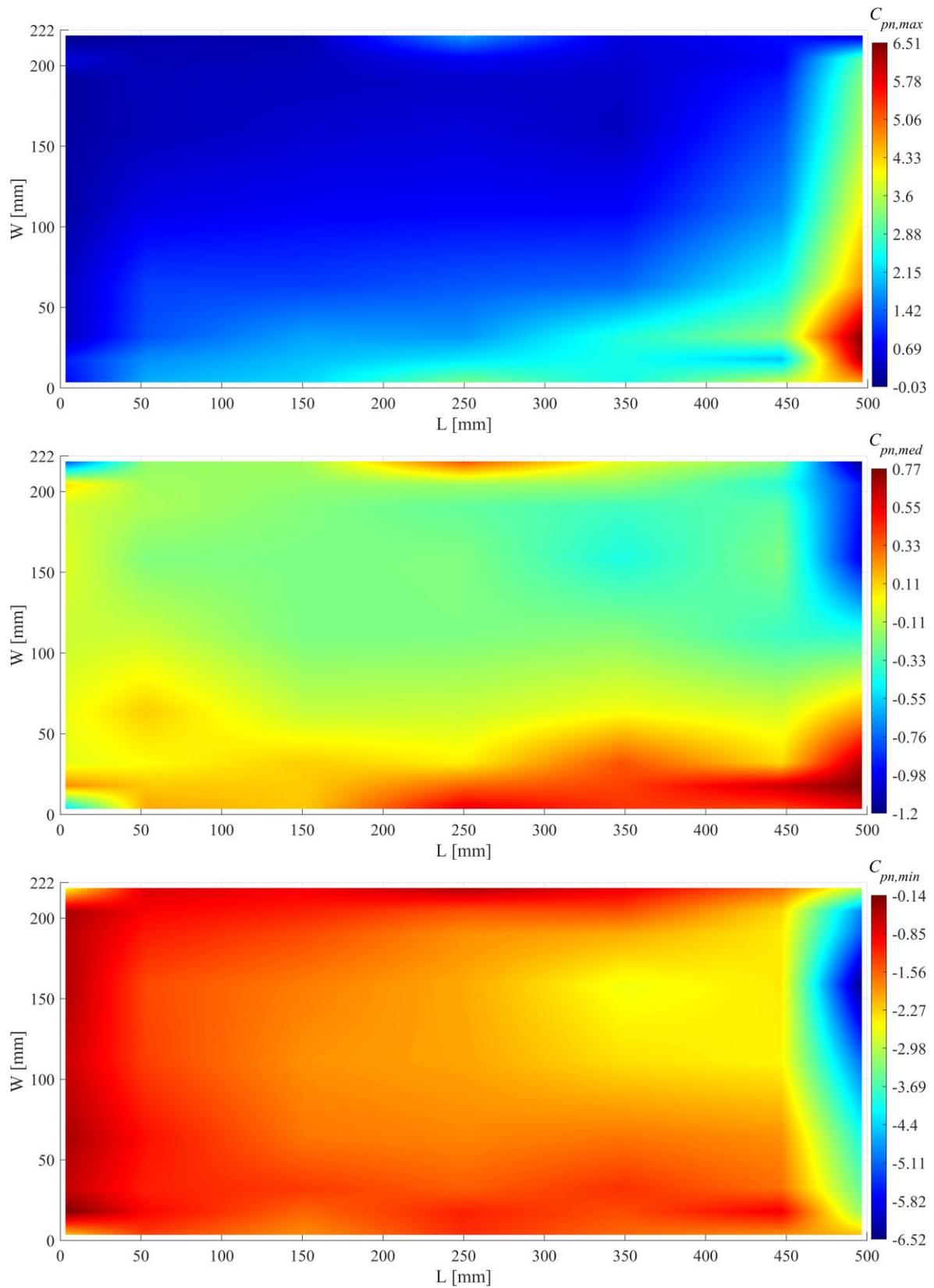


Figura B.9 Coeficientes de presión para  $\theta = 70^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

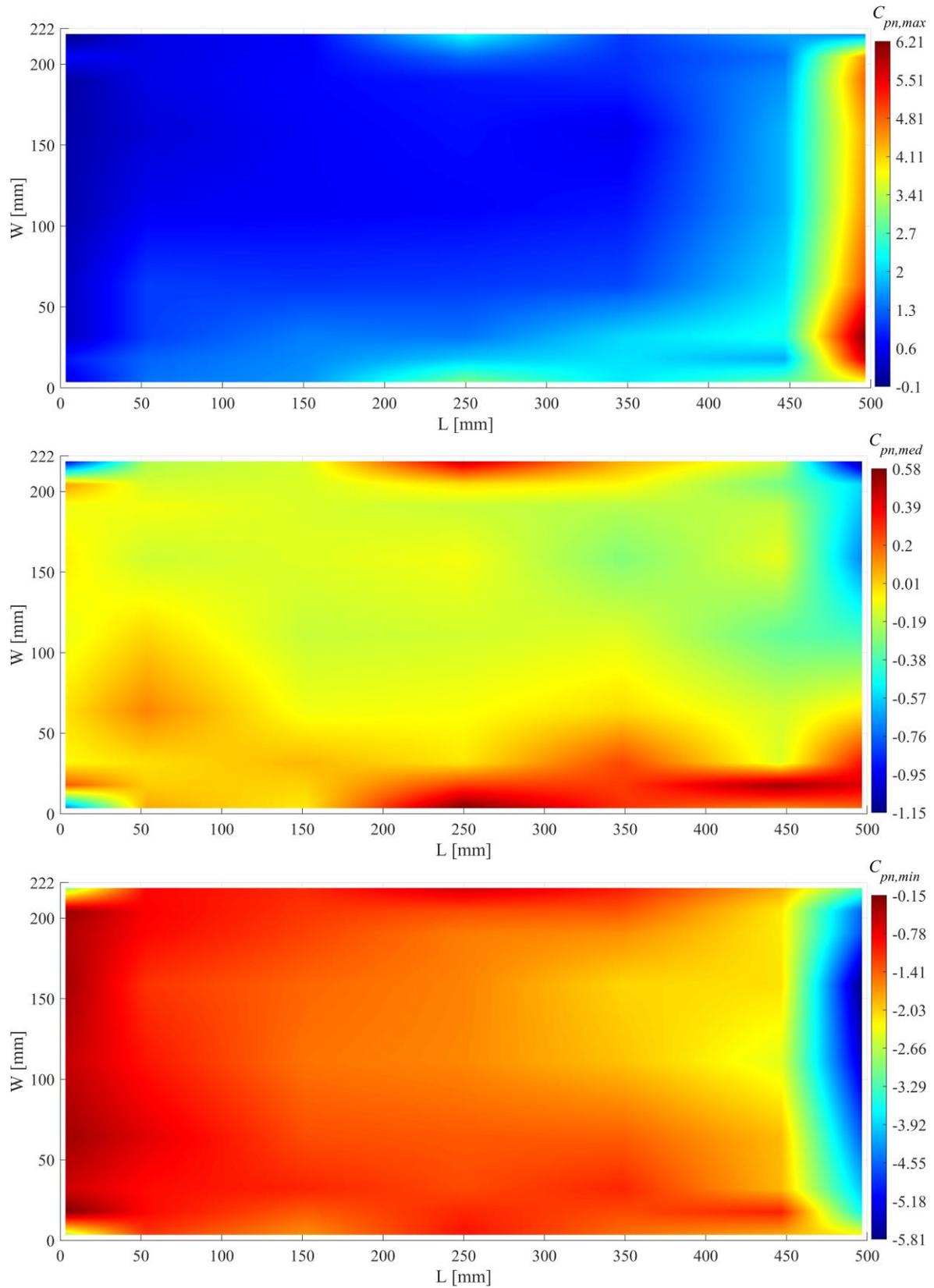


Figura B.10 Coeficientes de presión para  $\theta = 80^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

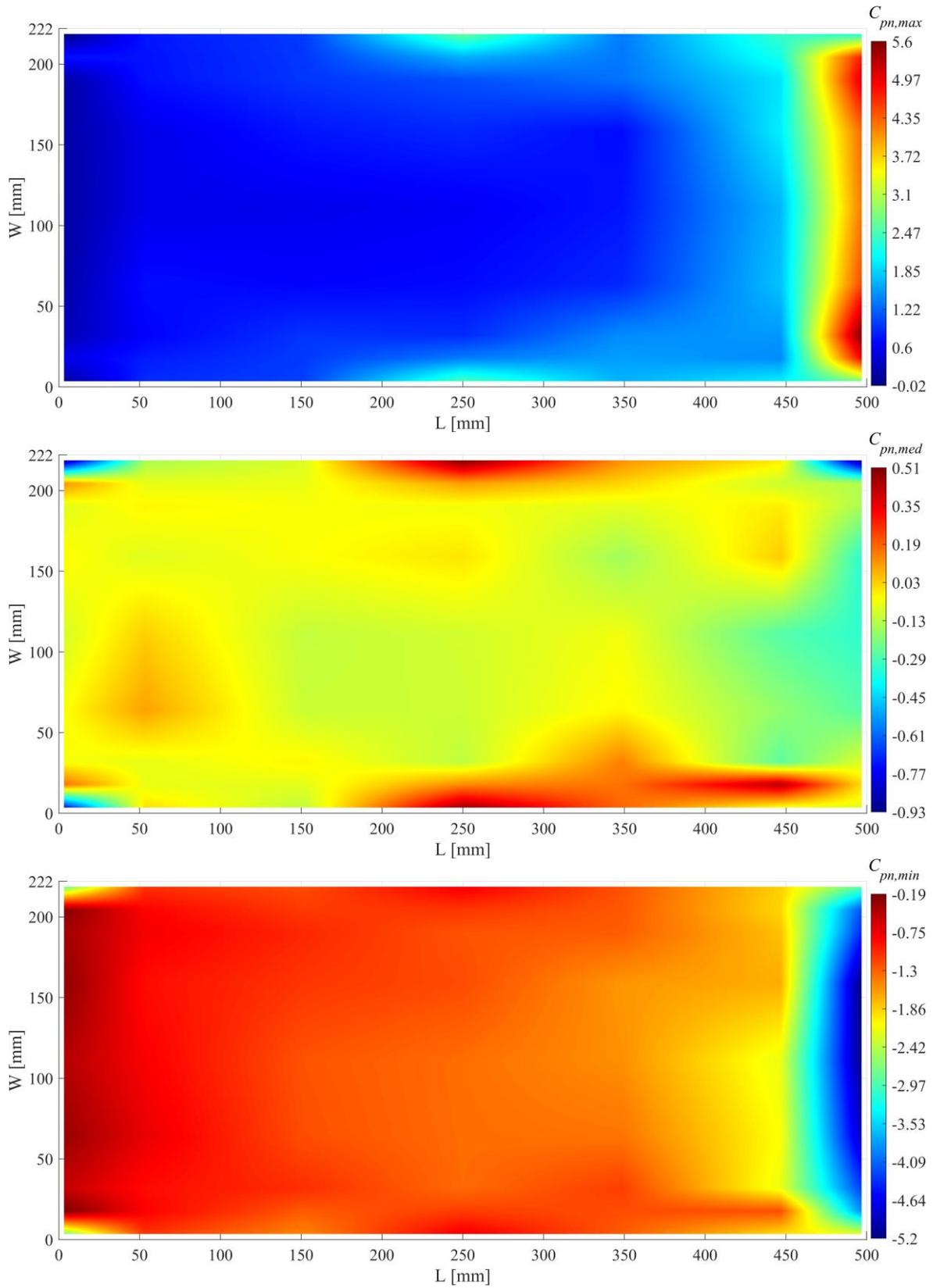


Figura B.11 Coeficientes de presión para  $\theta = 90^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

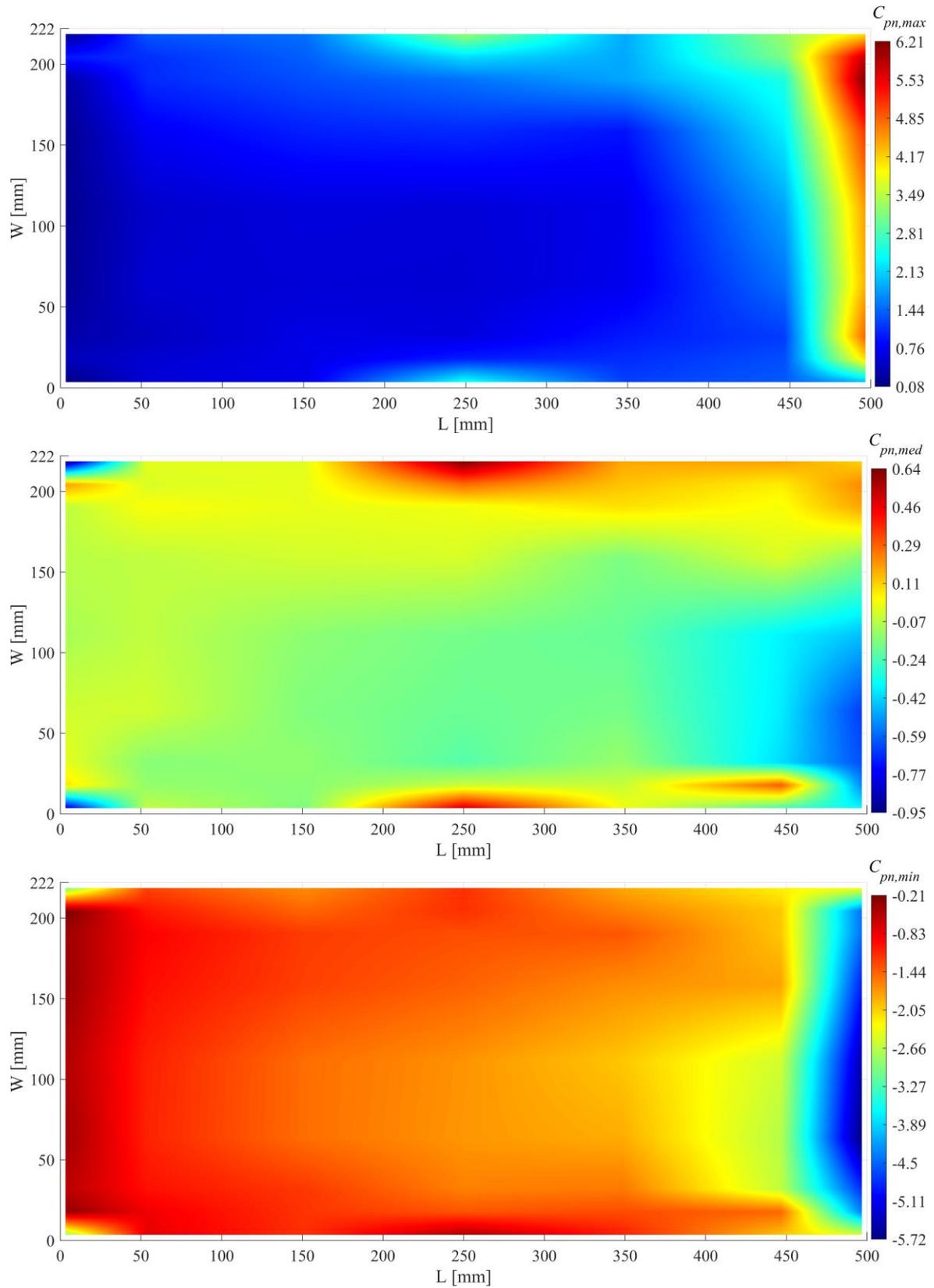


Figura B.12 Coeficientes de presión para  $\theta = 100^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

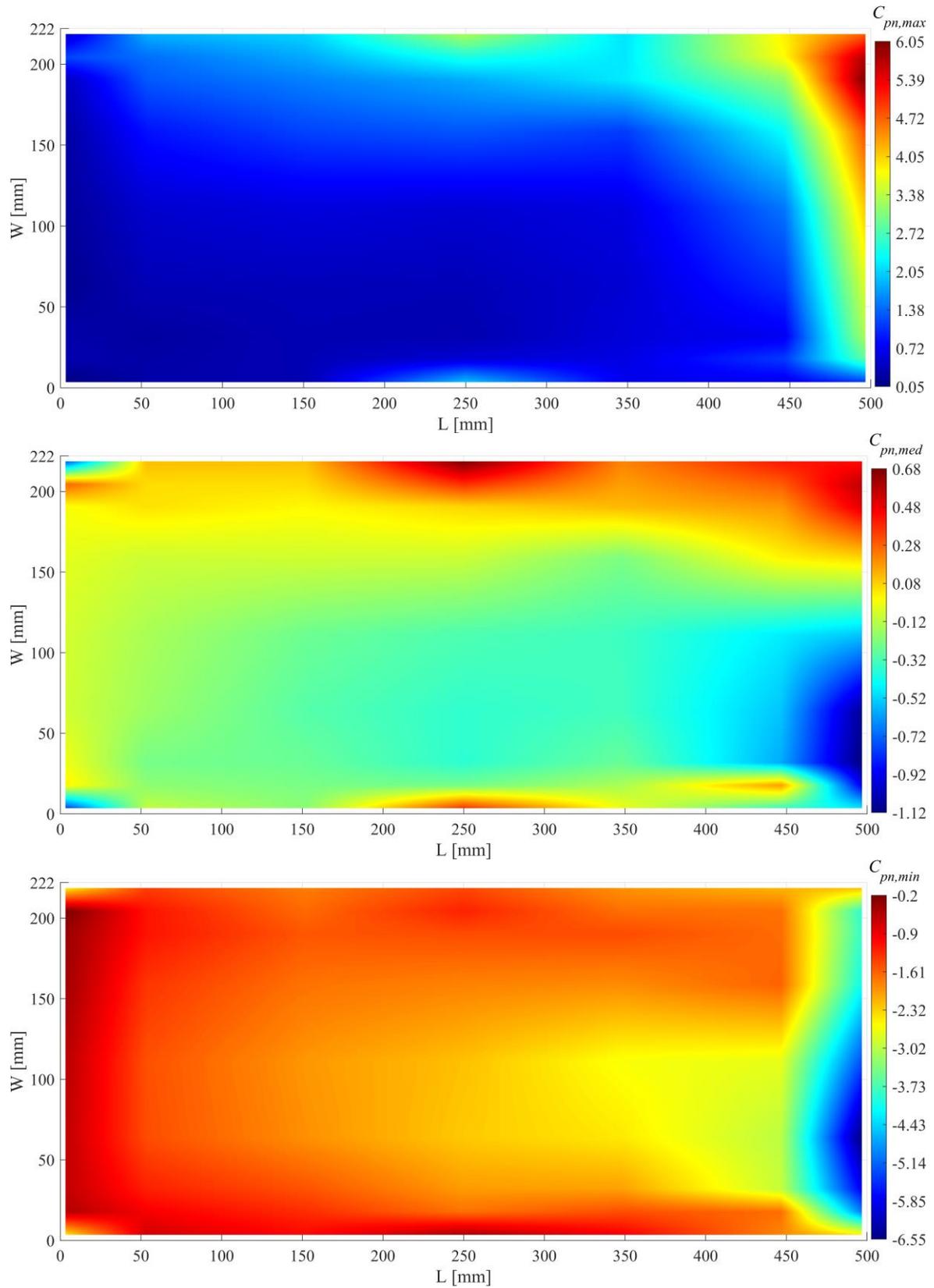


Figura B.13 Coeficientes de presión para  $\theta = 110^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

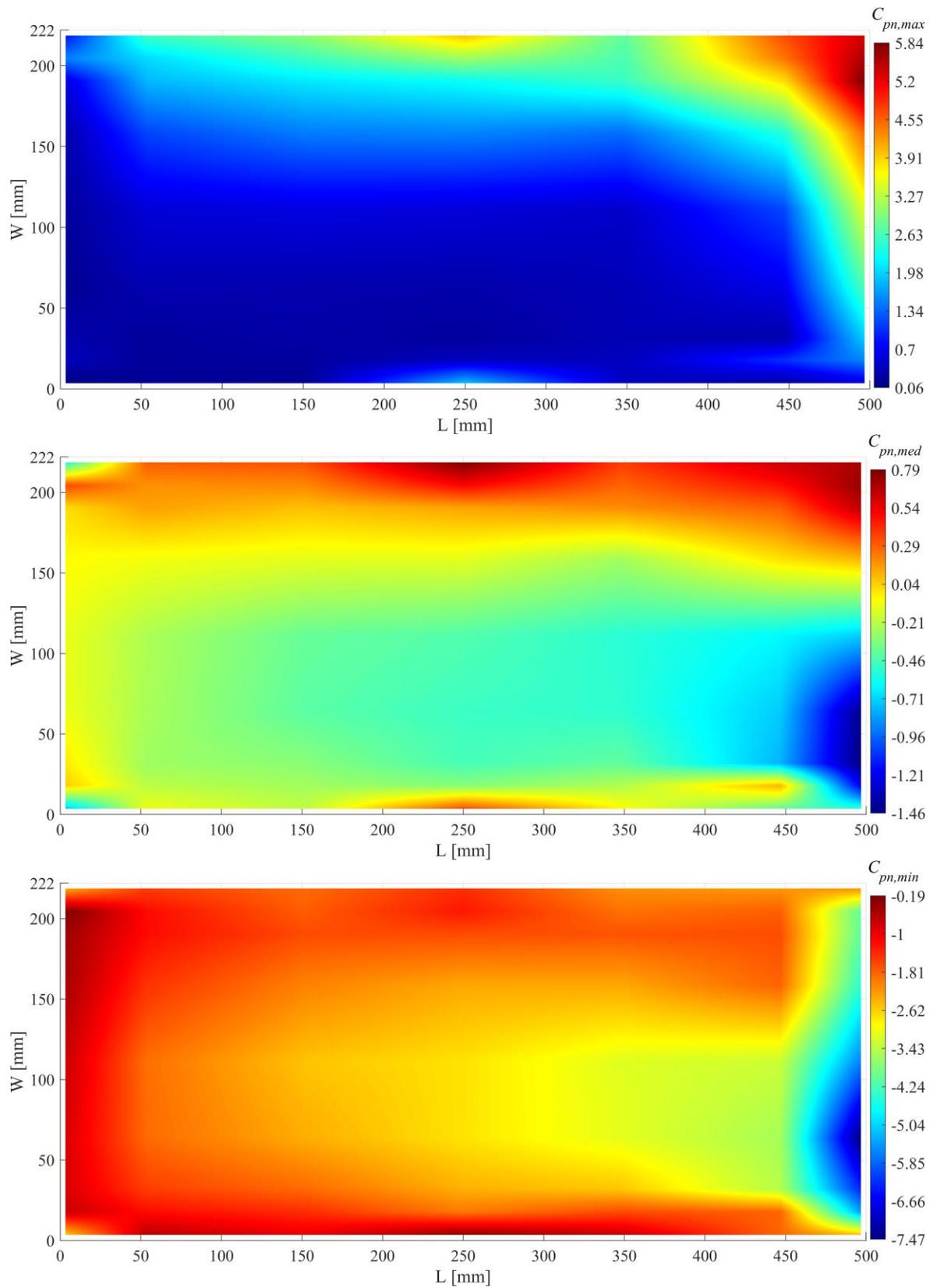


Figura B.14 Coeficientes de presión para  $\theta = 120^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

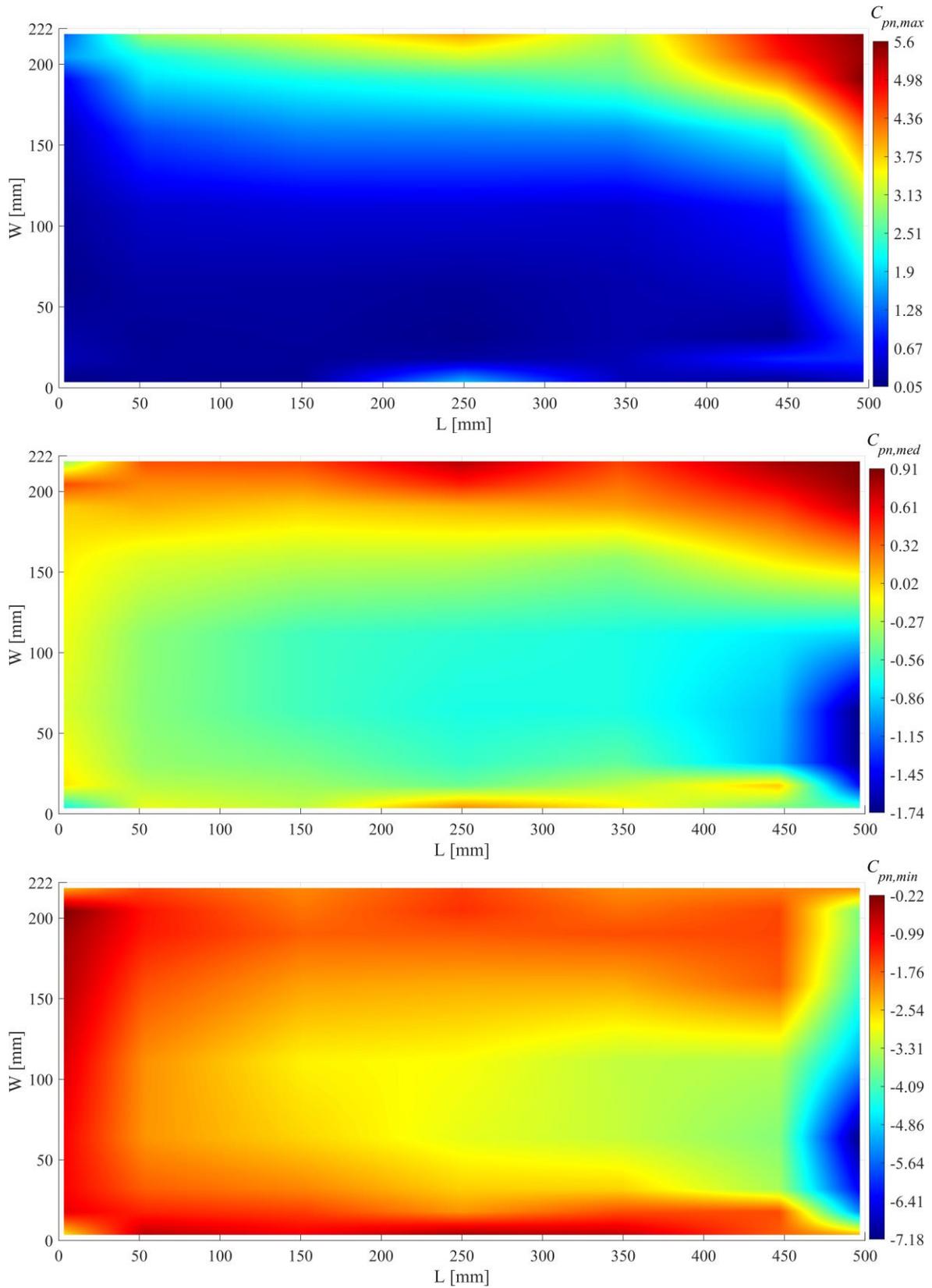


Figura B.15 Coeficientes de presión para  $\theta = 130^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

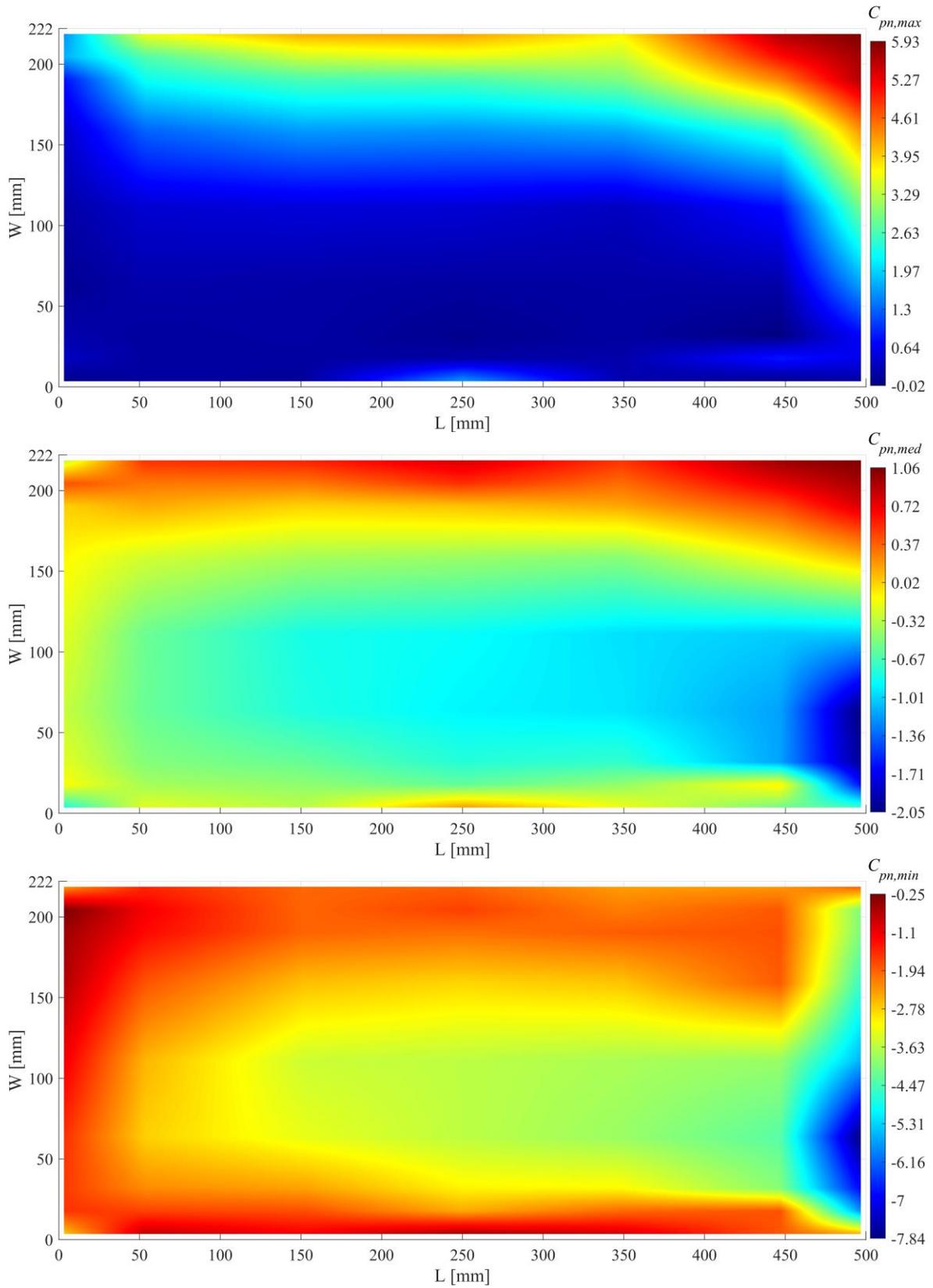


Figura B.16 Coeficientes de presión para  $\theta = 135^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

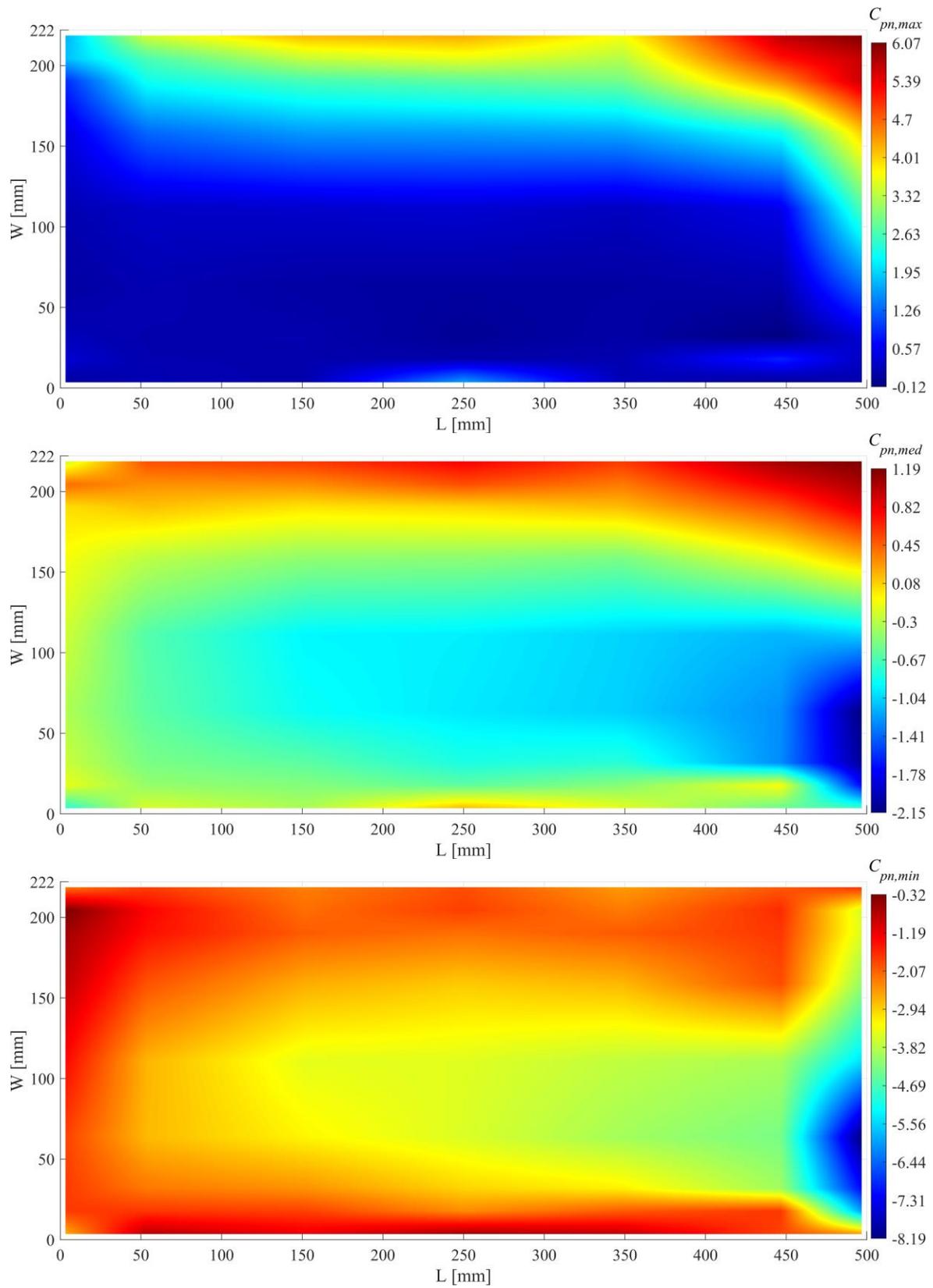


Figura B.17 Coeficientes de presión para  $\theta = 140^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

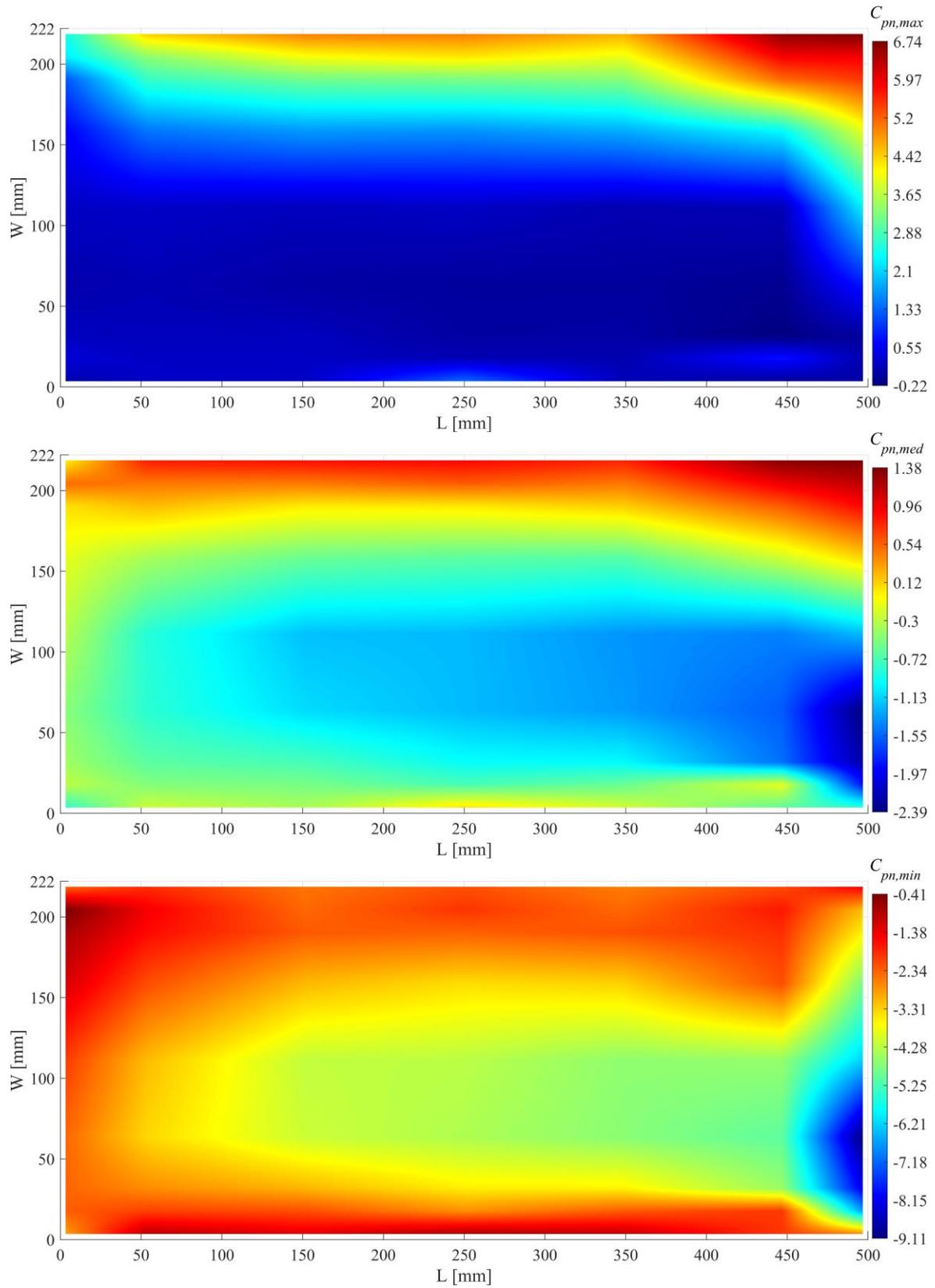


Figura B.18 Coeficientes de presión para  $\theta = 150^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

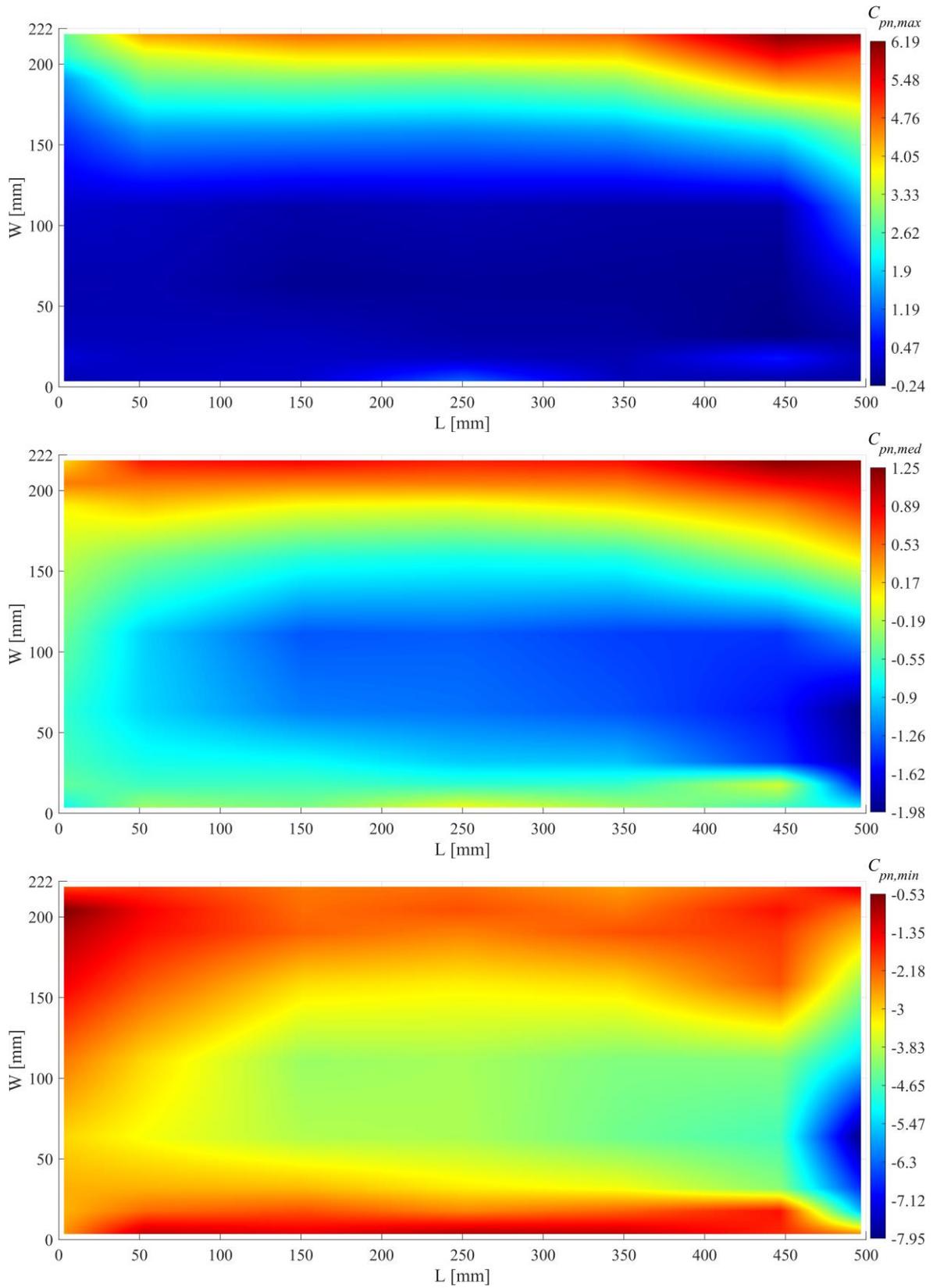


Figura B.19 Coeficientes de presión para  $\theta = 160^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

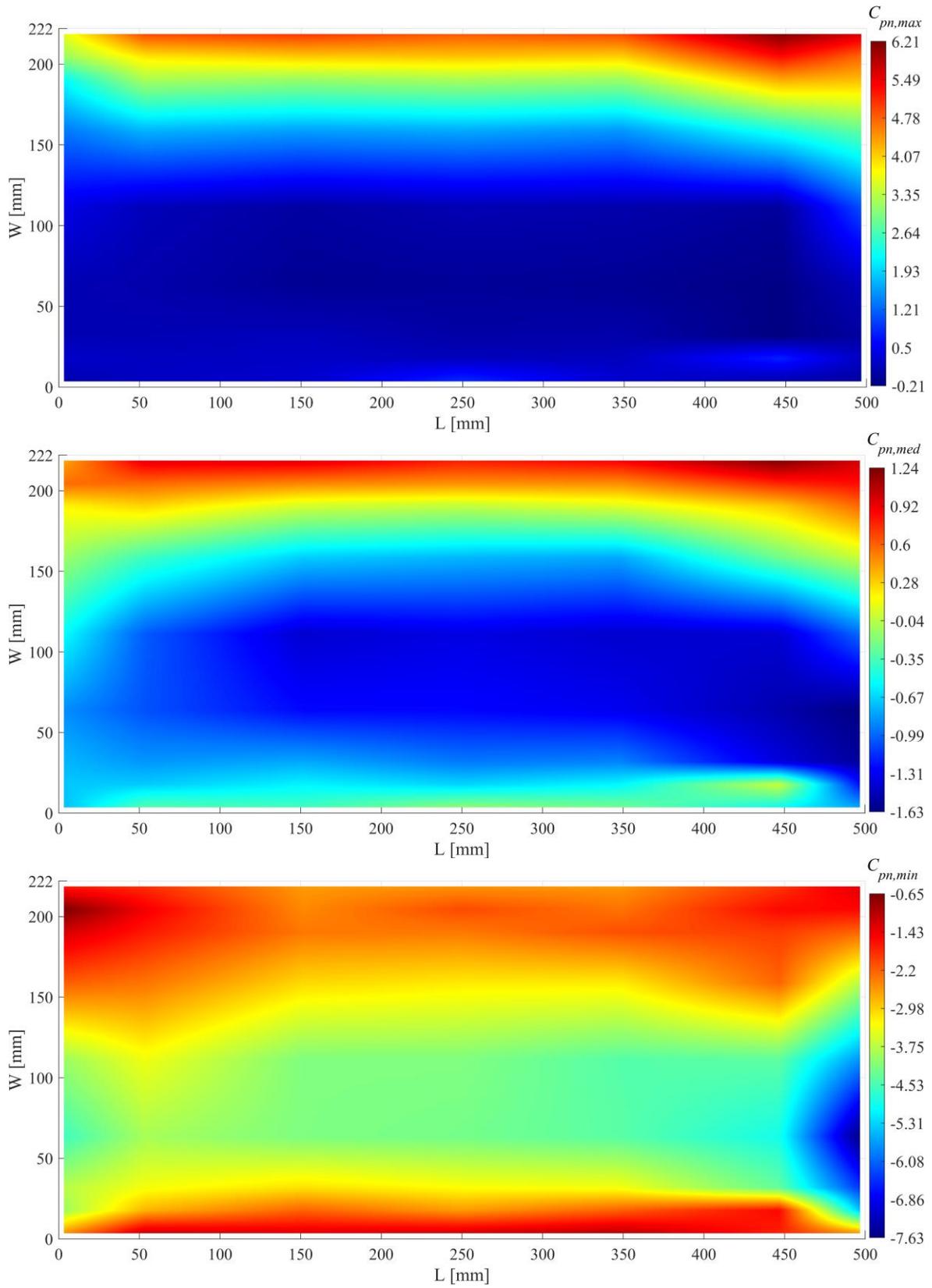


Figura B.20 Coeficientes de presión para  $\theta = 170^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos

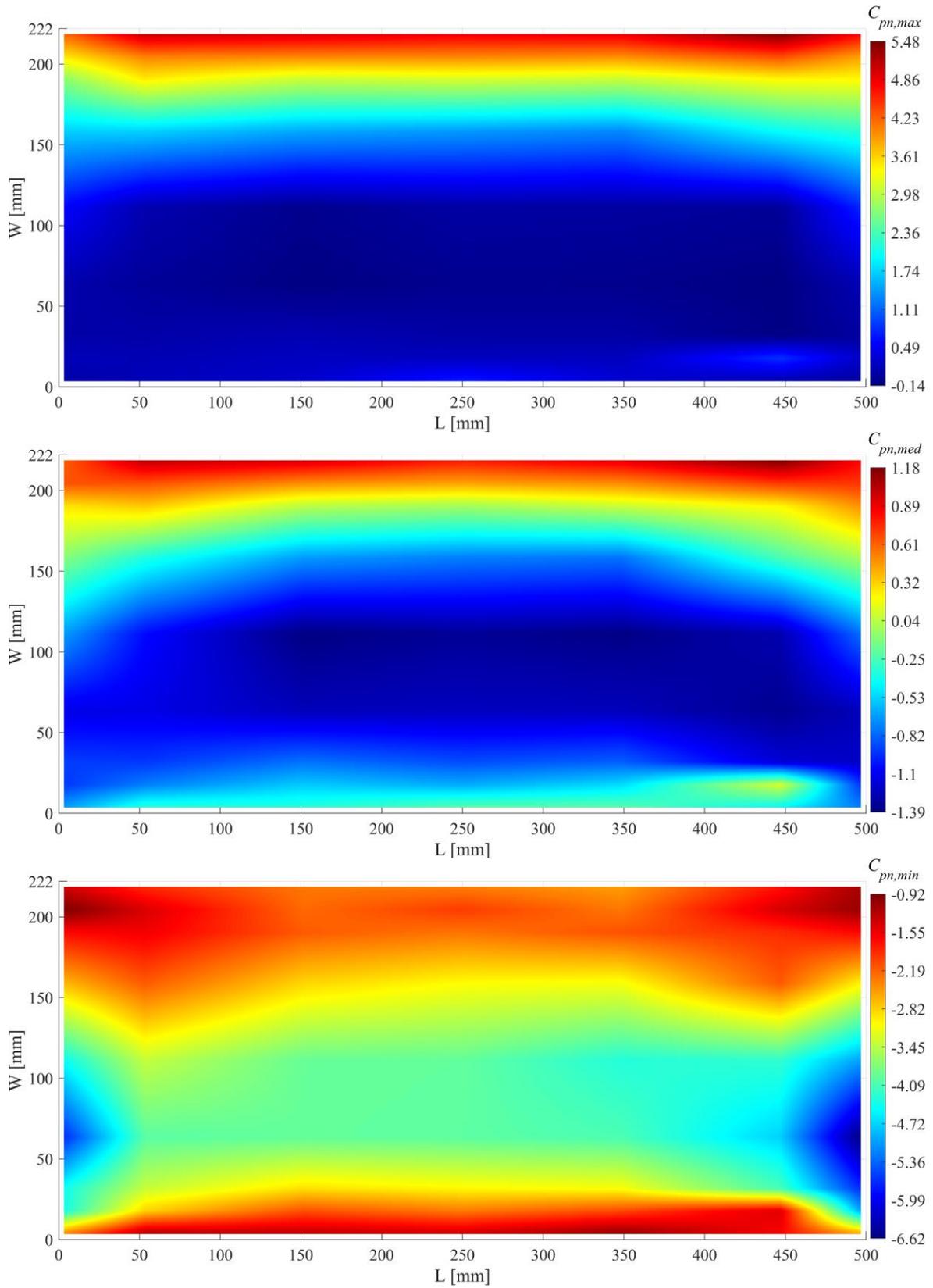


Figura B.21 Coeficientes de presión para  $\theta = 180^\circ$ :  $C_{pn}$  máximos,  $C_{pn}$  medios,  $C_{pn}$  mínimos