

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTUDIO DE CARGAS EÓLICAS EN EDIFICIOS BAJOS CON CUBIERTA DE
GRAN PENDIENTE MEDIANTE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO, Y
COMPARACIÓN CON EL REGLAMENTO CIRSOC 102**

**Proyector Integrador Profesional
presentado por**

MARIANO LASTRA

ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
para acceder al título de

INGENIERO CIVIL

Dirección de tesis:

Directora: Dra. Ing. Anabel Apcarian

Codirector: Ing. Carlos Walter

Neuquén, 03 de Agosto de 2023

AGRADECIMIENTOS

Por supuesto que a mis padres y mi hermana, sin su apoyo incondicional nada de esto hubiera sido posible.

A mi compañera Florencia, por haber tolerado mi humor durante esta última etapa.

A mis grandes amigos, por esas palabras de aliento tan necesarias.

A mi directora de Proyecto Integrador Profesional, Dra. Anabel Apcarian por su predisposición desde el día uno y haber soportado mis mensajes prácticamente diarios.

A mi codirector Carlos Walter, por sus aportes en este Proyecto Integrador Profesional.

Una mención especial a un gran profesor con quien tuve la suerte de coincidir, Jorge Lässig. Una persona no solo brillante en su área de estudio, sino también (y aún más importante), en su calidez humana.

A los miembros del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, Ubaldo Jara y Juan Valle Sosa, quienes hicieron todo lo que estaba a su alcance por ayudar y acompañar en el Proyecto.

A cada maestro, no solo académico, que conocí a lo largo de la vida. Parte de lo que soy hoy en día es gracias a ellos.

RESUMEN

El viento es un factor meteorológico importante en la zona patagónica, y su acción sobre las construcciones es determinante en análisis de cargas sobre algunas tipologías estructurales de la región. Particularmente en la zona cordillera, predominan viviendas con pendiente de cubierta mayor a 30°. Este diseño favorece el deslizamiento de la nieve por la cubierta disminuyendo la sobrecarga producida por la misma pero la pendiente acelera al viento generando zonas de concentración de tensiones.

En la norma argentina para la acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102 no se establecen grandes diferencias para el cálculo de cargas eólicas sobre techos de poca y gran pendiente, mientras que en otros estándares internacionales sí.

En este proyecto se estudió el comportamiento de una vivienda con techo a dos aguas de inclinación 45 ° bajo carga eólica en un túnel de viento, simulando las condiciones de viento en la cordillera de Neuquén. Los resultados se compararon con las cargas obtenidas mediante cálculo analítico utilizando el reglamento CIRSOC 102.

Se encontraron grandes diferencias entre los coeficientes de presión sobre la cubierta medidos en túnel de viento con los calculados con la norma, si bien la distribución de presiones sobre la superficie sigue en ambos casos la misma tendencia.

Se concluye la necesidad de nuevos ensayos mejorando el modelo utilizado para validar los coeficientes de presión obtenidos.

Palabras clave: Túnel de viento – Coeficiente de presión – Cubierta de gran pendiente – Zona cordillerana.

ABSTRACT

Wind is an important meteorological factor in the Patagonian area, and its action on buildings is essential in the analysis of loads on some structural typologies in the region. Particularly in the mountain range, houses with a roof slope greater than 30° predominate. This design helps the sliding of snow on the roof, reducing the overload produced by it, but the slope accelerates the wind developing stress concentration areas.

In the Argentinean norm for the action of the wind on the constructions CIRSOC 102, no major differences are established for the calculation of wind loads on low and high slope roofs, while other international standards do.

This project studied the behavior of a house with a gabled roof with a 45° inclination under wind load in a wind tunnel, simulating the wind conditions in the Neuquén mountain range. The results were compared with the loads obtained by analytical calculation using the CIRSOC 102 regulation.

Large differences were found between the pressure coefficients on the roof measured in the wind tunnel and those calculated with the standard, although the pressure distribution on the surface follows the same trend in both cases.

The need for new tests is necessarily, improving the model used to validate the pressure coefficients obtained.

Key words: Wind tunnel – Pressure coefficient – High slope roofs – Mountain range.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE	III
SIMBOLOGÍA	V
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco conceptual	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo general	1
1.2.2 Objetivos particulares	2
1.3 Metodología	2
1.4 Estructura del trabajo	2
CAPÍTULO 2	4
ANTECEDENTES	4
2.1 Estado del arte: casos estudiados	4
2.2 Estado del arte: casos reales	7
2.3 Estado del arte: análisis reglamento CIRSOC 102 – 2005	9
2.4 Estado del arte: análisis reglamento ASCE/SEI 7 – 2010	10
2.5 Estado del arte: análisis reglamento UNE-EN 1991-1-4	11
CAPÍTULO 3	12
ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO FÍSICO	12
3.1 Montaje	12
3.1.1 Prototipo	12
3.1.2 Modelo	15
3.1.3 Túnel de viento	17
3.2 Análisis de semejanza dimensional	18
3.2.1 Conservación del número de Reynolds	19
3.2.2 Conservación del flujo incompresible	19

3.2.3	Conservación del número de Jensen	20
3.2.4	Caracterización del viento en el túnel	20
3.3	Instrumental de medición	21
3.4	Configuración para los ensayos	23
3.5	Ensayo para la obtención de coeficientes de presión <i>C_p</i> sobre el monoblock	25
3.5.1	Objetivo	25
3.5.2	Metodología	25
3.6	Bloqueo en el Túnel de Viento	28
3.6.1	Bloqueo sólido	28
3.6.2	Bloqueo de estela	28
3.6.3	Método convencional de corrección	29
3.6.4	Bloqueo en Túnel de Viento de Capa Límite Atmosférica	29
3.7	Corrección para estabilización del <i>C_p</i>	30
3.8	Resultados	31
3.9	Análisis de resultados	34
CAPÍTULO 4		38
CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN SEGÚN EL CIRSOC 102		38
4.1	Procedimiento	38
CAPÍTULO 5		47
ANÁLISIS		47
CAPÍTULO 6		53
COMPARACIÓN DE CARGAS DE NIEVE Y VIENTO EN FUNCIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA CUBIERTA		53
6.1	Procedimiento	53
CAPÍTULO 7		59
CONCLUSIONES		59
7.1	Principales aportes de la investigación	59
7.2	Trabajos futuros	60
BIBLIOGRAFÍA		62
APÉNDICE A: obtención curvas velocidad media para ambiente urbano, ciudad y modelo		64

SIMBOLOGÍA

B	dimensión horizontal del edificio, medida normal a la dirección del viento [m]	
C_e	factor de exposición	
C_f	coeficiente de fuerza	
C_p	coeficiente de presión	
C_{pr}	coeficiente de presión obtenido en el túnel de viento	
C_{pt}	coeficiente de presión obtenido mediante el cálculo en el reglamento CIRSOC	
102 – 2015		
C_s	factor de pendiente	
C_t	factor térmico	
F	carga de viento de diseño	
G	factor de ráfaga	
G_f	factor de ráfaga	
GC_{pf}	coeficiente de presión externa	
GC_{pi}	coeficiente de presión interna	
I	factor de importancia	
I_u	intensidad de turbulencia	
K_d	factor de direccionalidad	
K_h	coeficiente de exposición para presión dinámica	
K_z	coeficiente de exposición para presión dinámica	
K_{zt}	factor topográfico	
L	dimensión horizontal del edificio, medida paralela a la dirección del viento [m]	
L_p	longitud del prototipo	[m]
L_M	longitud del modelo a ensayar en el túnel de viento	[m]
M	masa	[kg]
P	exponente de la Ley de Sutton	
P_i	presión toma estática	[Pa]
P_0	presión atmosférica	[Pa]
Re	número de Reynolds	
T	periodo natural estructura	[s]
V	velocidad básica del viento	[m/s]
Z	rugosidad del terreno	[m]
c	coeficiente de escala	
h	altura media de la cubierta	[m]
k	coeficiente de forma	[m/s]
p	carga de viento de diseño	
p_f	carga de nieve sobre cubiertas planas	[kN/m ²]
p_g	carga de nieve a nivel del terreno	[kN/m ²]
p_s	carga de nieve sobre una cubierta con pendiente	[kN/m ²]
q_h	presión dinámica	
q_z	presión dinámica	
t	tiempo	[s]

u	velocidad media anual	[m/s]
$u(z)$	velocidad a la altura z	[m/s]
u_i	velocidad a la altura z_i	[m/s]
z_i	altura i conocida	[m]
z	altura sobre el nivel del terreno	[m]
θ	ángulo del plano de la cubierta respecto a la horizontal	[°]
ρ	densidad del aire	[kg/m ³]
σ_u	desvío estándar	[m/s]
μ	viscosidad del aire	[P]

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Marco conceptual

El viento es un factor meteorológico importante en la zona patagónica, y su acción sobre las construcciones es determinante en análisis de cargas sobre algunas tipologías estructurales de la región.

En el cuerpo normativo argentino para la seguridad en las obras civiles, la acción del viento sobre las construcciones está reglamentada por el CIRSOC 102. En esta norma no se establecen grandes diferencias para el cálculo de cargas eólicas sobre techos de poca y gran pendiente, mientras que en otros estándares internacionales sí. Es el caso del reglamento *AS/NZS 1170.2-2002 Standards Australia/Standards New Zealand, Structural design—General requirements and design actions, Wind actions*, que establece distintas metodologías para la ponderación de los coeficientes de carga eólica en función de la pendiente de la cubierta.

Los techos de gran pendiente son usuales en la zona cordillerana, donde predominan las viviendas de tipología alpina con pendiente de cubierta mayor a 30°. Este diseño favorece el deslizamiento de la nieve por la cubierta disminuyendo la sobrecarga producida por la misma. Sin embargo la pendiente acelera al viento generando zonas de concentración de tensiones.

En este proyecto se realizará el estudio del comportamiento de una hipotética vivienda con techo a dos aguas de inclinación 45 ° bajo carga eólica en un túnel de viento, simulando las condiciones de viento en la cordillera de Neuquén. Los resultados se compararán con las cargas obtenidas mediante cálculo analítico utilizando el reglamento CIRSOC 102 y se observará si existen diferencias sustanciales.

Se espera que este trabajo sea un aporte para el nuevo reglamento CIRSOC 102, actualmente en preparación, así como también que los resultados obtenidos permitan optimizar las construcciones en la región cordillerana.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo del proyecto es comparar las cargas eólicas obtenidas mediante ensayo en túnel de viento con las determinadas con el reglamento CIRSOC 102 sobre un edificio bajo con cubierta de gran pendiente, ubicado en la zona cordillerana de la provincia de Neuquén.

1.2.2 Objetivos particulares

Como complemento del objetivo general, se incluyen los siguientes objetivos particulares:

- Comparar factor de ponderación entre la carga de nieve y la carga de viento.

Como corolario de los anteriores surge la elaboración de recomendaciones de diseño para el tipo de estructura en estudio.

1.3 Metodología

El proyecto integrador se llevará a cabo en el Laboratorio de Dinámica de los Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería, en el marco del proyecto de investigación “Aplicaciones en Ingeniería del Viento” (Proyecto 04/I264). Se decidió dividir el mismo en seis actividades distintas.

El trabajo comienza con la búsqueda y análisis de antecedentes, estándares, reglamentaciones, etc. Una vez finalizada esta tarea, se procede a analizar los datos meteorológicos de la provincia de Neuquén. Para ello se utilizaron datos meteorológicos disponibles en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. Los mismos provienen de registros de estaciones meteorológicas instaladas en la zona.

Una vez concluida la etapa de búsqueda y análisis de información se da comienzo a una etapa mayormente analítica y se realiza tanto el cálculo de cargas eólicas según Reglamento CIRSOC 102, como el análisis dimensional del fenómeno determinando los principales números adimensionales para el experimento.

Por último, en una etapa de análisis de resultados y elaboración de conclusiones, se comparan ambos métodos y se procede a la elaboración del informe final.

1.4 Estructura del trabajo

El presente Proyecto Integrador Profesional, se estructura de la siguiente manera

- **Capítulo 1: introducción.** Se presenta el contexto y se definen los objetivos generales y particulares, acompañados de la descripción de la metodología del trabajo.
- **Capítulo 2: antecedentes.** Se exponen los antecedentes recopilados.

- **Capítulo 3: ensayos en túnel de viento físico.** Se define el modelo a utilizar, y el entorno del mismo (modelo de capa límite atmosférica y rugosidad aerodinámica. También se calibra el túnel de viento al perfil de viento definido anteriormente.

- **Capítulo 4: cálculo de los coeficientes de presión según el CIRSOC 102.** Se realizará el cálculo de los coeficientes de presión para el prototipo según el “Método 2 – procedimiento analítico” del reglamento CIRSOC 102.

- **Capítulo 5: análisis.** Se presentan los resultados obtenidos y se establecen comparaciones y análisis de los mismos.

- **Capítulo 6: comparación de cargas de nieve y viento en función de la inclinación de la cubierta.** Como un análisis adicional complementario y a los efectos de analizar la conveniencia o no de la tipología de la cubierta inclinada se calculará y comparará la carga, tanto de viento como de nieve, de tres casos de distinta inclinación (15°, 35° y 45°).

- **Capítulo 7: conclusiones.** Se concluye sobre los resultados obtenidos y se brindan los principales aportes de la investigación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Estado del arte: casos estudiados

En las últimas décadas se ha estudiado el comportamiento aerodinámico de las estructuras en base a sus características morfológicas, geométricas y materiales, teniendo en la rugosidad superficial y el viento local en el sitio de emplazamiento. Esto ha permitido mejorar las condiciones de habitabilidad de los edificios y del confort eólico a nivel peatón fuera de los mismos, así como también la optimización de materiales y de su comportamiento estructural bajo cargas de viento.

Con el paso del tiempo han surgido mayor cantidad de herramientas para poder realizar estos análisis. Desde el primer túnel de viento desarrollado para estudiar la acción del viento en las construcciones por Francis Wenham en 1871 en Gran Bretaña hasta la actualidad se han desarrollado muchas herramientas para estudiar la interacción de las construcciones con el viento. La tecnología de los túneles de viento está en continuo avance, al igual que el desarrollo de softwares que utilizan fluidodinámica computacional para realizar simulaciones numéricas de objetos inmersos en la capa límite atmosférica. En las Fig. 2.1 y 2.2 se muestran ejemplos de simulación en túnel de viento virtual y físico respectivamente.

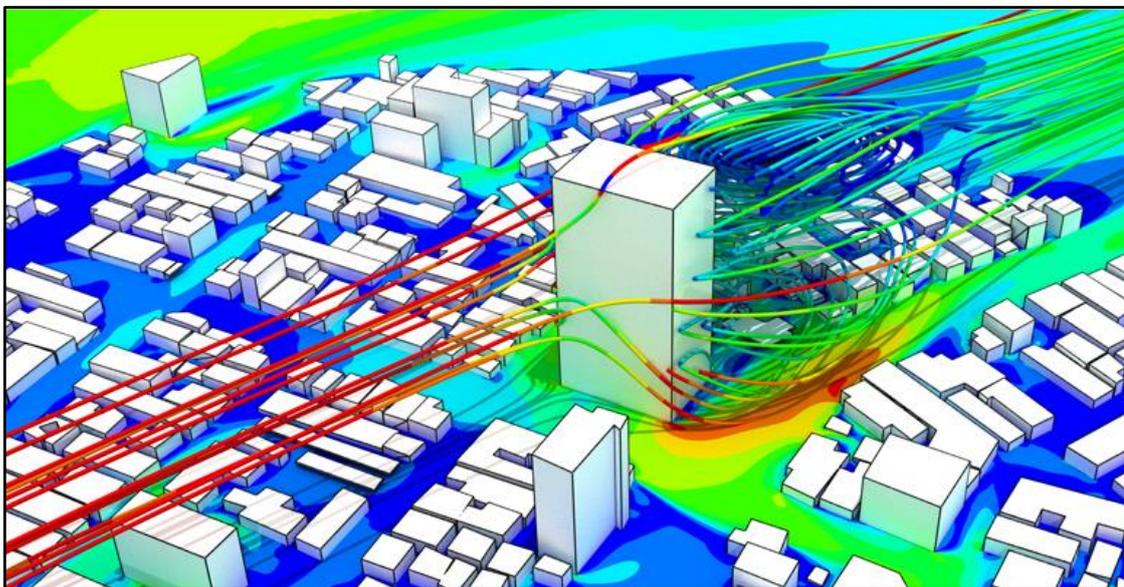


Figura 2.1: ejemplo de una simulación en un túnel de viento virtual a través de software diseñado para ello



Figura 2.2: ejemplo de una simulación en túnel de viento físico

Ginger y Holmes (2003) analizaron la relación que hay entre la longitud de un edificio bajo con cubierta a dos aguas y las cargas de viento sobre el mismo (Fig. 2.3). Arribaron a la conclusión de que el aumento en el sentido longitudinal de la edificación traía aparejado un aumento en las presiones de succión en la cubierta y pared a sotavento implicando esto un aumento de las cargas de diseño para vientos oblicuos. Además, demostraron que para varias configuraciones de este tipo de estructura (por ej. ángulo de la cubierta igual a 36°) la norma australiana se encontraba subdimensionada en un alto nivel, pudiendo esto acarrear graves consecuencias.

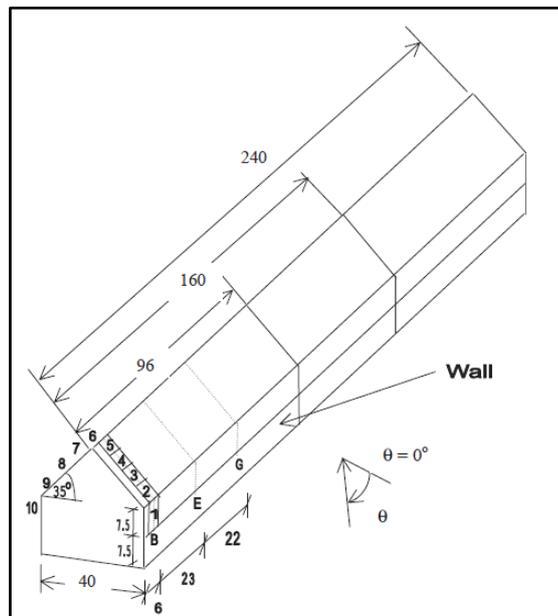


Figura 2.3: modelos ensayados por Ginger y Holmes (2003)

Kim y Kanda (2010) compararon la interacción de cuatro edificios de distinta geometría con las fuerzas de sustentación y arrastre. Consideraron un edificio de sección constante, otro de doble altura, y otros dos piramidales con distintas relaciones de estrechamiento. (Fig. 2.4). Encontraron que cualquier variación respecto al modelo de sección constante ayuda a mejorar el comportamiento aerodinámico de la estructura, entendiéndose como “mejora”, la reducción de la fuerza tanto de arrastre como la de sustentación.

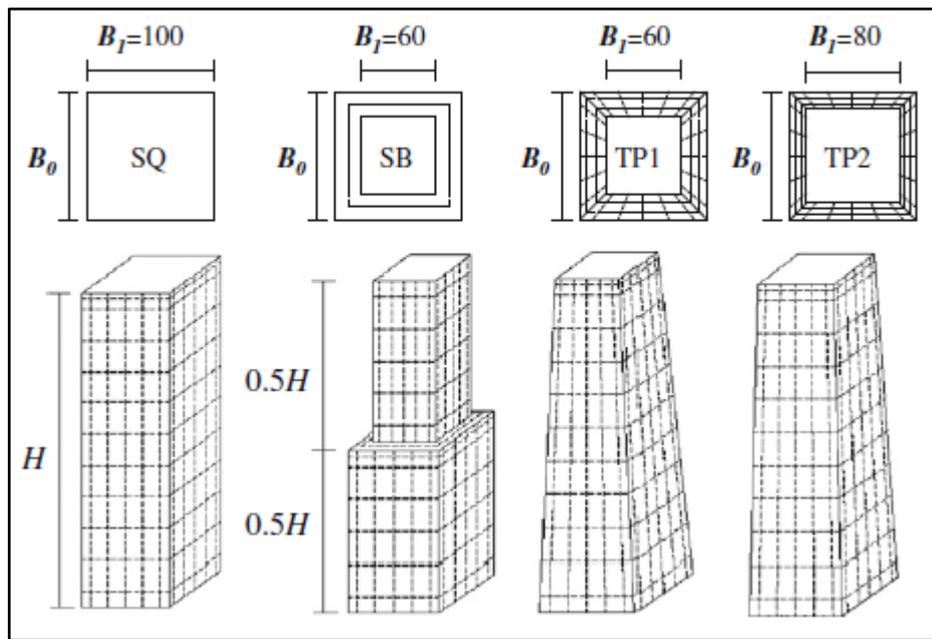


Figura 2.4: modelos ensayados por Kim y Kanda (2009)

Pindado, Meseguer y Franchini (2011) estudiaron la influencia de un edificio aguas arriba en cuanto a la succión media inducida por el viento en el techo plano de un edificio de poca altura (Fig. 2.5). Arribaron al resultado de que el aumento de la succión media es debido principalmente al aumento en la altura del modelo B (edificio aguas arriba).

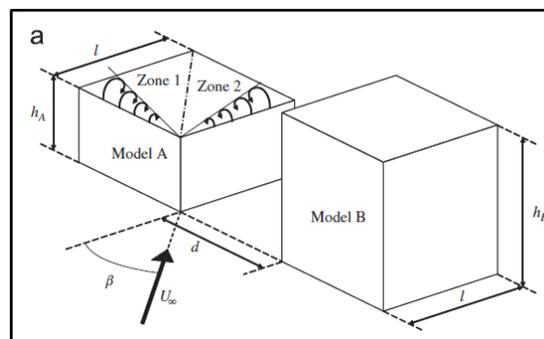


Figura 2.5: gráfico esquemático de los ensayos realizados por Pindado, Meseguer y Franchini (2011)

Suaris e Irwin, (2010) compararon la utilización de parapetos contra la no utilización de los mismos en las zonas de mayor succión de la estructura (puntos angulosos de las cubiertas, llamados esquinas). (Fig. 2.6). El estudio reveló el gran aporte que hacen estos parapetos agujereados en la disminución de la succión, lo que trae aparejado una disminución de las secciones de las vigas en la estructura, generando un edificio de menor peso, menor consumo de materiales y todos los beneficios que esto conlleva.

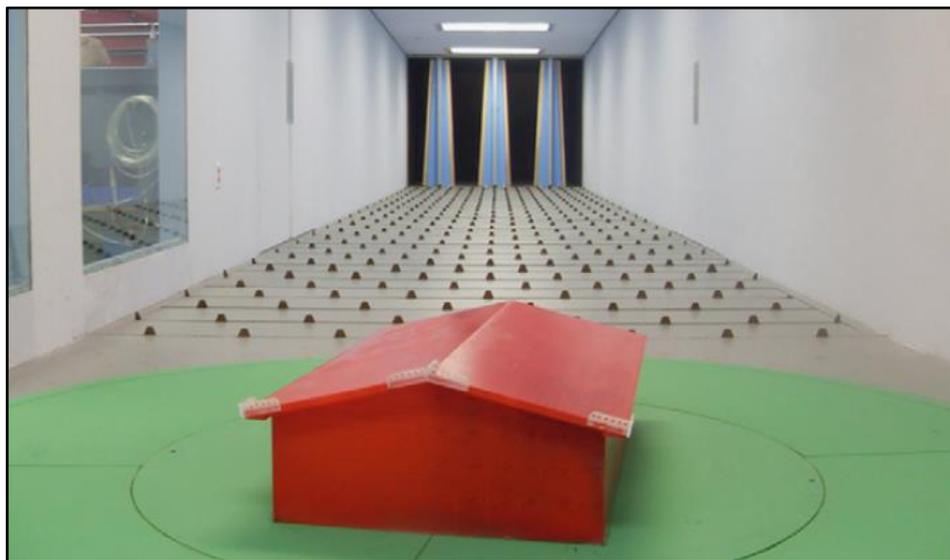


Figura 2.1: modelo con parapetos ensayado en túnel de viento por Suaris e Irwin (2010)

2.2 Estado del arte: casos reales

En el mes de Octubre del año 2019, en la ciudad de Junín de los Andes, se registraron de los efectos daños en las construcciones producidos por una tormenta de viento. (finterremoto959, 2019) (Fig. 2.7.)



Figura 2.2: voladura de techo en 2019 en la ciudad de Junín de los Andes

También en la ciudad de Junín de los Andes en Octubre de 2022, ocurrió un evento de similares características con aún peores consecuencias ya que llegó a ocasionar un incendio descontrolado. (Imneuquen, 2022) (Figs. 2.8 y 2.9)



Figura 2.3: voladura de techo en 2022 en la ciudad de Junín de los Andes

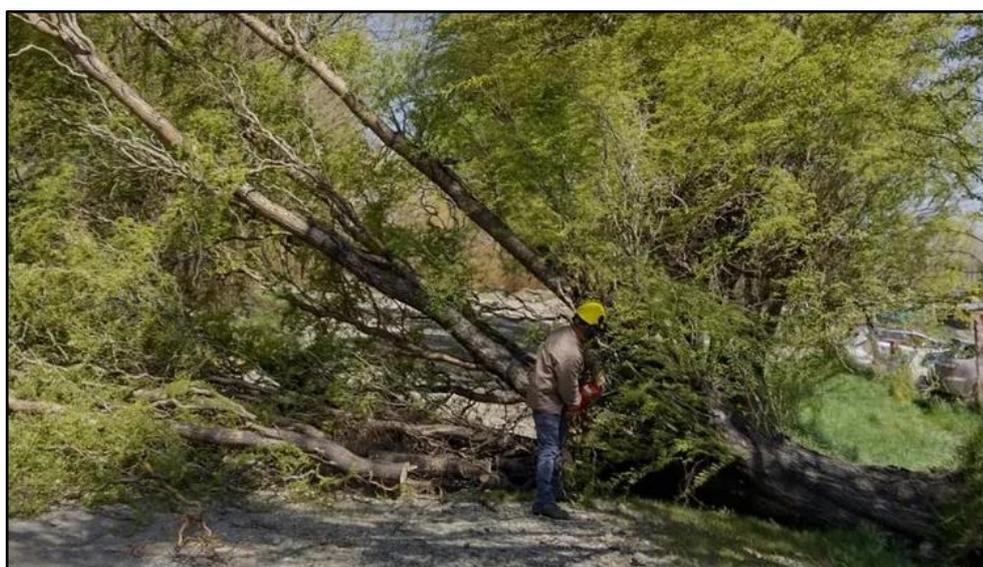


Figura 2.4: caída de árboles en Junín de los Andes en 2022, bloqueando caminos de circulación vehicular

Otro ejemplo de estos casos se dio en la ciudad de San Martín de los Andes en el mes de Diciembre del año 2020. Trajo aparejado voladuras de cubiertas de grandes dimensiones. (Barros, 2019). (Fig. 2.10.)



Figura 2.5: vecinos colaborando con el retiro de la cubierta de la calzada vehicular

2.3 Estado del arte: análisis reglamento CIRSOC 102 – 2005

La norma argentina para el cálculo de la acción de viento sobre las construcciones es el reglamento CIRSOC 102. (Centro de investigación de los reglamentos de seguridad de las obras civiles, 2005). La misma presenta un mapa de isotacas de vientos extremos de todo el país. Los valores se encuentran en m/s y corresponden a una ráfaga de 3 segundos a 10 m de altura sobre el terreno para categoría de exposición C (terreno abierto) y están asociados con una probabilidad anual de ocurrencia de 0,02. Para Neuquén la isotaca máxima es de 48 m/s. (Fig. 2.11)

La norma hace uso de tres métodos para poder obtener las cargas de viento de diseño: el procedimiento simplificado (Método 1), el procedimiento analítico (Método 2) y el procedimiento del túnel de viento (Método 3). En ese proyecto integran se utilizan los procedimientos analítico y de túnel de viento. El método simplificado requiere que la pendiente de la construcción en estudio sea menor a 10°, por lo que no es de aplicación al caso en estudio.

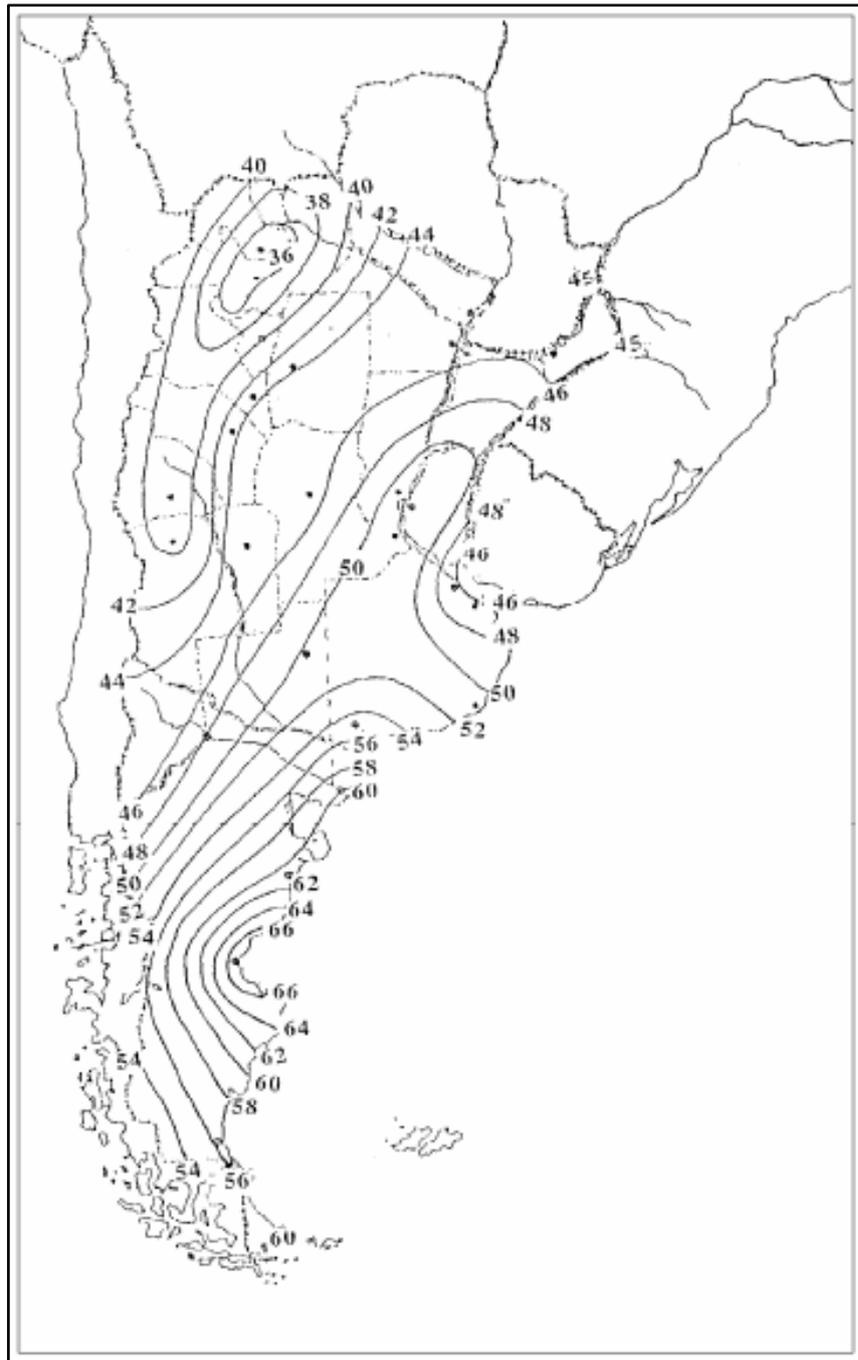


Figura 2.6: isotacas de vientos extremos para la República Argentina según el Reglamento CIRSOC 102 (2005)

2.4 Estado del arte: análisis reglamento ASCE/SEI 7 – 2010

El reglamento CIRSOC 102 (2005) fue realizado en base a la norma ASCE/SEI 7 (American Society of Civil Engineers, 2010). Esta norma presenta el mapa de isotacas para Estados Unidos también considerando una velocidad de ráfaga de 3 segundos en m/s a 10 m sobre el terreno para categoría de exposición C , con una probabilidad anual de 0,02. (Fig.2.12)

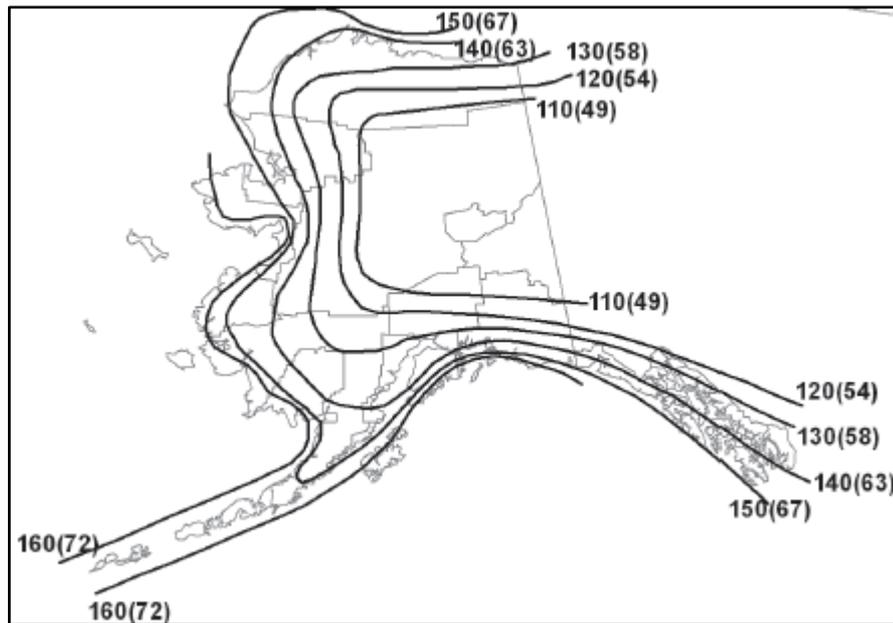


Figura 2.7: isotacas de vientos extremos para la Estado Unidos según el Reglamento ASCE/SEI 7 – 2010

La Norma ASCE/SEI 7 (2010) hace uso de cinco métodos para poder obtener las cargas de viento de diseño, el procedimiento direccional (Capítulo 27), el procedimiento envolvente (Capítulo 28), el método para calcular cargas de viento en otras estructuras y accesorios de construcción (Capítulo 29), el método para obtener las cargas de viento en los componentes y revestimientos (Capítulo 30) y el procedimiento del túnel de viento (Capítulo 31).

2.5 Estado del arte: análisis reglamento UNE-EN 1991-1-4

La Norma UNE-EN 1991-1-4 clasifica en dos los cálculos a realizar, presión del viento en estructuras (Capítulo 5.2) y fuerzas del viento (Capítulo 5.3). Además, hace hincapié en la importancia de la ocurrencia no simultánea de picos de presiones de viento sobre la superficie y el efecto de las vibraciones de las estructuras debido a las turbulencias en los cálculos de estos. Por último, muestra cómo calcular los coeficientes aerodinámicos, que intervendrán tanto en el capítulo 5.2 como en el 5.3. Estos son, coeficiente de presión, coeficiente de presión neta, coeficiente de fricción y de fuerza.

CAPÍTULO 3

ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO FÍSICO

El túnel de viento es una herramienta utilizada para comprender el comportamiento de un flujo de aire alrededor de un objeto utilizando un modelo a escala. A partir de mediciones de presión sobre el objeto y del campo de velocidades del viento alrededor del mismo, por medio de un análisis dimensional puede determinarse el comportamiento del viento alrededor del prototipo o modelo real.

El diseño se describe como una sección (rectangular, circular, etc.) de dimensiones definidas que se mantiene constante a lo largo de determinada distancia. En uno de los extremos tiene un motor con hélice que succiona aire. En el otro, la entrada de aire. En esta última se ubican rejillas estabilizadoras, generadores de vórtices y tacos en el suelo del túnel para obtener el perfil de vientos con el adecuado grado de turbulencia. En la Fig. 3.1 se presenta un esquema de un túnel de viento existente en la actualidad, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de La Plata.

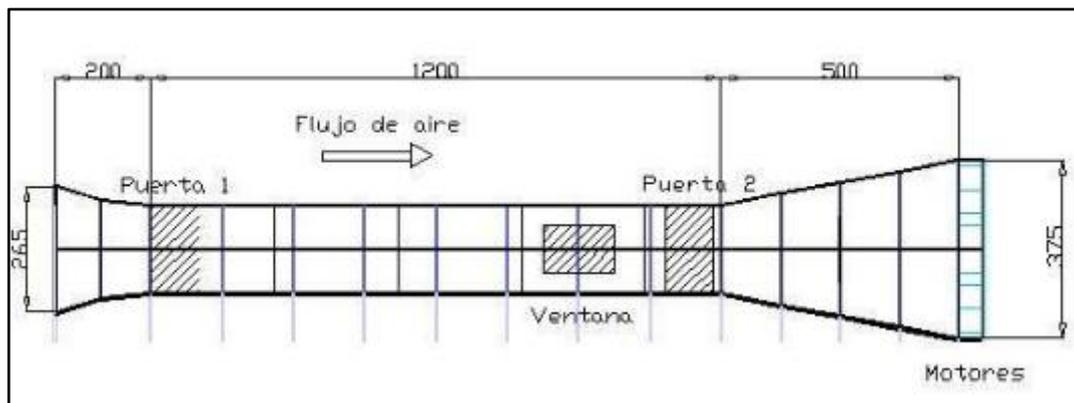


Figura 3.1: esquema del túnel de viento de La Plata. Página web oficial del Laboratorio de capa límite y fluidodinámica ambiental

En este proyecto se utilizó esta herramienta para modelar el edificio en estudio bajo carga de viento y medir los coeficientes de presión sobre la cubierta y paredes.

3.1 Montaje

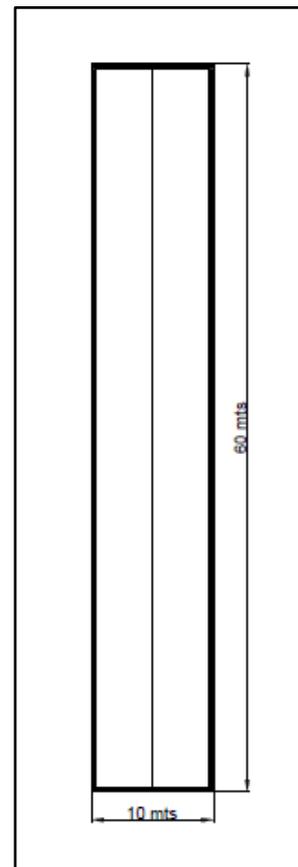
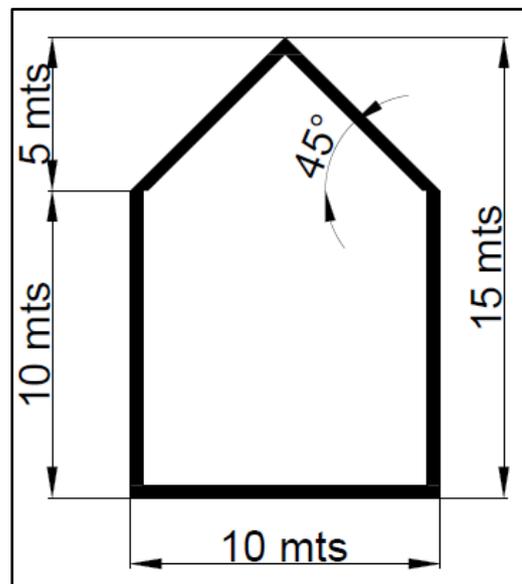
3.1.1 Prototipo

Se seleccionó como prototipo un edificio tipo monoblock de tres pisos con cubierta a dos aguas de gran pendiente (45°), de tipología arquitectónica característica de la región cordillerana (Fig. 3.2).



Figura 3.2: distintos tipos de edificios con cubiertas a dos aguas en región cordillerana

Las dimensiones, como pueden ser apreciadas en la Fig. 3.3, son de sesenta metros de largo, por diez metros de ancho, por quince metros de altura.



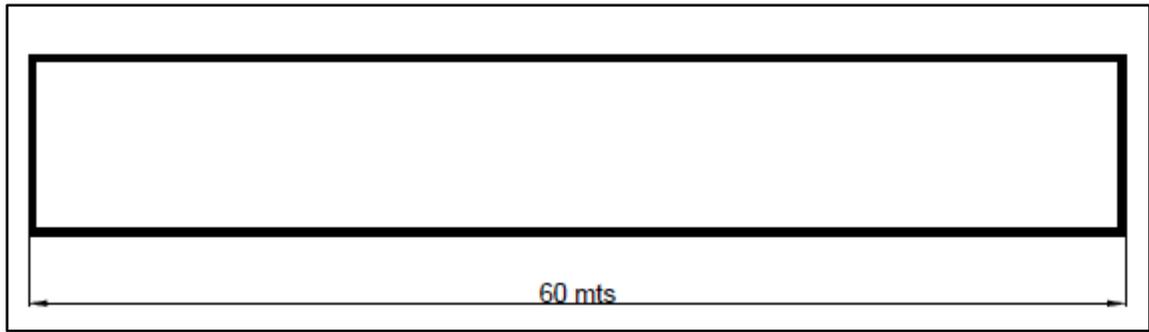


Figura 3.3: corte transversal, planta y corte longitudinal, respectivamente, con sus dimensiones

En base a lo mencionado en capítulos anteriores, se seleccionaron los datos de viento correspondientes a la región cordillerana

- *Velocidad de viento extrema con periodo de retorno de 50 años* (extraída del mapa de isotacas del CIRSOC 102).

$$V_{50} = 46.00 \frac{m}{s}$$

- *Perfil de viento en la zona*

Para considerar la variación de la velocidad de viento en un plano perpendicular al flujo se utilizó la Ley potencial de Sutton (Sutton, 1953).

$$V(z) = v_1 * \left(\frac{z}{z_1}\right)^\alpha$$

donde,

$V(z)$ = velocidad que se quiere conocer a la altura z

v_1 = velocidad de referencia a la altura z_1

z = altura a la que se quiere conocer la velocidad $V(z)$

z_1 = altura de referencia

α = exponente para la ley potencial de la velocidad media horaria del viento
Depende de la rugosidad aerodinámica de la zona de estudio (Fig. 3.4).

En este caso se consideraron los casos para ambiente correspondiente a ciudad ($\alpha=0,25$) y suburbio ($\alpha=0,15$).

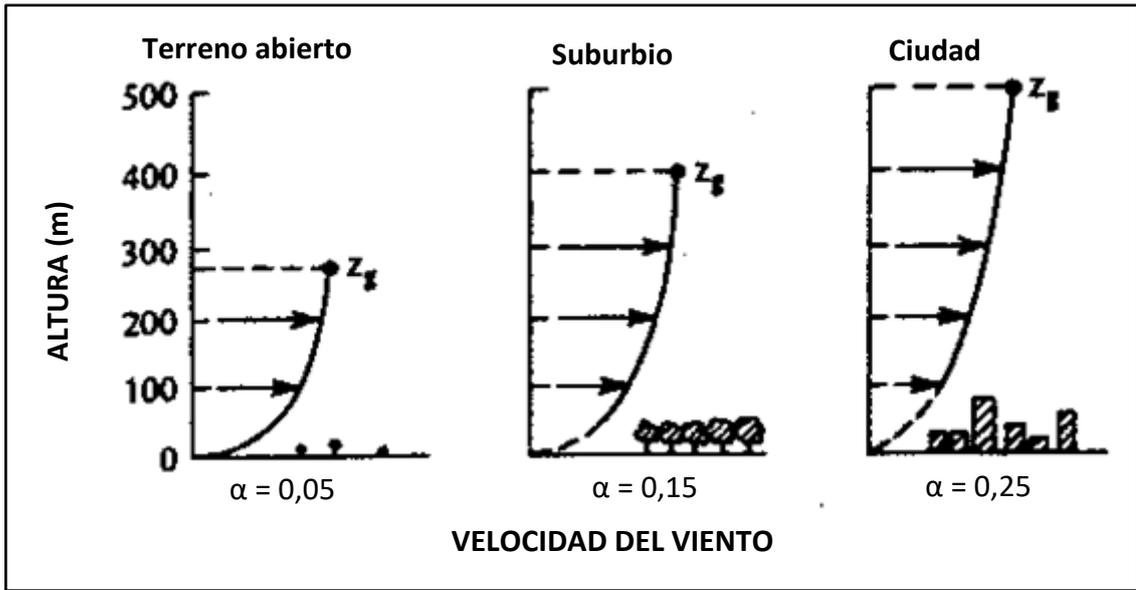


Figura 3.4: exponente para la ley potencial para terreno abierto, suburbio y ciudad. Lässig, Palese & Apcarian (2009)

En la Fig. 3.5 se presentan los perfiles obtenidos.



Figura 3.5: variación de la Velocidad con la altura para ciudad y suburbio

3.1.2 Modelo

Se construyó un modelo del prototipo en escala 1:100.

Las dimensiones del modelo fueron 60 cm de ancho, 10 cm de largo y alto total 15 cm, con techo a dos aguas y una pendiente de 45°. La relación ancho largo es de 6 veces.

En las Fig. 3.6, 3.7, 3.8 se puede observar un croquis del modelo, mientras que en la Fig. 3.9 se puede apreciar el mismo una vez materializado.

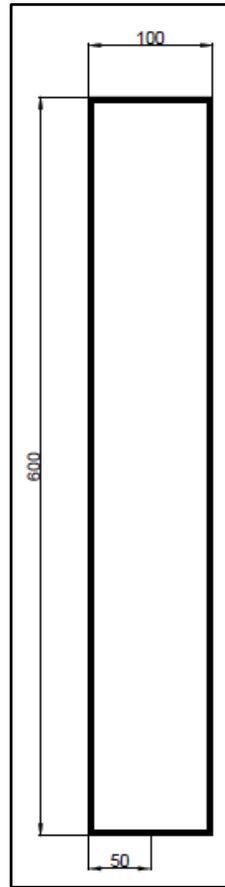


Figura 3.6: planta del modelo utilizado, con las dimensiones en mm

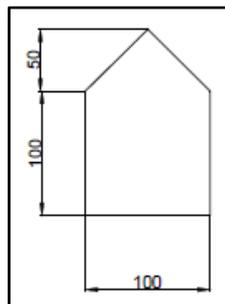


Figura 3.7: corte transversal del modelo utilizado, con las dimensiones en milímetros

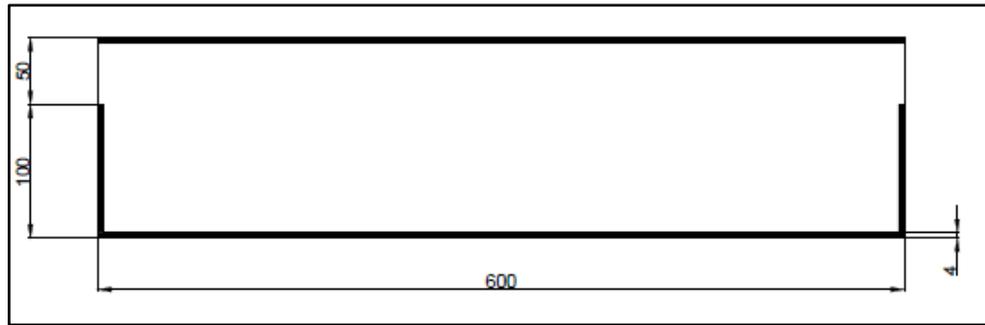


Figura 3.8: corte longitudinal del modelo utilizado, con las dimensiones en mm



Figura 3.9: fotos reales del modelo antes mencionado

3.1.3 Túnel de viento

Se utilizó uno de los túneles de viento pertenecientes al Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del

Comahue. El mismo tiene 8 metros de largo con una sección de prueba de 0,9 m x 0,90 m, es abierto (tipo capa límite atmosférica) con un motor eléctrico de 3 CV de potencia con regulador/estabilizador de velocidad.

La sección de prueba es de 0,45 x 0,90 m.

La velocidad máxima que puede obtenerse en el flujo es de 8,60 m/s. En la Fig. 3.10 se presenta el túnel utilizado.



Figura 3.10: túnel de viento utilizado en el ensayo

3.2 Análisis de semejanza dimensional

Para poder realizar ensayos en túnel de viento, se necesita de la semejanza de ciertos números adimensionales entre los flujos circulantes alrededor del prototipo y del modelo.

3.2.1 Conservación del número de Reynolds

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

$$R_e = \frac{V * L_c}{\nu}$$

Siendo,

$V =$ velocidad del viento (m/s)

$L_c =$ dimensión característica (m)

$\nu =$ viscosidad cinemática del aire (m²/s)

Tanto en el prototipo (p) como en el modelo (m), existirán dos Reynolds. Esto se debe a que un R_e corresponde a flujo transversal (t) y otro a flujo longitudinal (l).

$$R_{ept} = 77.988.506$$

$$R_{epl} = 280.758.621$$

$$R_{emt} = 145.805$$

$$R_{eml} = 524.897$$

La conservación de este número es prácticamente imposible de lograr, ya que el R_e del prototipo supera al del modelo en varios órdenes de magnitud. En este caso, el R_e del prototipo para un evento de viento extremo es de $7,7 \times 10^7$ y en el modelo con el túnel de viento funcionando a 8,60 m/s se logra un R_e de $1,4 \times 10^5$. Ambos valores difieren en dos órdenes de magnitud. Mantener el número de Reynolds implicaría conservar el producto $V * L$, lo que para una escala de longitud acotada a la sección transversal del túnel lleva a un valor de velocidad de fluido en los ensayos que puede transformar al flujo en compresible.

Para lograr la mejor aproximación se trabajó con las mayores escalas posibles de longitud y velocidad en el túnel de viento, y se verificó que en el prototipo y el modelo se mantuvieran el mismo régimen de flujo.

3.2.2 Conservación del flujo incompresible

El número de Mach M es la relación entre la velocidad de la corriente incidente y la velocidad del sonido en el fluido. Se considera que el flujo es incompresible si $M < 0.30$.

En el prototipo, con la velocidad extrema de 50 años de retorno propuesta en forma de mapa en el reglamento CIRSOC 102 resulta $M_{prototipo} = 0,13$. En el modelo, considerando la

velocidad máxima del flujo aguas arriba, el número de Mach es $M_{\text{modelo}} = 0,02$. Estos valores indican que el flujo se mantiene incompresible en todos los casos.

3.2.3 Conservación del número de Jensen

El número de Jensen $J_e = \frac{L}{Z}$, es la relación entre la longitud característica del modelo L , y la longitud de rugosidad del terreno Z . Con su conservación se busca la similitud entre la turbulencia del flujo en el prototipo y en el modelo.

La altura de rugosidad para el prototipo Z_p se encuentra entre 1.20m (Z_p de ciudad) y 0.20m (Z_p de suburbio). El número de Jensen en el prototipo es $J_{epc} = \frac{15 \text{ m}}{1.20 \text{ m}} = 12.50$ para el ambiente de ciudad y $J_{eps} = \frac{15 \text{ m}}{0.20 \text{ m}} = 75.00$ para el de suburbio. En el modelo se trabajó con una altura de rugosidad $Z_m = 0.003759704 \text{ m}$, lográndose un número de Jensen $J_{em} = \frac{0.15 \text{ m}}{0.003759704 \text{ m}} = 40$. Por lo tanto el número de Jensen logrado corresponde a una rugosidad intermedia entre ciudad y suburbio.

3.2.4 Caracterización del viento en el túnel

A las velocidades de ensayo, el perfil de velocidades de capa límite en el modelo es semejante al del prototipo, obteniéndose en todos los casos un perfil casi uniforme, como se observa en la Fig. 3.11. Los coeficientes α de la ley de potencia en el modelo fueron 0,26 para $V = 4,80 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y 0,28 para $V = 7,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, mientras que en el prototipo se tiene $\alpha = \frac{1}{4.00}$ para ciudad y $\alpha = \frac{1}{6.50}$ para suburbio.

Con los coeficientes α de la ley de potencia antes mencionados, se construyeron los perfiles de velocidades de ambiente de ciudad, de suburbio y túnel de viento. Los mismos se enseñan en la Fig. 3.11 y Fig. 3.12.

En el Apéndice A, se encuentra el desarrollo de cómo se obtuvieron las curvas.

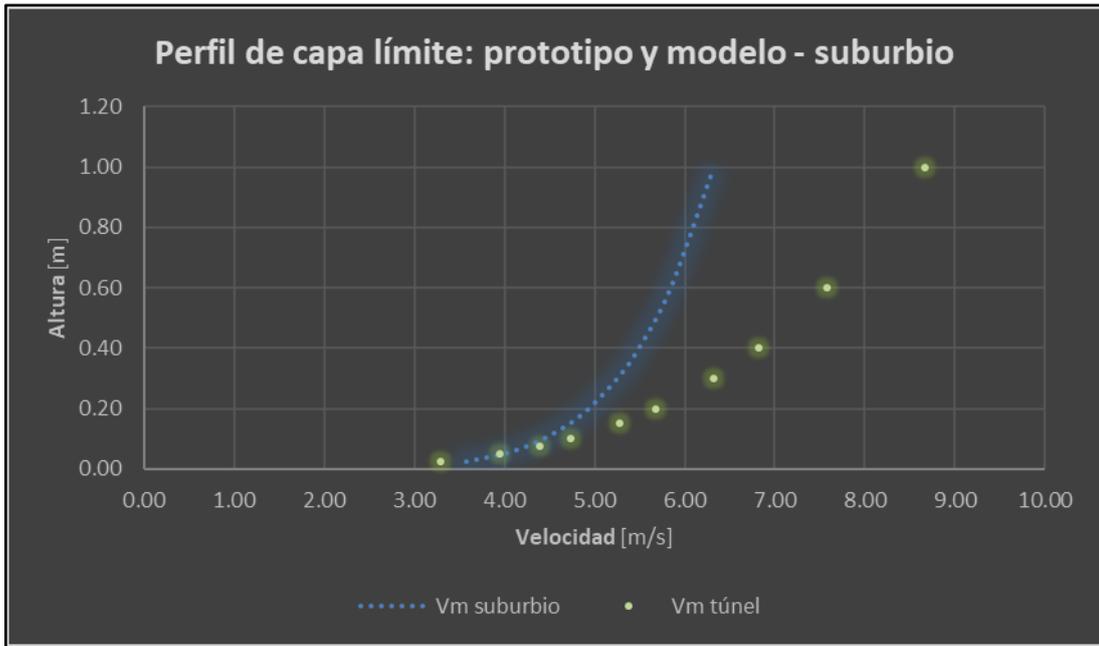


Figura 3.11: velocidad para suburbio y túnel de viento

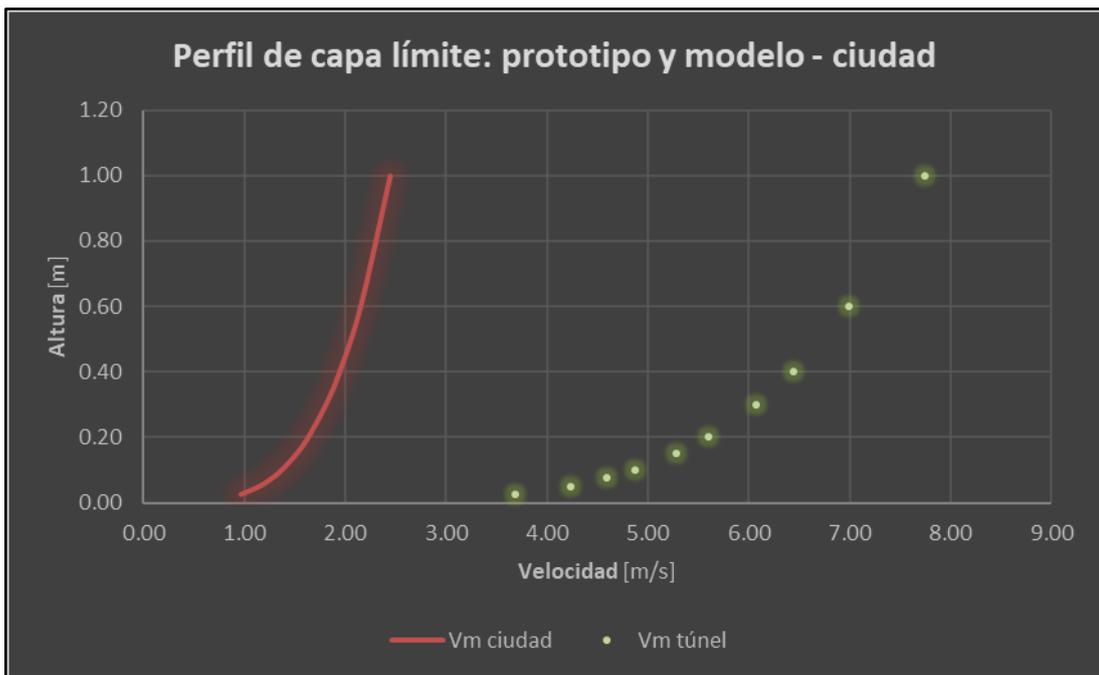


Figura 3.12: velocidad para ciudad y túnel de viento

3.3 Instrumental de medición

Dentro del túnel de viento, se realizaron mediciones de velocidad y de presión. La primera se realizó para conocer el comportamiento del flujo libre y en zonas cercanas al modelo. La segunda, para conocer la fuerza que se generaba en cada toma estática debido a la interacción fluido – modelo.

La medición de velocidad del viento dentro del túnel se realizó con un anemómetro de film caliente (CEM DT-8880) (Fig. 3.13)



Figura 3.13: anemómetro de film caliente, CEM DT-8880, utilizando durante los ensayos para medir la velocidad dentro del túnel

Para medir presiones estáticas sobre el modelo se realizaron tomas estáticas de presión que se conectaron por mangueras a sensores piezoeléctricos PASCO PS-2164 (Fig. 3.14).

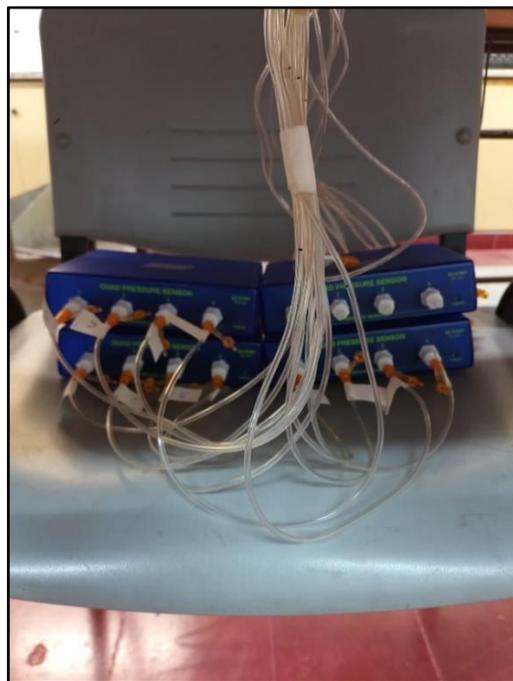


Figura 3.14: sensores piezoeléctricos utilizados, PASCO PS-2164

Los valores de las presiones estáticas son interpretados a través de un software (Data Studio) en una computadora, como se presenta en la Fig. 3.15.

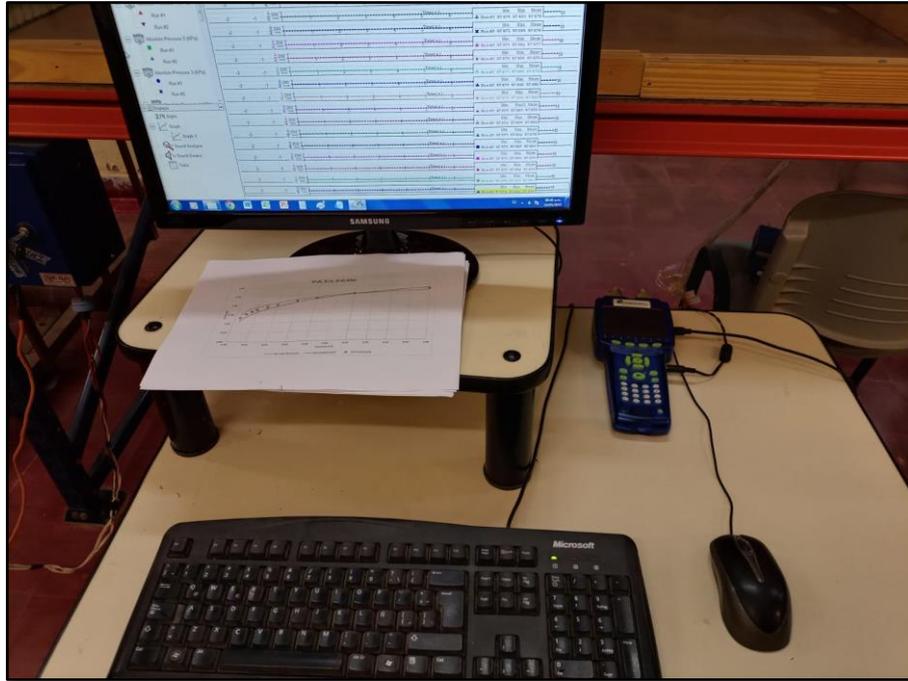


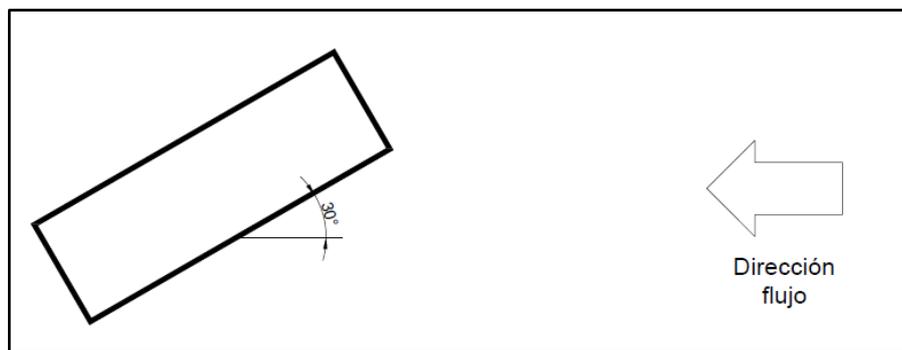
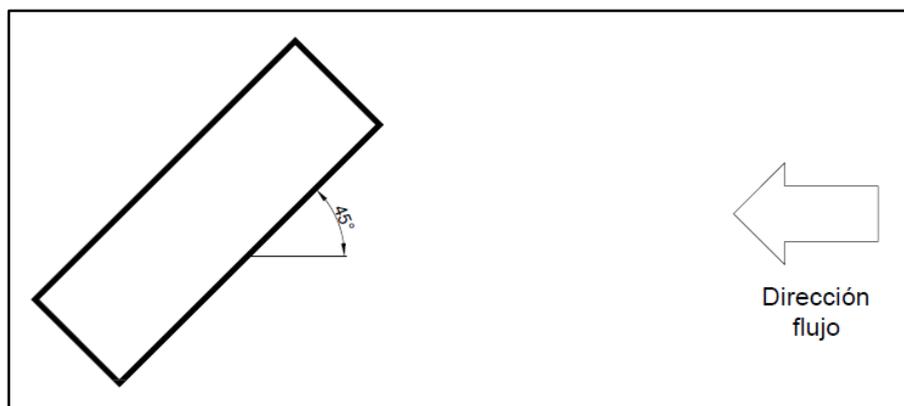
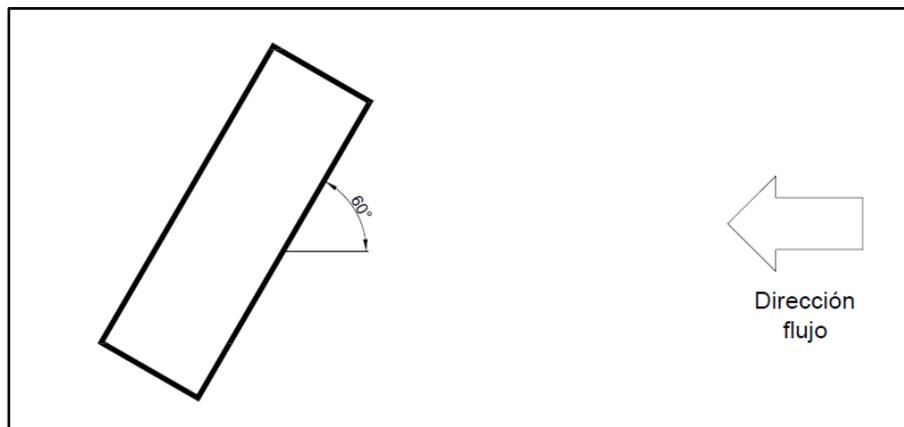
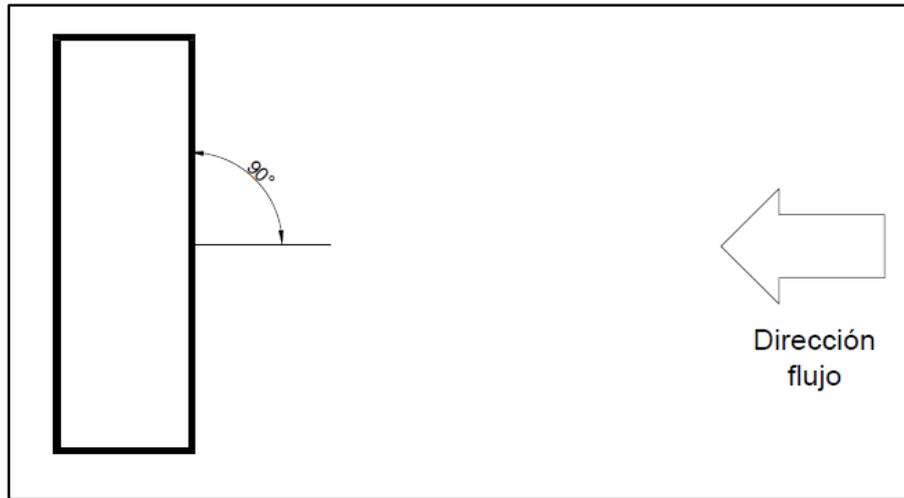
Figura 3.15: datalogger, software y PC utilizadas en el ensayo

3.4 Configuración para los ensayos

Inicialmente, se coloca la maqueta con su eje longitudinal perpendicular al eje del Túnel de Viento, o sea, en la posición 90° .

Se ubica también dentro de éste un anemómetro para medir la intensidad del viento que se aplica a la maqueta.

El ensayo se hace para las velocidades de viento de 8,60 m/s, en las posiciones 90° , 60° , 45° , 30° y 0° de la maqueta con respecto al eje del Túnel de Viento. En la Fig. 3.16, se presenta lo antes mencionado.



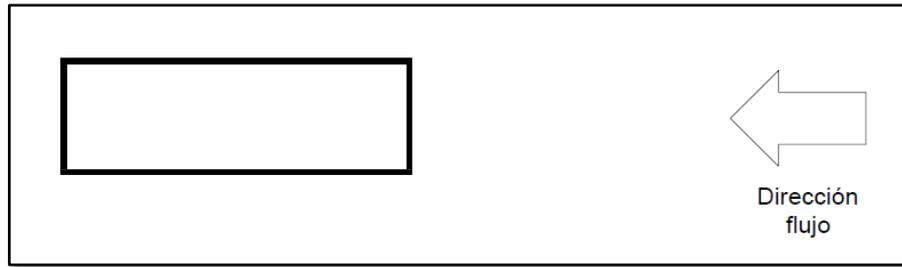


Figura 3.16: esquemas donde se aprecia la orientación del modelo respecto a la dirección del flujo

3.5 Ensayo para la obtención de coeficientes de presión C_p sobre el monoblock

El coeficiente de presión es un número adimensional, que describe la presión relativa ejercida por un fluido en un punto de un cuerpo. Este coeficiente modifica la presión de diseño que se utiliza en el cálculo de las cargas de viento para estructuras.

Dado que para un cuerpo de geometría determinada el C_p es independiente del tamaño del mismo, los valores de C_p calculados en el modelo probado en el túnel de viento, pueden utilizarse para estimar la presión del viento en esos puntos en el prototipo a escala real.

3.5.1 Objetivo

El objetivo del ensayo fue calcular el C_p en varios puntos del monoblock y ver su variación de acuerdo al ángulo de ataque del fluido.

3.5.2 Metodología

Se le hacen 26 agujeros en los que se conectan mangueras, generando de esta manera tomas estáticas de presión. Estas están ubicadas de forma regular, aumentando su densidad en los bordes. Las mangueras se conectan al medidor de presiones.

La ubicación de las tomas estáticas se decidió en base a lo establecido por el reglamento CIRSOC 102 – 2005 (Fig. 3.17, 3.18 y 3.19).

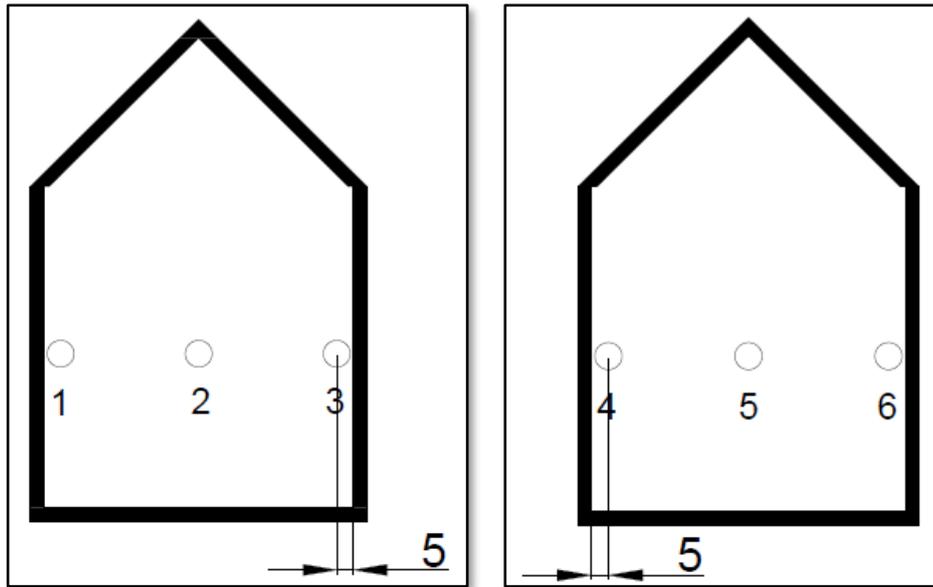


Figura 3.17: ubicación de las tomas estáticas en el lado corto (LC) (unidades en mm)

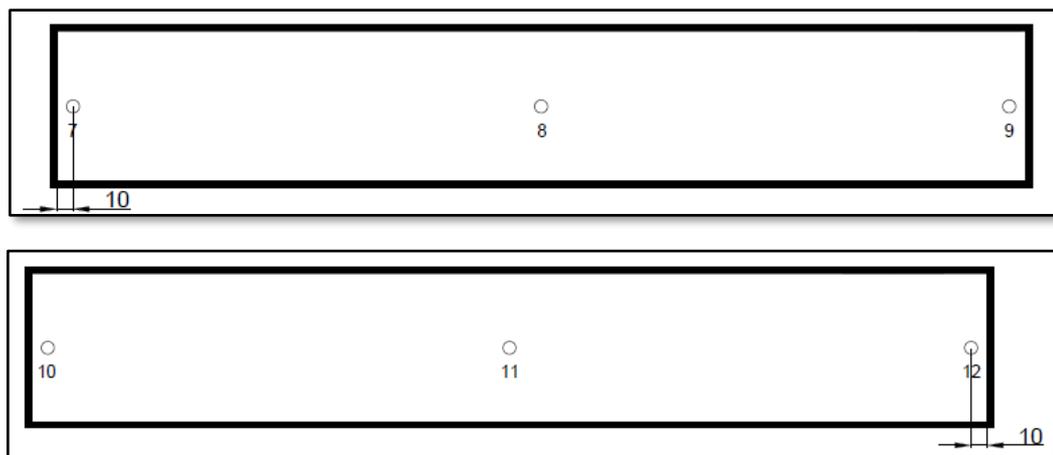


Figura 3.18: ubicación de las tomas estáticas en el lado largo (LL) (unidades en mm)

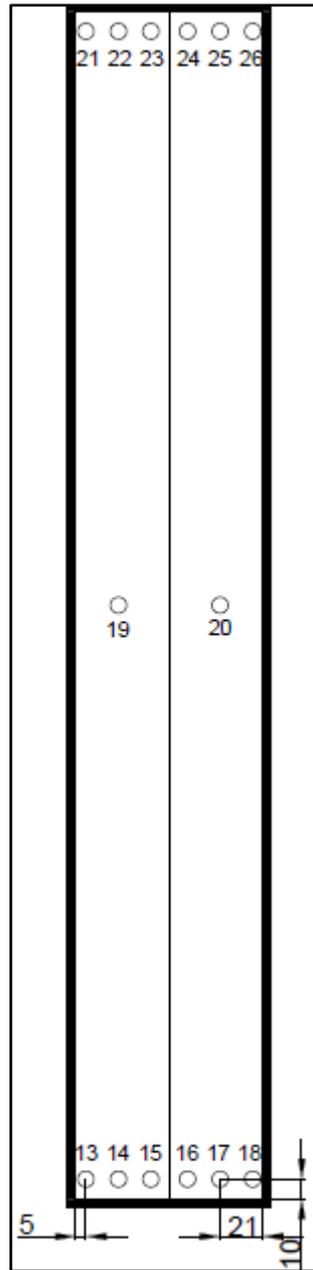


Figura 3.19: ubicación de las tomas estáticas en la cubierta (unidades en mm)

Con las presiones obtenidas se calculó el C_p en cada punto de medición, de acuerdo a la fórmula:

$$C_p = \frac{P_i - P_0}{\frac{1}{2} * \rho * V^2}$$

donde,

P_i (presión que se mide con una toma estática sobre el cuerpo en estudio)

P_0 (presión atmosférica) = 98120 Pa

ρ (densidad del aire) = $1.18 \frac{kg}{m^3}$

V (velocidad del viento lejos del objeto, es decir sin perturbar) = $\frac{m}{s}$

3.6 Bloqueo en el Túnel de Viento

Al momento de analizar los resultados, se evidenció que los valores obtenidos de C_p eran muy elevando. Estudiando el porqué de estos valores, se arribó a la conclusión de que se estaba ante un caso de *bloqueo*.

Si el área frontal (A_m) de un modelo a ensayar en un túnel de viento, es de una proporción grande frente al área de la sección de prueba (A_t), se produce un aumento de la velocidad del viento en el entorno del modelo, traduciéndose en un aumentos de la presión sobre el cuerpo. Este efecto se denomina *bloqueo*, y debe ser corregido.

Se define como *relación de bloqueo* B_R a:

$$B_R = \frac{A_m}{A_t}$$

Y generalmente se la expresa en porcentaje (%).

El bloqueo tiene una componente debida a la presencia del cuerpo (bloqueo sólido) y otra a la presencia de la estela (bloqueo de estela).

3.6.1 Bloqueo sólido

La presencia de un modelo en la sección de prueba reduce el área de flujo y, por lo tanto, aumenta la velocidad del aire a través de la sección de prueba. El bloqueo sólido provoca un aumento de la presión dinámica, que a su vez aumenta todas las fuerzas y momentos.

3.6.2 Bloqueo de estela

Cualquier modelo reducido probado en un túnel de viento siempre tendrá una estela detrás de él que se debe básicamente al desprendimiento de la capa límite del modelo. Esta estela tiene una velocidad media más baja que la de la condición de campo lejano, lo que quizás mantiene constante el caudal másico desde la entrada hasta la salida de la sección de prueba. Esto da como resultado una presión de estela más baja. Este efecto aumenta con el tamaño de la estela, por lo que es más alto cuando se produce una gran separación del flujo. El bloqueo de estela también crea un aumento de la presión dinámica en el modelo.

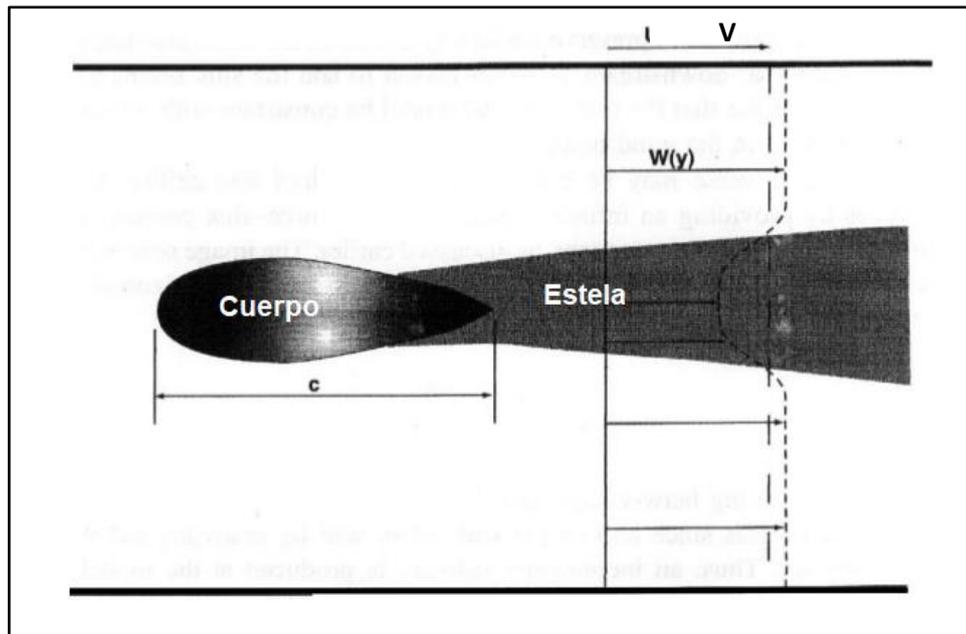


Figura 3.20: esquema del efecto de bloqueo por estela

La Fig. 3.20 muestra esquemáticamente el efecto del bloqueo por estela, donde V es la velocidad de referencia del túnel antes de llegar al objeto, y $W(y)$ es la velocidad que se desarrolla detrás del objeto debido a la estela, donde se aprecia un aumento de velocidad.

3.6.3 Método convencional de corrección

El bloqueo es la suma del bloqueo sólido y el bloqueo por estela. De este modo; el factor de corrección total se puede escribir de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon_{sb} + \varepsilon_{wb}$$

Donde, ε_{sb} es el bloqueo sólido y ε_{wb} es el bloqueo de estela

3.6.4 Bloqueo en Túnel de Viento de Capa Límite Atmosférica

Las Normas sobre la acción del viento cuando hay que realizar ensayos en túneles de viento, solo indican el porcentaje de bloqueo en la sección de prueba (B_T) que se debe cumplir, por ejemplo 8%.

Estudios de bloqueo en este tipo de túnel de viento son escasos. El trabajo de Jian Huang (2021) muestra cómo varían los C_p en el entorno de un edificio. En el frente del mismo no hay variaciones de C_p debido al bloqueo (Fig. 3.21). En lo que respecta a los laterales y la parte trasera, para un mismo punto, la diferencia de C_p entre un bloqueo del 4,10% y uno del 10,10% es de entre 0,30 y 0,40; por lo que se toma un promedio de 0,35. Este valor se utiliza para corregir los ensayos que presentan un bloqueo mayor al 4% (30°, 45°, 60° y 90°).

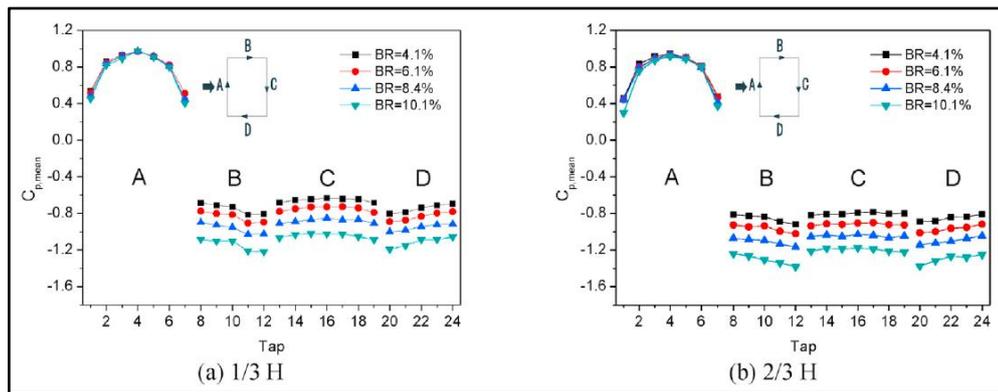


Figura 3.21: variación del C_p en un túnel de viento de CLA en el entorno de un edificio de forma de paralelepípedo, (a) a $1/3$ de altura desde el suelo, (b) a $2/3$ desde el suelo.

3.7 Corrección para estabilización del C_p

Realizada la corrección por bloqueo a los ensayos de 4,80 m/s, se observó que los resultados seguían distando de los expresados en el reglamento. Se profundizó más en el porqué de esta diferencia y se halló que Roberson (2002) propone que puede lograrse una estabilización del coeficiente de presión aumentando el número de Reynolds (Fig. 3.22).

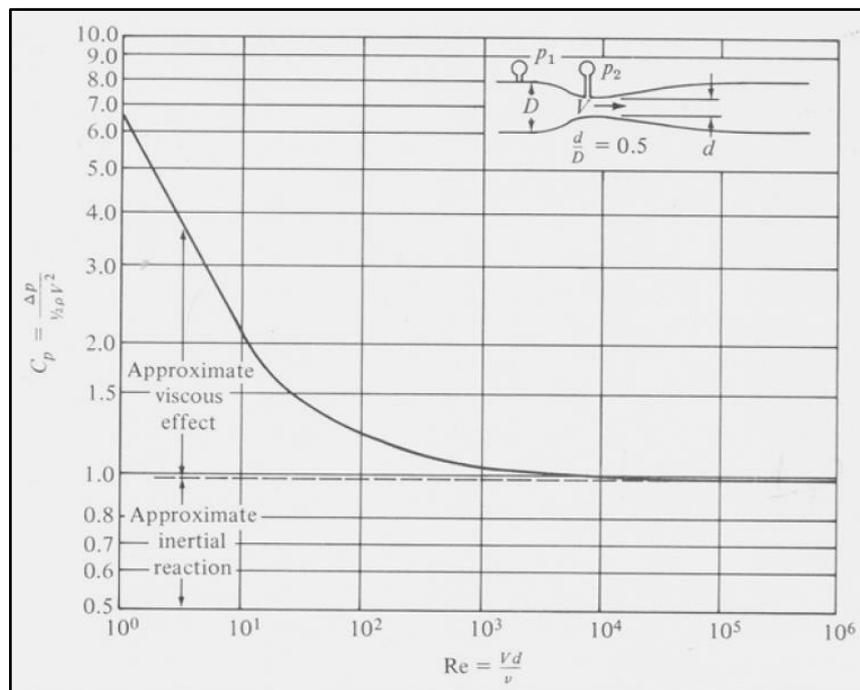


Figura 3.22: estabilización del C_p con el aumento del Reynolds. Roberson (2002)

Siguiendo este principio, luego de haber realizado el ensayo a 4,80 m/s, se repitió a una velocidad de 8,60 m/s, donde el R_e tiende a estabilizarse.

3.8 Resultados

El equipo registra datos de presión con una frecuencia de 10 Hz (10 mediciones por segundo). Para cada posición ensayada, se midió durante 10 segundos en cada toma. De esta manera para cada toma se obtuvieron 16.000 datos que fueron promediados. Para comparar estos valores con los que establece el reglamento CIRSOC 102 (2005) las tomas se agruparon en áreas de presión (Fig. 3.23).

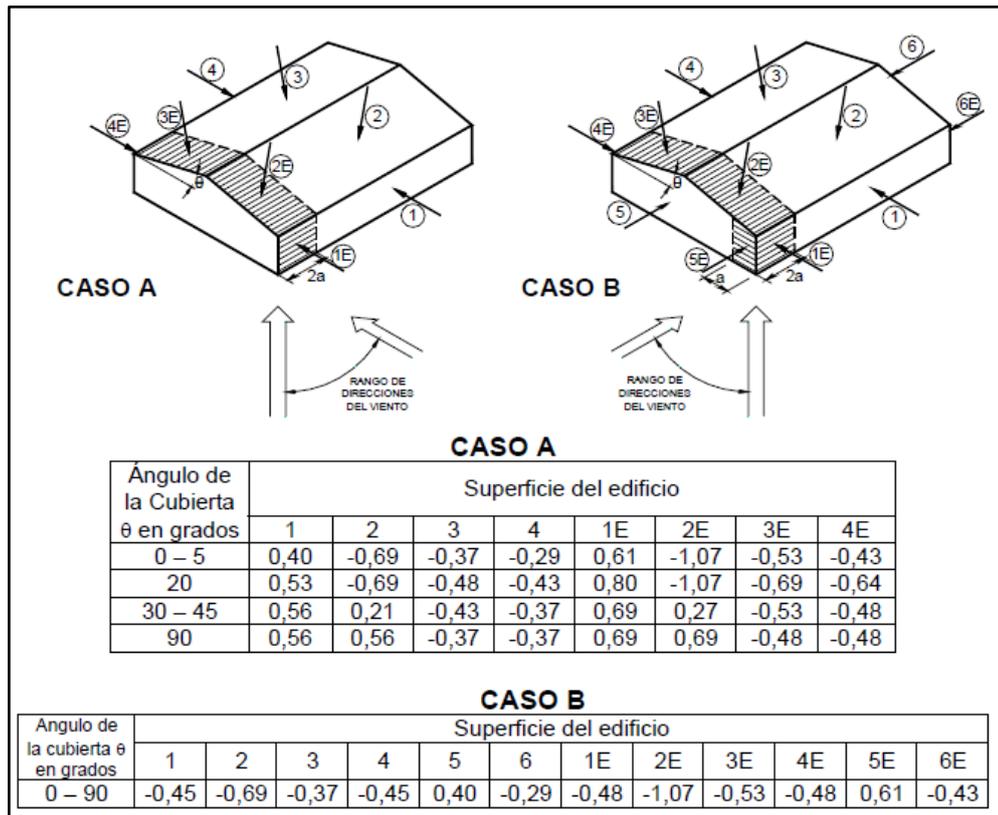


Figura 3.23: figura 4 del reglamento, donde define las áreas a las que hacen referencia los coeficientes de presión

A continuación se presentan las Tablas 3.1 a 3.5, donde se muestran los C_p obtenidos para una velocidad de 4,80 m/s, la misma velocidad aplicando la corrección por bloqueo y los C_p obtenidos para una velocidad de 8,60 m/s.

Denominación zona	N° de toma estática	C_p 90°		
		C_p 4,80 m/s	C_p 4,80 m/s + bloqueo	C_p 8,60 m/s + bloqueo
1	11	0,96	0,96	0,42
2	20	-0,15	0,20	0,05
3	19	-1,77	-1,42	-1,08
4	8	-1,62	-1,27	-1,06
5	5	-	-	-
6	2	-	-	-
1E	10	0,07	0,07	-0,02
2E	17	-0,44	-0,09	-0,31
3E	14	-1,62	-1,27	-1,25
4E	7	-1,62	-1,27	-1,15
5E	4	-	-	-
6E	3	-	-	-

Tabla 3.1: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p para el ángulo de ataque de 90°

Denominación zona	N° de toma estática	C_p 60°		
		C_p 4,80 m/s	C_p 4,80 m/s + bloqueo	C_p 8,60 m/s + bloqueo
1	11	0,07	0,07	0,34
2	20	-0,96	-0,61	0,05
3	19	-2,57	-2,22	-1,12
4	8	-2,28	-1,93	-1,12
5	5	-	-	-
6	2	-	-	-
1E	10	0,44	0,44	-0,44
2E	17	1,03	1,38	0,62
3E	14	-2,06	-1,71	-1,00
4E	7	-2,35	-2,00	-1,14
5E	4	-	-	-
6E	3	-	-	-

Tabla 3.2: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p para el ángulo de ataque de 60°

Denominación zona	N° de toma estática	C_p 45°		
		C_p 4,80 m/s	C_p 4,80 m/s + bloqueo	C_p 8,60 m/s + bloqueo
1	11	0,22	0,22	0,40
2	20	-0,59	-0,24	0,10
3	19	-2,13	-1,78	-1,26
4	8	-1,62	-1,27	-0,77
5	5	-	-	-
6	2	-	-	-
1E	10	-0,37	-0,37	-0,13
2E	17	0,37	0,72	0,60
3E	14	-2,06	-1,71	-1,40
4E	7	-2,28	-1,93	-1,42
5E	4	-	-	-
6E	3	-	-	-

Tabla 3.3: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p para el ángulo de ataque de 45°

Denominación zona	N° de toma estática	C_p 30°		
		C_p 4,80 m/s	C_p 4,80 m/s + bloqueo	C_p 8,60 m/s + bloqueo
1	11	0,07	0,07	0,11
2	20	-0,59	-0,24	0,08
3	19	-1,62	-1,27	-0,91
4	8	-0,81	-0,46	-0,27
5	5	0,96	0,96	0,73
6	2	-0,81	-0,46	-0,15
1E	10	-0,59	-0,59	-0,23
2E	17	-1,03	-0,68	-0,70
3E	14	-1,84	-1,49	-1,05
4E	7	-1,54	-1,19	-0,91
5E	4	1,18	-1,99	1,01
6E	3	-0,81	-0,46	-0,29

Tabla 3.4: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p para el ángulo de ataque de 30°

Denominación zona	N° de toma estática	C_p 0°	
		C_p 4,80 m/s	C_p 8,60 m/s
1	11	-0,44	-0,30
2	20	-0,22	-0,25
3	19	-0,37	-0,25
4	8	-0,37	-0,27
5	5	1,18	0,89
6	2	-0,66	-0,32
1E	10	-0,81	-0,37
2E	17	-1,03	-1,10
3E	14	-1,32	-1,10
4E	7	-1,40	-0,96
5E	4	0,44	0,41
6E	3	-0,96	-0,53

Tabla 3.5: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p para el ángulo de ataque de 0°

Para este caso particular, no se aplicó corrección por bloqueo ya que la relación de áreas entre el modelo y el túnel es del 3%.

Como se mencionó con anterioridad, los valores de presión obtenidos por el equipo se transforman en el coeficiente de presión C_p mediante la fórmula siguiente

$$C_p = \frac{P_i - P_0}{\frac{1}{2} * \rho * V_0^2}$$

Promediando los valores anteriores, se obtiene la Tabla 3.6. Además, en la Fig. 3.24 se presenta un esquema de distribución de coeficientes de presión.

Denominación zona	N° de toma estática	C_p prom. 4, 80 m/s	C_p prom. 4, 80 $\frac{m}{s}$ + bloqueo	C_p prom. 8, 60 $\frac{m}{s}$ + bloqueo
1	11	0,18	0,25	0,20
2	20	-0,50	-0,15	0,01
3	19	-1,69	-1,34	-0,92
4	8	-1,34	-0,99	-0,70
5	5	0,00	0,07	-0,03
6	2	-1,18	-0,83	-0,61
1E	10	-0,25	-0,18	-0,24
2E	17	-0,22	0,13	-0,18
3E	14	-1,78	-1,43	-1,16
4E	7	-1,84	-1,49	-1,12
5E	4	-0,49	-0,42	-0,07
6E	3	-1,38	-1,03	-0,69

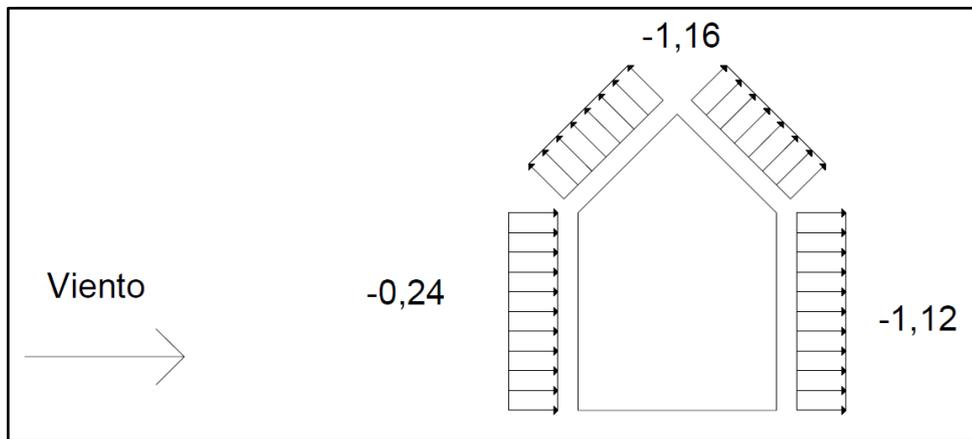
Tabla 3.6: ubicación de las tomas estáticas y su respectivo C_p promedio

Figura 3.24: distribución de coeficientes de presión según promedio túnel de viento físico

3.9 Análisis de resultados

Además de haberse realizado la comparación con los valores propuestos por el reglamento, se buscó tener un segundo punto de comparación y poder ver qué tan certeros o alejados se encontraban los resultados obtenidos. En caso de que ocurriese el segundo caso, modificar algunas de las condiciones y repetir los ensayos, con el fin de que sean más cercanos a lo propuesto.

Ginger & Holmes (2003) registraron valores de C_p para un edificio con relación de aspecto (R.A.) coincidente con la estudiada en este trabajo, pero con un ángulo de cubierta de 35° en lugar de 45°.

$$R.A. = \frac{\text{Largo modelo}}{\text{Ancho modelo}} = \frac{0,60 \text{ mts}}{0,10 \text{ mts}} = 6$$

En la tabla 3.7 se presenta una comparación entre los valores obtenidos por Ginger y Holmes (2003) y las mediciones realizadas en este proyecto. En las Fig 3.25, 3.26 y 3.27 se presentan nuevamente la ubicación de las tomas estáticas con el fin de recordarlas.

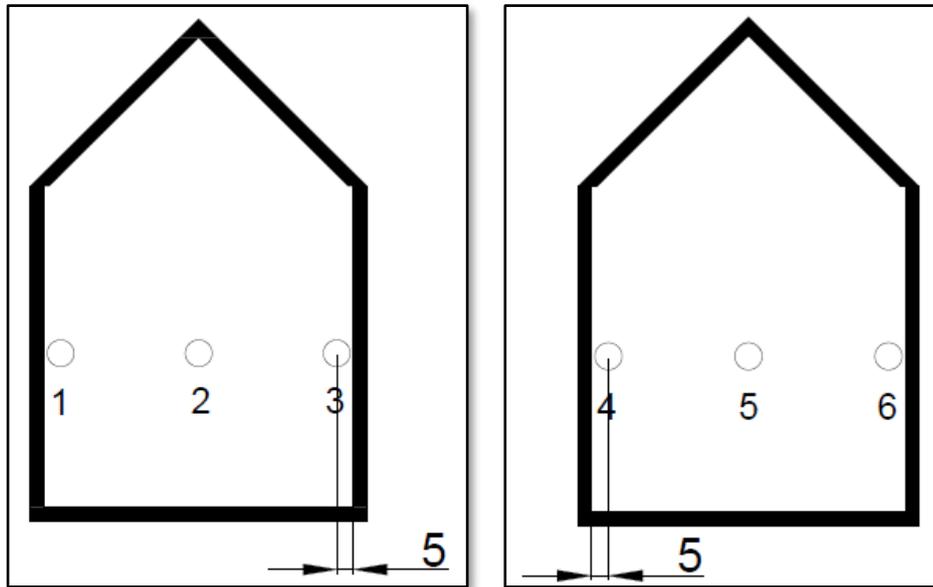


Figura 3.25: ubicación de las tomas estáticas en el lado corto (LC) (unidades en mm)

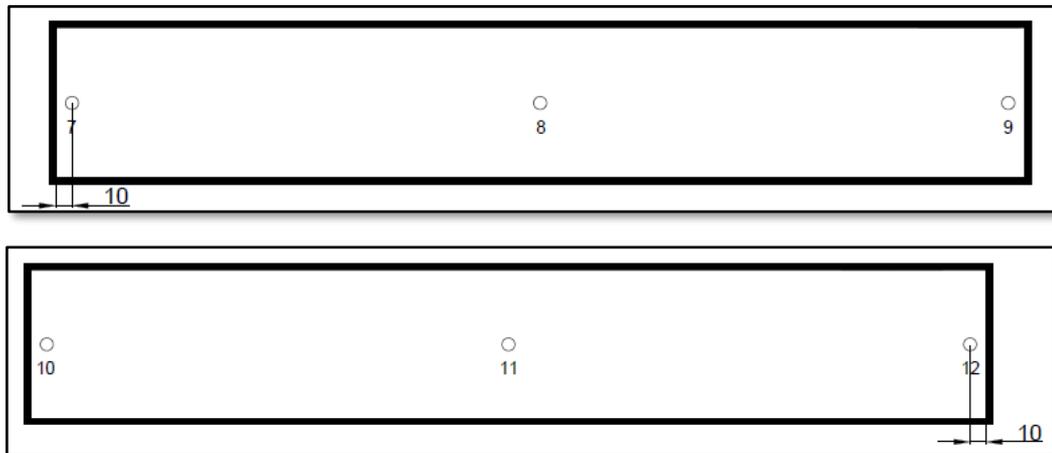


Figura 3.26: ubicación de las tomas estáticas en el lado largo (LL) (unidades en mm)

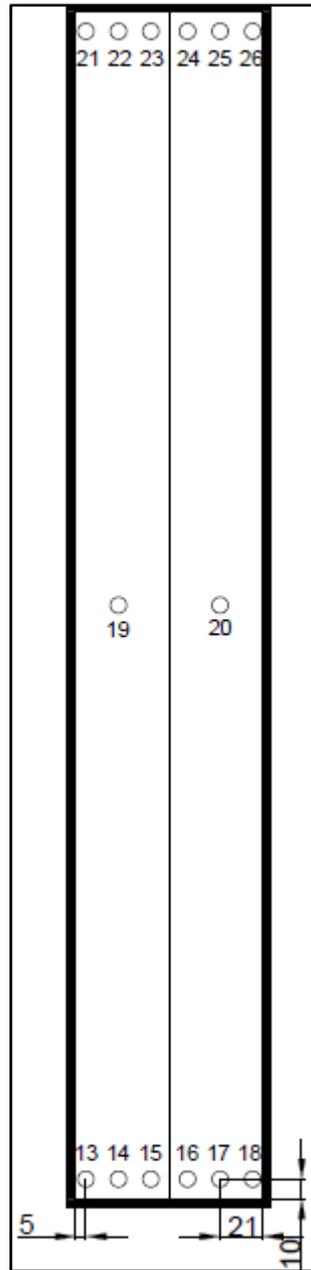


Figura 3.27: ubicación de las tomas estáticas en la cubierta (unidades en mm)

N° de toma estática	Dirección del flujo					
	90°		45°		0°	
	<i>G. & H.</i>	<i>C_p medido</i>	<i>G. & H.</i>	<i>C_p medido</i>	<i>G. & H.</i>	<i>C_p medido</i>
12	0,10	0,12	0,40	1,12	-0,52	-1,10
18	-0,01	-0,17	0,30	0,69	-0,75	-1,15
17	-0,02	-0,31	0,10	0,60	-0,79	-1,10
16	-0,10	-0,56	-0,20	-0,21	-0,80	-1,24
15	-0,75	-1,20	-1,49	-1,49	-0,80	-1,40
14	-0,78	-1,25	-1,48	-1,40	-0,79	-1,10
13	-0,80	-1,22	-1,42	-1,46	-0,75	-1,15
7	-0,72	-1,15	-1,00	-1,42	-0,54	-0,96
20	0,08	0,05	-0,20	0,10	0,15	-0,25
19	-0,72	-1,08	-1,00	-1,26	0,15	-0,25

Tabla 3.7: comparación entre *C_p medido* y el establecido por *G. & H.* en el año 2003 para distintas direcciones de flujo

Se observa que para la dirección de flujo a 90° , las mediciones en las tomas estáticas 12, 18 y 20 se acercan bastante a lo esperado. Por el contrario, en las posiciones 16, 15, 14, 13 y 19 se encuentra una diferencia del 50%. En el medio de estos valores, se encuentra las tomas 18, 17 y 7 que tienen una diferencia de alrededor del 25%.

Para 45° , las tomas estáticas 16, 15, 14, 13, 20 y 19 tienen un C_p similar a lo esperado. Lo que no ocurre con las tomas 12, 18, 17 y 7.

Por último, para el ángulo 0° , los valores similares son los pertenecientes a las tomas estáticas 17, 14, 20 y 19. Contrario a esto es lo que ocurre en las tomas 12, 18, 16, 15, 13 y 7.

Esta diferencia entre los valores experimentales y los obtenidos por Ginger & Holmes en los ensayos son otorgados principalmente a que la investigación enseña los resultados para un ángulo de cubierta de 35° . Si bien son solo 10° los grados de diferencia entre este y el ensayado, hay una gran variación entre los efectos generados por una cubierta y la otra.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN SEGÚN EL CIRSOC 102

4.1 Procedimiento

El diseño de los efectos de las cargas de viento sobre las edificaciones suele ser calculado a través de presiones estáticas equivalentes derivadas de coeficientes de presión provistos por el reglamento CIRSOC 102 – 2015.

La Norma plantea varios pasos a seguir para obtener las cargas de viento sobre un determinado edificio. Se procederá a mencionarlos y describirlos para el caso en estudio, para luego obtener las cargas.

- I. Se determina la velocidad básica del viento V y el factor de direccionalidad K_d de acuerdo con el artículo 5.4 del mencionado reglamento.

Como se mencionó con anterioridad,

$$V = 46 \frac{m}{s}$$

Por otro lado, la tabla 4.1 permite obtener el factor de direccionalidad K_d

Tipo de estructura	Factor de direccionalidad K_d *
Edificios	
Sistema principal resistente a la fuerza de viento	0,85
Componentes y revestimientos	0,85
Cubiertas abovedadas	0,85
Chimeneas, tanques y estructuras similares	
Cuadradas	0,90
Hexagonales	0,95
Redondas	0,95
Carteles llenos	0,85
Carteles abiertos y estructura reticulada	0,85
Torres reticuladas	
Triangular, cuadrada, rectangular	0,85
Toda otra sección transversal	0,95

Tabla 4.1: tabla 6 de la norma CIRSOC, factor de direccionalidad del viento

$K_d = 0.85$ ya que pertenece a la primera categoría.

II. Se determina un factor de importancia *I* de acuerdo con el artículo 5.2 (Tabla 4.2).

Categoría	<i>I</i>
I	0,87
II	1,00
III	1,15
IV	1,15

Tabla 4.2: tabla 1 del reglamento, donde según la categoría corresponderá un factor de importancia

Naturaleza de la Ocupación	Categoría
Edificios y otras estructuras que representan un bajo riesgo para la vida humana en caso de falla incluyendo, pero no limitado a: <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones Agrícolas. • Ciertas Instalaciones temporarias. • Instalaciones menores para almacenamiento. 	I
Edificios y otras estructuras que representan un peligro substancial para la vida humana en caso de falla incluyendo, pero no limitado a: <ul style="list-style-type: none"> • Edificios y otras estructuras donde se reúnen más de 300 personas en un área. • Edificios y otras estructuras para guarderías, escuelas primarias y secundarias con capacidad mayor que 150 personas. • Edificios y otras estructuras con instalaciones para el cuidado diurno con capacidad mayor que 150 personas. • Edificios y otras estructuras con una capacidad mayor que 500 personas para universidades o instalaciones para educación de adultos. • Instalaciones para el cuidado de la salud con una capacidad de 50 o más pacientes residentes pero sin instalaciones para cirugía o tratamientos de emergencia. • Instalaciones para cárceles y detenciones. • Estaciones de generación de energía y otras instalaciones de utilidad pública no incluidas en la Categoría IV. 	II
Edificios y otras estructuras que contienen suficientes cantidades de sustancias tóxicas o explosivas como para ser peligrosas al público si se liberan, incluyendo, pero no limitado, a: <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones petroquímicas. • Instalaciones para almacenamiento de combustibles. • Plantas de fabricación o almacenamiento de productos químicos peligrosos. • Plantas de fabricación o almacenamiento de explosivos. Edificios y otras estructuras equipados con contención secundaria de sustancias tóxicas, explosivas u otras peligrosas (incluyendo, pero no limitado a, tanques de doble pared, receptáculos de tamaño suficiente para contener un derrame u otros medios de contención de derrames o explosiones dentro de los límites de la instalación y prevenir la liberación de cantidades de contaminantes nocivos para el aire, el suelo, el agua freática o superficial) deben clasificarse como estructuras de Categoría II.	III
Edificios y otras estructuras diseñadas como instalaciones esenciales, incluyendo, pero no limitados a: <ul style="list-style-type: none"> • Hospitales y otras instalaciones para el cuidado de la salud que tienen instalaciones para cirugía o tratamientos de emergencia. • Cuarteles de bomberos, centros de rescate, estaciones de policía y garajes para vehículos de emergencia. • Refugios diseñados contra sismos, huracanes y otras emergencias. • Centros de comunicaciones y otras instalaciones necesarias para respuestas a emergencias. • Estaciones generadoras de energía y otras instalaciones de utilidad pública necesarias en una emergencia. • Estructuras auxiliares necesarias para la operación de aquellas de Categoría IV durante una emergencia (incluyendo pero no limitado a torres de comunicación, tanques de almacenamiento de combustible, torres de refrigeración, estructuras de sub-estaciones de electricidad, tanques de agua para incendio u otras estructuras de alojamiento o soporte de agua, otros materiales o equipamiento para combatir el fuego). • Torres de control de aviación, centros de control de tráfico aéreo y hangares de emergencia. • Instalaciones de almacenamiento de agua y estructuras de bombeo requeridas para mantener la presión de agua para combatir incendios. • Edificios y otras estructuras con funciones críticas de defensa nacional. 	IV

Tabla 4.3: tabla A-1 del reglamento, clasificación de edificios y otras estructuras

El tipo de edificio con el que se trabajó se consideró de **Categoría III**. Esto es debido a que al ser un monoblock de 60,00 x 10,00 m, tiene la capacidad de albergar gran cantidad de personas (Tabla 4.3).

Por ende,

$$I = 1,15$$

- III. Con la ayuda de la Fig. 4.1, Tabla 4.4, Fig 4.2 y Tabla 4.5, se determinan para cada dirección de viento una categoría o categorías de exposición y los coeficientes de exposición para presión dinámica K_z o K_{zh} según corresponda.

1. **Exposición A.** Centro de grandes ciudades con al menos **50%** de los edificios de altura mayor que **20 m**. El uso de esta categoría de exposición está limitado a aquellas áreas para las cuales el terreno representativo de la Exposición **A** prevalece en la dirección de barlovento en una distancia de al menos **800 m** ó **10** veces la altura del edificio u otra estructura, la que sea mayor. Se tendrán en cuenta los posibles efectos de acanalamiento o presiones dinámicas incrementadas debido a que el edificio o estructura se localiza en la estela de edificios adyacentes.
2. **Exposición B.** Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas, o terrenos con numerosas obstrucciones próximas entre sí, del tamaño de viviendas unifamiliares o mayores. El uso de esta categoría de exposición esta limitado a aquellas áreas para las cuales el terreno representativo de la Exposición **B** prevalece en la dirección de barlovento en una distancia de al menos **500 m** ó **10** veces la altura del edificio u otra estructura, la que sea mayor.
3. **Exposición C.** Terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que **10 m**. Esta categoría incluye campo abierto plano y terrenos agrícolas.
4. **Exposición D.** Areas costeras planas, sin obstrucciones, expuestas al viento soplando desde aguas abiertas en una distancia de al menos **1600 m**. Esta exposición se debe aplicar solamente a aquellos edificios y otras estructuras expuestas al viento soplando desde el agua. La exposición **D** se extiende tierra

Figura 4.1: información con las distintas categorías de exposición

Para este caso particular, se consideró

Exposición C

Altura sobre el nivel del terreno, z (m)	Exposición (Nota 1)					
	A		B		C	D
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Casos 1 y 2	Casos 1 y 2
0 – 5	0,68	0,33	0,72	0,59	0,87	1,05
6	0,68	0,36	0,72	0,62	0,90	1,08
7,50	0,68	0,39	0,72	0,66	0,94	1,12
10	0,68	0,44	0,72	0,72	1,00	1,18
12,50	0,68	0,48	0,77	0,77	1,05	1,23

Tabla 4.4: tabla 5 de la norma, donde enseña los coeficientes para presión dinámica

Notas:

- Caso 1:**
 - Todos los componentes y revestimientos.
 - Sistema principal resistente a la fuerza del viento en edificios de baja altura diseñados usando la Figura 4.
- Caso 2:**
 - Todos los sistemas principales resistentes a la fuerza de viento con excepción de aquellos en edificios de baja altura diseñados usando la Figura 4.
 - Todos los sistemas principales resistentes a la fuerza de viento en otras estructuras.

2. El coeficiente de exposición para la presión dinámica se puede determinar mediante la siguiente expresión:

Para $5 \text{ m} \leq z \leq z_g$: Para $z < 5 \text{ m}$:

$$K_z = 2,01 \left(z / z_g \right)^{2/\alpha} \qquad K_z = 2,01 \left(5 / z_g \right)^{2/\alpha}$$

Observación: No se debe tomar z menor que 30 m para el Caso 1 en exposición A, ni menos que 10 m para el caso 1 en exposición B.

- α y z_g se obtienen de la Tabla 4.
- Se permite la interpolación lineal para valores intermedios de la altura z.
Las categorías de exposición están definidas en el artículo 5.6.

Figura 4.2: información adicional contenida en la tabla 5 del reglamento

Exposición	α	z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ (m)	$\bar{\varepsilon}$	z_{min} (m)
A	5,0	457	1/5	0,64	1/3,0	0,30	0,45	55	1/2,0	18,3
B	7,0	366	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	98	1/3,0	9,2
C	9,5	274	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152	1/5,0	4,6
D	11,5	213	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198	1/8,0	2,1

Tabla 4.5: tabla 4 de la norma, constantes de exposición del terreno

Para este caso particular,

α	z_g
9,50	274

Por lo que utilizando

$$K_z = 2,01 * \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

Altura [m]	K_z
3	0,78
6	0,90
10	1,00
15	1,09

IV. Se determina un factor topográfico K_{zt} de acuerdo con el artículo 5.7.

Al ser un terreno llano,

$$K_{zt} = 1$$

V. Se determina un factor de efecto ráfaga G o G_f , según corresponda, de acuerdo con el artículo 5.8.

Para determinar el factor de efecto ráfaga, antes se debe hallar la frecuencia natural de la estructura para poder encuadrarla en rígida o flexible. Para estar dentro del primer caso, la F.N. debe ser mayor o igual a 1 Hz, de lo contrario será considerada flexible.

La frecuencia natural del edificio puede calcularse a partir del período de oscilación T del mismo, calculado mediante la fórmula aproximada de la norma colombiana NSR-10, en función del número de pisos (n):

$$T = 0,10 * n \text{ s} = 0,10 * 4 \text{ s} = 0,40 \text{ s}$$

Podemos estimar que nuestro prototipo puede tener unos 3 pisos. Aplicando la fórmula anterior, da como periodo 0,40 s lo que representa una frecuencia natural de 2,50 Hz. Como esta frecuencia es mayor a 1.00 Hz (2.50 Hz), podemos decir que:

$$G = 0,85$$

VI. Se determina una clasificación de cerramiento (Fig. 4.3).

Edificio abierto: Un edificio que tiene cada pared abierta al menos en un 80%. Esta condición se expresa para cada pared mediante la expresión $A_o \geq 0,8 A_p$, donde:

- A_o el área total de aberturas en una pared que recibe presión externa positiva en m^2 .
- A_p el área total de aquella pared con la cual A_o está asociada, en m^2 .

Edificio cerrado: Un edificio que no cumple con las condiciones establecidas para edificios abiertos o parcialmente cerrados.

Edificio parcialmente cerrado: Un edificio que cumple con las dos condiciones siguientes:

1. el área total de aberturas en una pared que recibe presión externa positiva excede la suma de las áreas de aberturas en el resto de la envolvente del edificio (paredes y cubierta) en más del 10%. Y además:
2. el área total de aberturas en una pared que recibe presión externa positiva excede el valor menor entre $0,4 \text{ m}^2$ ó el 1% del área de dicha pared, y el porcentaje de aberturas en el resto de la envolvente del edificio no excede el 20%.

Estas condiciones están expresadas por las siguientes expresiones:

1. $A_o > 1,10A_{oi}$
2. $A_o > 0,4 \text{ m}^2$ ó $> 0,01A_p$, el que sea menor, y $A_{oi}/A_{pi} \leq 0,20$,

siendo:

- A_o el área total de aberturas en una pared que recibe presión externa positiva, en m^2 .
- A_p el área total de aquella pared con la cual A_o está asociada, en m^2 .
- A_{oi} la suma de las áreas de aberturas en la envolvente del edificio (paredes y cubiertas) no incluyendo A_o , en m^2 .
- A_{pi} la suma de las áreas totales de superficie de la envolvente del edificio (paredes y cubierta) no incluyendo A_p , en m^2 .

Figura 4.3: clasificación cerramiento

Se considera que es un edificio cerrado.

VII. Con el aporte de la Tabla 4.6 se determinan los coeficientes de presión externa C_p o GC_{pf} , o los coeficientes de fuerza C_f , según corresponda:

Clasificación de cerramiento	GC_{pi}
Edificios abiertos	0,00
Edificios parcialmente cerrados	+ 0,55 - 0,55
Edificios cerrados	+ 0,18 - 0,18

Tabla 4.6: tabla 7 del reglamento, coeficientes de presión interna para edificios

Para este caso particular,

$$GC_{pf} = \pm 0,18$$

En cuanto a los C_p , se puede apreciar en las Tablas 4.7 y 4.8, que el Reglamento hace distinción entre los coeficientes de presión en paredes y en cubiertas

Coeficientes de presión en paredes, C_p			
Superficie	L/B	C_p	Usar con
Pared a barlovento	Todos los valores	0,8	q_z
Pared a sotavento	0 – 1	-0,5	q_h
	2	-0,3	
	≥ 4	-0,2	
Paredes laterales	Todos los valores	- 0,7	q_h

Tabla 4.7: figura 3 del reglamento, coeficientes de presión en paredes

Coeficientes de presión para cubiertas, C_p , para usar con q_h												
Dirección del viento	Barlovento									Sotavento		
		Ángulo θ en grados									Ángulo θ en grados	
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	$\geq 60^\#$	10	15	≥ 20
Normal a la cumbrera para $\theta \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,7	-0,5 0,0*	-0,3 0,2	-0,2 0,3	-0,2 0,3	0,0* 0,4	0,4	0,01 θ	-0,3	-0,5	-0,6
	0,5	-0,9	-0,7	-0,4 0,0*	-0,3 0,2	-0,2 0,2	-0,2 0,3	0,0* 0,4	0,01 θ	-0,5	-0,5	-0,6
	$\geq 1,0$	-1,3**	-1,0	-0,7 0,0*	-0,5 0,2	-0,3 0,2	-0,2 0,2	0,0* 0,3	0,01 θ	-0,7	-0,6	-0,6
Normal a la cumbrera para $\theta < 10^\circ$ y paralela a la cumbrera para todo θ	$\leq 0,5$	Distancia horizontal desde el borde a barlovento				C_p	* Se da el valor para fines de interpolación ** El valor puede reducirse linealmente con el área sobre la cual es aplicable como sigue:					
		0 a $h/2$				-0,9						
		$h/2$ a h				-0,9						
		h a $2h$				-0,5						
	$\geq 1,0$	0 a $h/2$				-1,3**	Área (m^2)		Factor de reducción			
		$> h/2$				-0,7	≤ 10		1,0			
					25		0,9					
						≥ 100		0,8				

Tabla 4.8: figura 3 del reglamento, coeficientes de presión para cubiertas

Para poder determinar estos coeficientes, antes debemos hallar

L [m]	B [m]	h [m]
60	10	12,50

Superficie	L/B	C_p
Pared a sotavento	6,00	-0,20
Pared a barlovento	-	0,80
Paredes laterales		-0,70

Superficie	h/L	θ	C_p
Cubierta	0,21	45°	0,60

En este caso como el edificio es poco ancho la presión sobre la cubierta es uniforme. En el caso que no fuera considerado poco ancho, el coeficiente de presión externa varía a lo largo de la cubierta y sus valores se obtienen del reglamento de acuerdo a la figura 4.4.

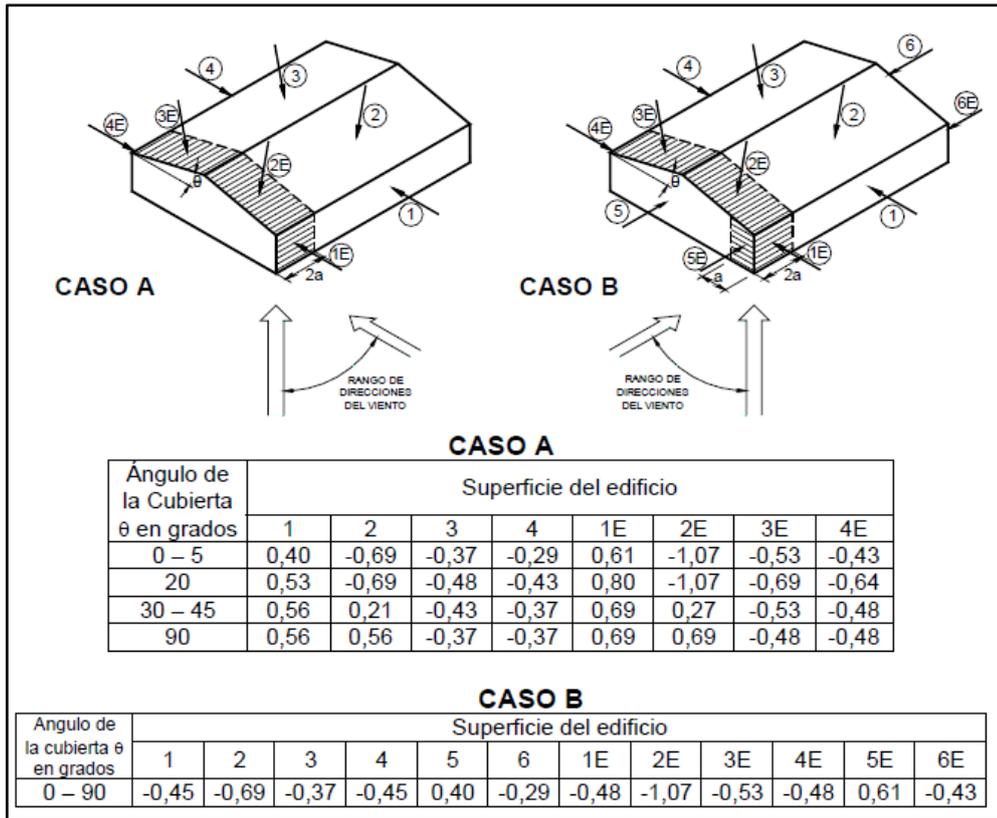


Figura 4.4: figura 4 del reglamento, coeficientes de presión externa para paredes y cubiertas a dos aguas

En la Fig. 4.5, se presenta el esquema de distribución de coeficientes de presión para este caso particular.

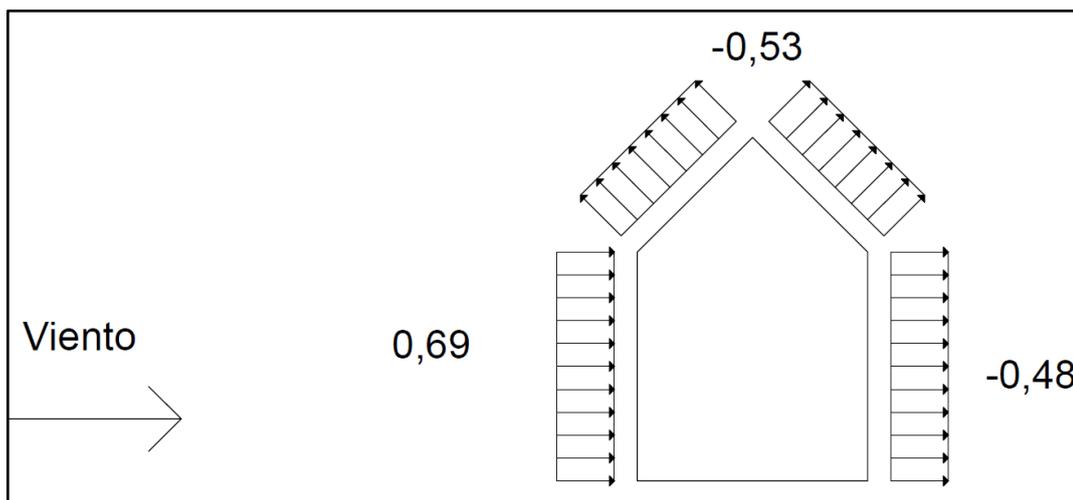


Figura 4.5: distribución de coeficientes de presión según reglamento

VIII. Se determina la presión dinámica q_z o q_h , según corresponda, con el artículo 5.10.

$$q_z = 0.613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 * I$$

<i>Altura [m]</i>	K_z	$q_z \left[\frac{N}{m^2} \right]$
3	0.78	1072.73
6	0.90	1241.27
10	1.00	1382.20
15	1.09	1505.37

IX. Se determina la carga de viento de diseño p o F de acuerdo con los artículos 5.12 y 5.13, según corresponda.

$$p = q * GC_p - q_i * (GC_{pi})$$

<i>Zona de análisis</i>	<i>Superficie</i>	$q_z \left[\frac{n}{m^2} \right]$	C_p externa	<i>Presión de diseño</i> $\left[\frac{n}{m^2} \right]$	
				(+GC _{pi})	(-GC _{pi})
0m – 6m	Pared a barlovento	1072.73	0.80	536.37	922.55
	Pared a sotavento	1072.73	-0.20	-375.46	10.73
	Pared lateral	1072.73	-0.70	-831.37	-445.18
	Cubierta	1072.73	-0.30	-466.64	-80.45
6m – 10m	Pared a barlovento	1311.74	0.80	655.87	1128.09
	Pared a sotavento	1311.74	-0.20	-459.11	13.12
	Pared lateral	1311.74	-0.70	-1016.59	-544.37
	Cubierta	1311.74	-0.30	-570.60	-98.38
10m – 15m	Pared a barlovento	1443.79	0.80	655.87	1128.09
	Pared a sotavento	1443.79	-0.20	-459.11	13.12
	Pared lateral	1443.79	-0.70	-1016.59	-544.37
	Cubierta	1443.79	-0.30	-570.60	-98.38

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS

A continuación, en las Figuras entre la 1 y la 5 y las Tablas 1 a 5, se presenta la diferencia de valores de C_p entre lo obtenido en el túnel de viento físico y lo obtenido a través del cálculo del reglamento CIRSOC 102 – 2015. En el eje de las ordenadas se encuentra el valor del C_p , mientras que en el de las abscisas la denominación de la zona donde se encuentra la toma.

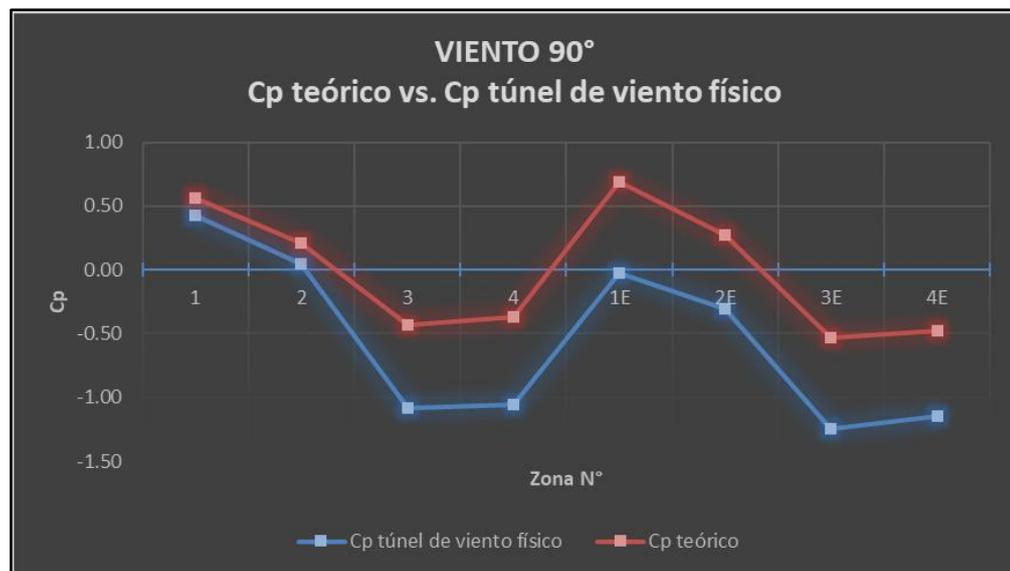


Figura 5.1: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para dirección del viento a 90°

VIENTO 90°		
Denominación zona	C_p teórico	C_p túnel de viento físico
1	0,56	0,42
2	0,21	0,05
3	-0,43	-1,08
4	-0,37	-1,06
1E	0,69	-0,02
2E	0,27	-0,31
3E	-0,53	-1,25
4E	-0,48	-1,15

Tabla 5.1: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento para dirección del viento a 90°

Como análisis general, podría decirse que el túnel de viento físico tiene la misma tendencia que los valores presentados por el reglamento. Sin embargo, hay diferencias en los

valores de los C_p . Se cree que parte de esta no coincidencia se debe al fenómeno del bloqueo, explicado con anterioridad.

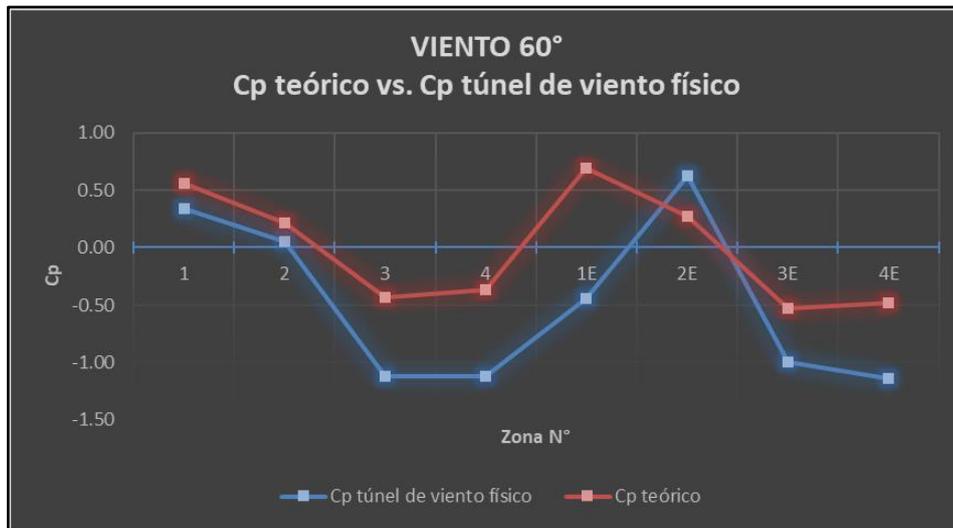


Figura 5.2: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para dirección del viento a 60°

VIENTO 60°		
Denominación zona	C_p teórico	C_p túnel de viento físico
1	0,56	0,34
2	0,21	0,05
3	-0,43	-1,12
4	-0,37	-1,12
1E	0,69	-0,44
2E	0,27	0,62
3E	-0,53	-1,00
4E	-0,48	-1,14

Tabla 5.2: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento para dirección del viento a 60°

Para este caso se aprecia que ocurre algo muy similar a lo explicado para el caso anterior, con la diferencia de que solo un valor no sigue la tendencia propuesta por el Reglamento.

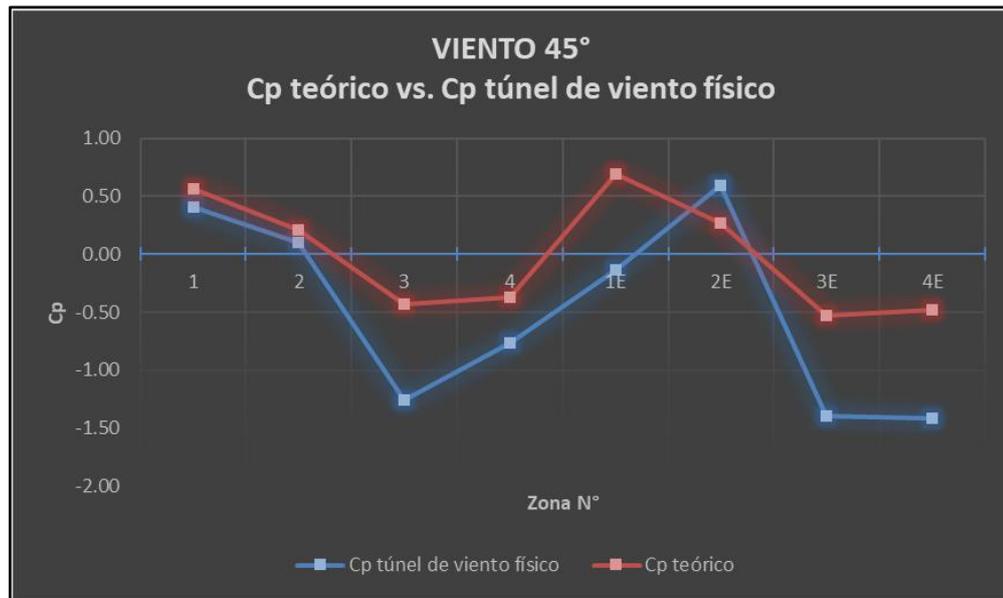


Figura 5.3: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para dirección del viento a 45°

VIENTO 45°		
Denominación zona	C_p teórico	C_p túnel de viento físico
1	0,56	0,40
2	0,21	0,10
3	-0,43	-1,26
4	-0,37	-0,77
1E	0,69	-0,13
2E	0,27	0,60
3E	-0,53	-1,40
4E	-0,48	-1,40

Tabla 5.3: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento para dirección del viento a 45°

En el caso de viento a 45°, ocurre exactamente lo mismo que para el caso anterior, viento a 60°.

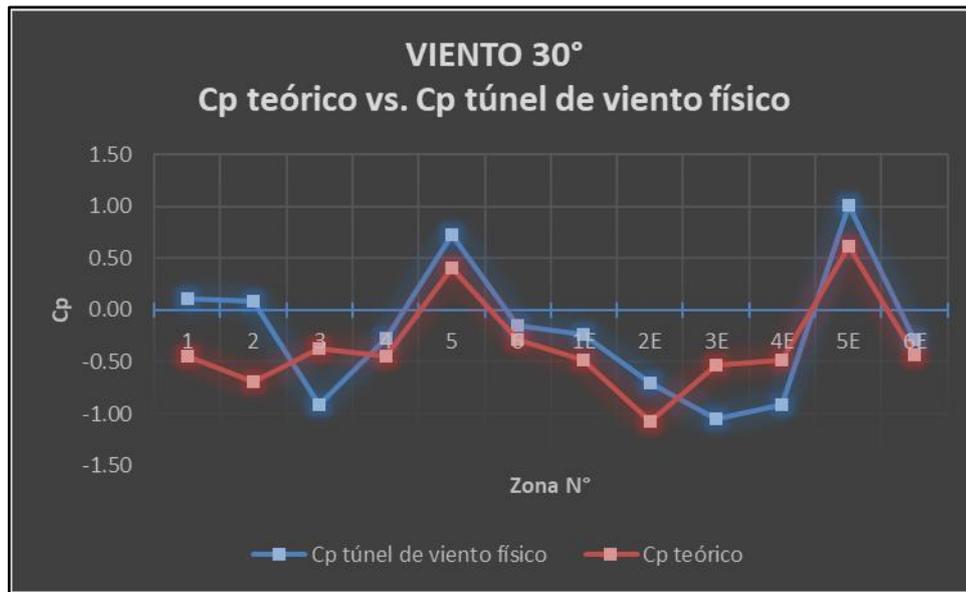


Figura 5.4: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para dirección del viento a 30°

VIENTO 30°		
Denominación zona	C_p teórico	C_p túnel de viento físico
1	-0,45	0,11
2	-0,69	0,08
3	-0,37	-0,91
4	-0,45	-0,27
5	0,40	0,73
6	-0,29	-0,15
1E	-0,48	-0,23
2E	-1,07	-0,70
3E	-0,53	-1,05
4E	-0,48	-0,91
5E	0,61	1,01
6E	-0,43	-0,29

Tabla 5.4: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento para dirección del viento a 30°

En este caso, en lo que respecta al túnel de viento físico solo hay dos valores que no corresponden en signo a lo propuesto por el reglamento.

En cuanto a los valores, se aprecia una diferencia del 50,00% aproximadamente para los casos de túnel de viento físico. Estas diferencias entre los valores, es otorgada a lo ya comentado para el caso de 90°.

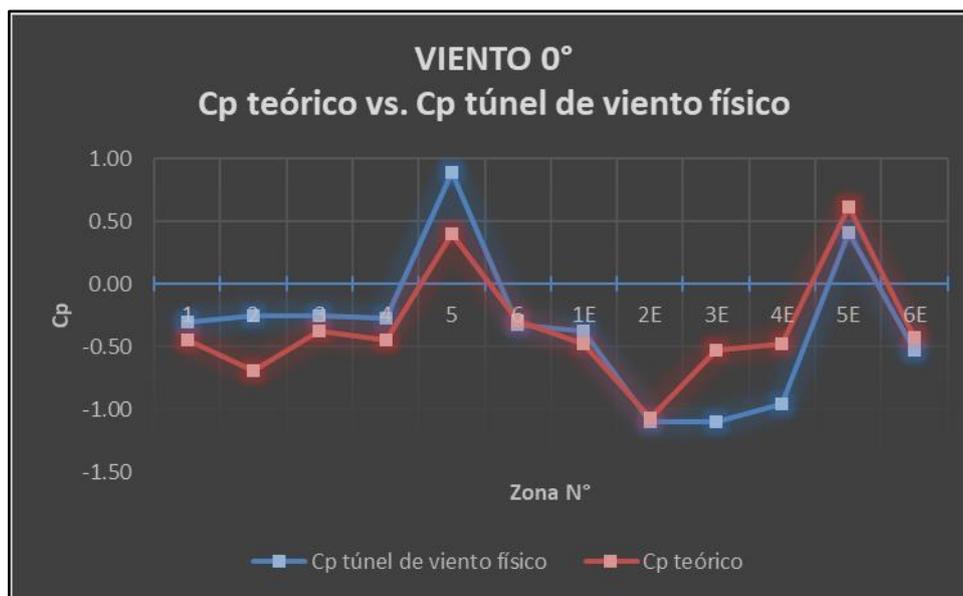


Figura 5.5: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para dirección del viento a 0°

VIENTO 0°		
Denominación zona	C_p teórico	C_p túnel de viento físico
1	-0,45	-0,30
2	-0,69	-0,25
3	-0,37	-0,25
4	-0,45	-0,27
5	0,40	0,89
6	-0,29	-0,32
1E	-0,48	-0,37
2E	-1,07	-1,10
3E	-0,53	-1,10
4E	-0,48	-0,96
5E	0,61	0,41
6E	-0,43	-0,53

Tabla 5.5: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento para dirección del viento a 0°

En esta oportunidad, para túnel físico, se puede ver que es este es el caso que más se asemeja en cuanto a signos y valores de los coeficientes. Esta similitud es otorgada a que, como se mencionó en capítulos anteriores, este caso carece del tan nombrado efecto de bloqueo.

Como se realizó en las últimas cinco tablas, se procederá a comparar el promedio de los coeficientes de presión obtenidos a través del cálculo analítico versus aquellos del túnel de viento físico (Fig. 5.6 y Tabla 5.6).

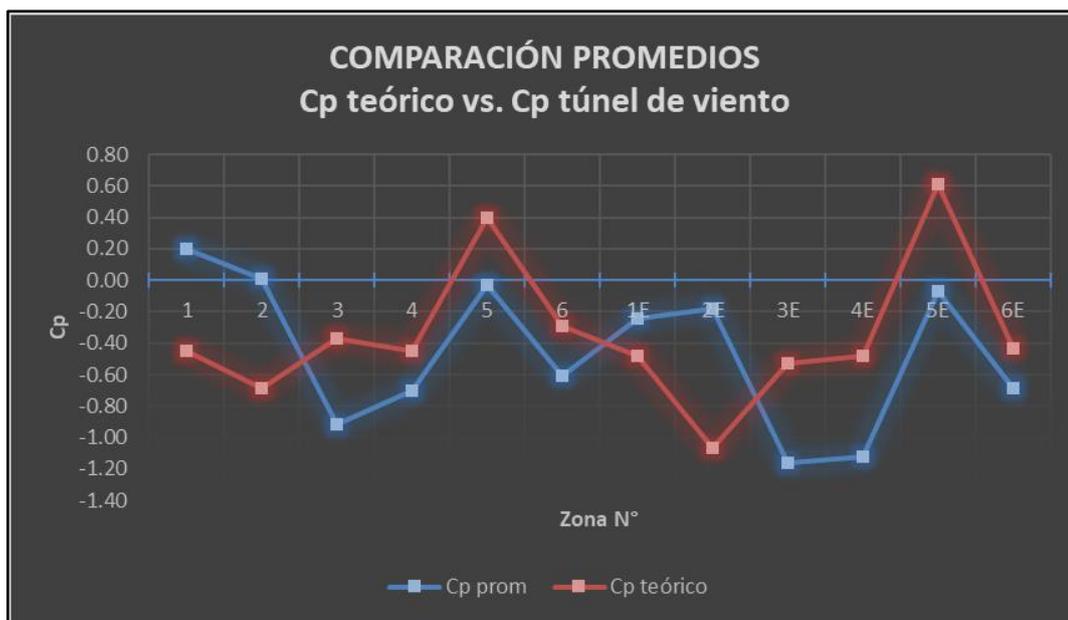


Figura 5.6: comparación gráfica entre el coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión, C_p teórico (según CIRSOC 102) y el C_p medido en el Túnel de Viento, para el promedio de los resultados obtenidos

COMPARACIÓN GLOBAL C_p teórico vs. C_p promedio túnel de viento físico				
Denominación zona	C_p teórico	C_p promedio túnel de viento físico	$\frac{(C_{pp} - C_{pt})}{C_{pt}} * 100\%$	Condición
1	-0,45	0,20	-145,00%	Sobredimensionado
2	-0,69	0,01	-102,00%	Sobredimensionado
3	-0,37	-0,92	149,00%	Subdimensionado
4	-0,45	-0,70	56,00%	Subdimensionado
5	0,40	-0,03	-108,00%	Sobredimensionado
6	-0,29	-0,61	111,00%	Subdimensionado
1E	-0,48	-0,24	-50,00%	Sobredimensionado
2E	-1,07	-0,18	-84,00%	Sobredimensionado
3E	-0,53	-1,16	119,00%	Subdimensionado
4E	-0,48	-1,12	134,00%	Subdimensionado
5E	0,61	-0,07	-112,00%	Sobredimensionado
6E	-0,43	-0,69	61,00%	Subdimensionado

Tabla 5.6: comparación entre coeficiente de presión teórico en las diferentes zonas de presión y aquel medido en el Túnel de Viento Físico para el promedio de los resultados obtenidos

Como se aprecia en la Tabla 5.6, la mayoría de los C_p del túnel de viento físico coinciden en signo con aquellos de la norma.

Por otro lado, la menor diferencia de C_p en porcentaje es del 50,00%, mientras que la mayor es de 149,00%.

En base a esto se puede decir que si bien en el túnel de viento físico existe la misma tendencia de la que habla el reglamento, los resultados pueden no ser muy confiables.

CAPÍTULO 6

COMPARACIÓN DE CARGAS DE NIEVE Y VIENTO EN FUNCIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA CUBIERTA

Como un análisis adicional complementario y a los efectos de analizar la conveniencia o no de la tipología de la cubierta inclinada se calculará y comparará la carga, tanto de viento como de nieve, de tres casos de distinta inclinación (15° , 35° y 45°) (Fig. 6.1).

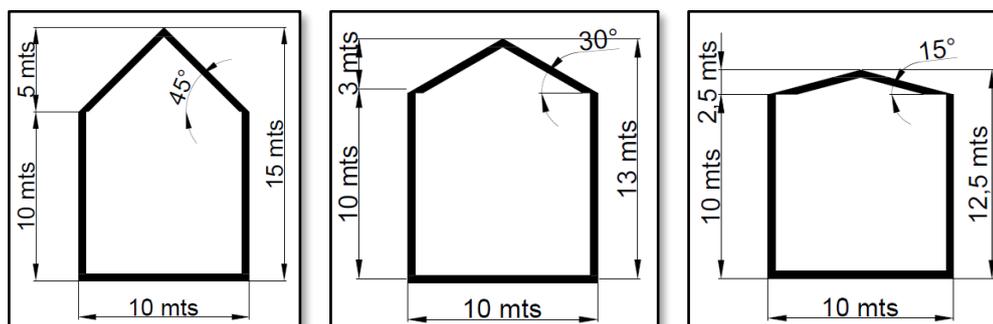


Figura 6.1: esquema de las tres inclinaciones calculados

El diseño de los efectos de las cargas de nieve sobre las edificaciones suele ser calculada a través del reglamento CIRSOC 104 – 2015.

La Norma plantea varios pasos a seguir para obtener las cargas de nieve de un determinado edificio. Se procederá a mencionarlos y describirlos para el caso de 45° .

En lo que respecta a viento, el caso a 45° ya fue descrito y realizado en el Capítulo 4.

6.1 Procedimiento

- I. Mediante el uso de las tablas del reglamento donde se encuentran descritas las cargas de nieve a nivel del terreno (Tabla 6.1), se llega a que

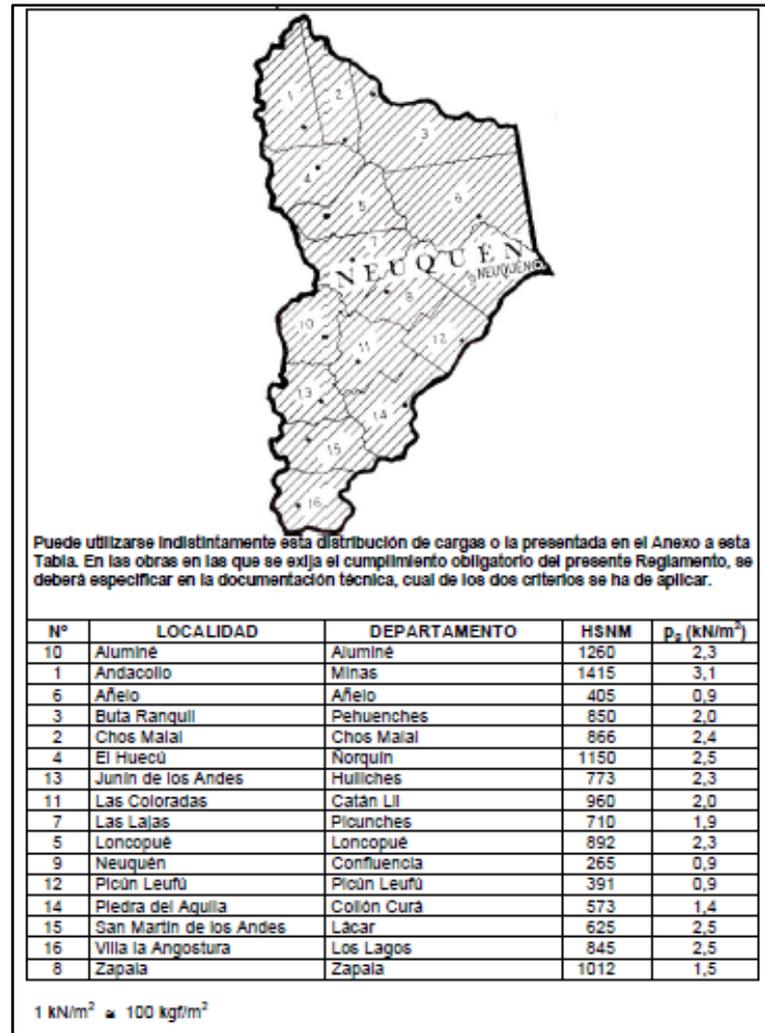


Tabla 6.1: tabla 1.9 del reglamento, carga de nieve a nivel del terreno para la provincia de Neuquén

$$p_g = 2,30 \frac{kN}{m^2}$$

II. Se determina el factor de exposición C_e y la categoría del terreno.

Categoría de terreno	Exposición de la cubierta (*)		
	totalmente expuesta	parcialmente expuesta	protegida
A (ver Apéndice A)	N/A	1,1	1,3
B (ver Apéndice A)	0,9	1,0	1,2
C (ver Apéndice A)	0,9	1,0	1,1
D (ver Apéndice A)	0,8	0,9	1,0
Encima de la línea de árboles en áreas montañosas barridas por el viento	0,7	0,8	N/A

La categoría de terreno y las condiciones de exposición de la cubierta elegidas deben ser representativas de las condiciones previstas durante la vida de la estructura. Se debe determinar un factor de exposición para cada cubierta de una estructura.

Tabla 6.2: tabla 2 del reglamento, factor de exposición

Como se mencionó en el análisis de viento, se consideró

Exposición C

Pudiendo decir, gracias a la Tabla 6.2, que el factor de exposición resulta,

$$C_e = 1,00$$

III. A continuación, con el uso de la Tabla 6.3 se determina el factor térmico C_t .

Condición Térmica (*)	C_t
Todas las estructuras excepto las que se indican a continuación	1,0
Estructuras mantenidas justo por encima del congelamiento y otras con cubiertas frías ventiladas en las cuales la resistencia térmica, R , entre el espacio ventilado y el espacio calefaccionado sea $> 4,4 \text{ K m}^2/\text{W}$ (kelvin metro cuadrado por watt)	1,1
Estructuras no calefaccionadas y estructuras intencionalmente mantenidas debajo del punto de congelamiento	1,2
Invernaderos continuamente calefaccionados (**) con una cubierta con resistencia térmica, R , $< 0,4 \text{ K m}^2/\text{W}$ (kelvin metro cuadrado por watt)	0,85

(*) Estas condiciones deben ser representativas de aquellas previstas para los inviernos durante la vida de la estructura.

(**) Los invernaderos continuamente calefaccionados son aquellos con una temperatura interior constantemente mantenida de 10°C ó más, en cualquier punto a 1 m sobre el nivel de piso durante los inviernos y que tengan un asistente de mantenimiento constante, o un sistema de alarma de temperaturas para avisar en caso de falla de la calefacción.

$1 \text{ K m}^2 / \text{W} = 1^\circ \text{C m}^2 / \text{W}$

Tabla 6.3: tabla 3 del reglamento, factor térmico

$$C_t = 1,00$$

IV. Luego, se determina el factor de importancia **I**.

En base a lo realizado en el análisis de viento,

El tipo de edificio con el que se trabajó se consideró de **Categoría III**. Esto es debido a que al ser un monoblock de 60.00 x 10.00 m, tiene la capacidad de albergar gran cantidad de personas.

Por ende,

$$I = 1,15$$

V. Determinar el factor de pendiente de la cubierta C_s (Fig. 6.2).

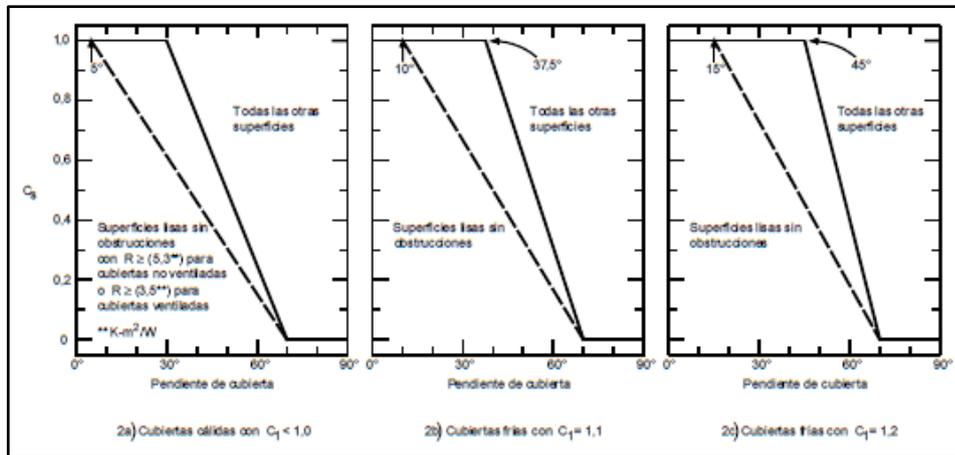


Figura 6.2: figura 2 del reglamento, curvas válidas para determinar el factor de pendiente de la cubierta

Para este caso en particular,

$$C_s = 0,39$$

VI. Por último, se obtiene el valor de la carga de nieve de diseño.

$$p_s = C_s * p_f$$

$$p_s = C_s * 0,70 * C_e * C_t * I * p_g$$

$$p_s = 0,39 * 0,70 * 1,00 * 1,00 * 1,15 * 2,30 \frac{kN}{m^2}$$

$$p_s = 0,72 \frac{kN}{m^2}$$

En la Tabla 6.4 se podrán observar los resultados de cargas de nieve y de viento para los tres ángulos de cubierta.

Carga	Inclinación de la cubierta		
	15°	35°	45°
$q_{nieve} \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	1,71	1,06	0,72
$q_{viento} \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	-0,87	-0,93	-0,99

Tabla 6.4: cargas de viento y nieve para cubierta a 15°, 35° y 45°

Como se puede apreciar en la Tabla 6.4, al aumentar el ángulo de la inclinación de la cubierta, la carga de nieve disminuye y la carga de viento aumenta. Sin embargo, la razón en la disminución de la carga de nieve (40% para 15° - 35° y 30% para 35° - 45°) es mayor a la razón del aumento de la carga de viento (7% tanto para 15° - 35° como para 35° - 45°).

Se compararán los estados límites últimos en los que aparezca la acción del viento (W) o de la nieve (S), y así poder ver cuál tiene mayor incidencia (Fig. 6.3). Al ser este un análisis adicional complementario, se tomarán en cuenta solo esas acciones y no el resto, a pesar de que no sea una situación real.

1,4 (D + F)
1,2 (D + F + T) + 1,6 (L + H) + (f₁ L_r ó 0,5 S ó 0,5 R)
1,2 D + 1,6 (L_r ó S ó R) + (f₁ L ó 0,8 W)
1,2 D + 1,6 W + f₁ L + (f₁ L_r ó 0,5 S ó 0,5 R)
1,2 D + 1,0 E + f₁ (L + L_r) + f₂ S
0,9 D + (1,6 W ó 1,0 E) + 1,6 H

Figura 6.3: combinaciones de acciones para los estados límites últimos

Combinación	Inclinación de la cubierta		
	15°	35°	45°
$0,5 * S \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	0,85	0,53	0,36
$1,6 * S + 0,8 * W \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	2,04	0,95	0,36
$1,6 * W + 0,5 * S \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	-0,02	-0,64	-1,00
$0,2 * S \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	0,34	0,21	0,14
$1,6 * W \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	-1,40	-1,48	-1,58

Tabla 6.5: comparativa para las distintas combinaciones

Estudiando la Tabla 6.5, se puede ver que en los casos de menor inclinación, la combinación toma valores positivos mayores a los de mayor inclinación, ya que no solo la carga de nieve es mayor en los primeros, sino que además, la de viento, al ser negativa, aporta a la “disminución” la carga total.

El análisis anteriormente desarrollado hace referencia a una sola dirección de viento. Al momento de un diseño real, deberá analizarse cada estructura y cómo afecta la dirección de viento en particular .

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto integrador fue comparar las cargas eólicas obtenidas mediante ensayo en túnel de viento con las determinadas con el reglamento CIRSOC 102 sobre un edificio bajo con cubierta de gran pendiente ubicado en la zona cordillerana de la provincia de Neuquén.

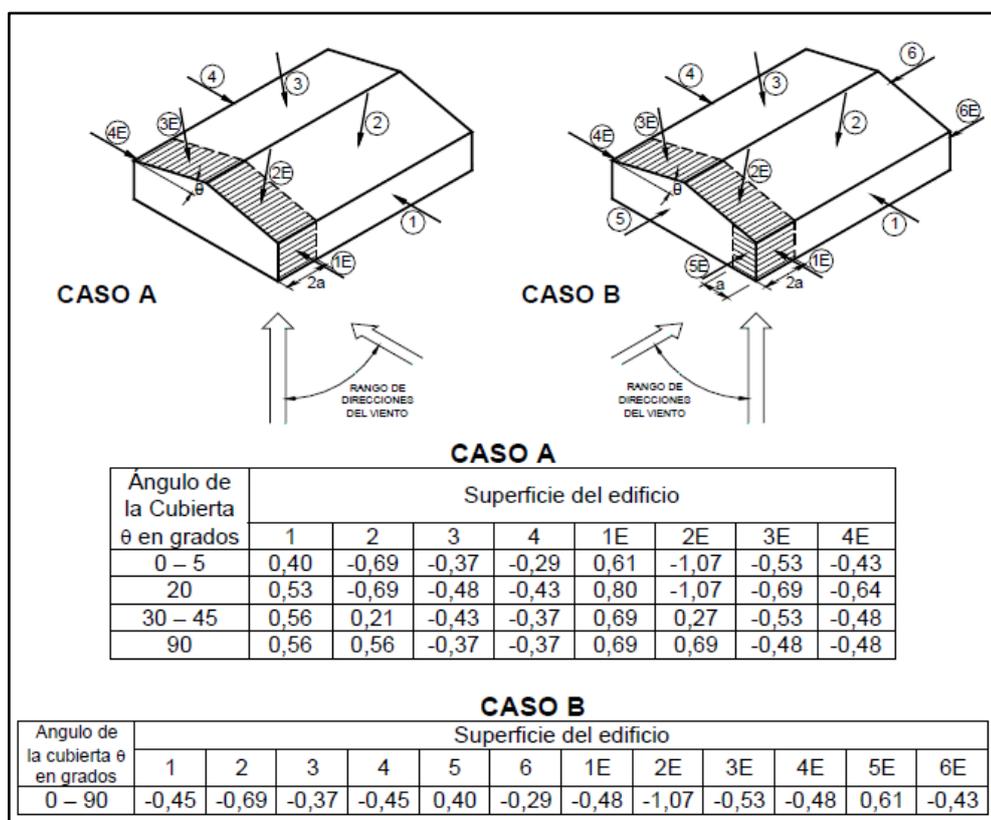
Para lograr el objetivo se consideró un prototipo de vivienda tipo monoblock con pendiente a dos aguas con 45° de inclinación y se realizó un modelo a escala 1:100. El modelo se ensayó en túnel de viento simulando las condiciones de viento de la zona cordillerana, para un ambiente urbano y uno rural. Utilizando técnicas de anemometría de hilo caliente y procesamiento de datos con Data Studio se obtuvieron coeficientes de presión del viento sobre la cubierta que fueron comparados con la normativa. Si bien para la realización de las mediciones se verificó la semejanza dimensional entre los flujos circundantes del prototipo y del modelo, se encontró que las dimensiones relativas del modelo y de la sección de prueba producían el fenómeno de bloqueo del flujo. Este fenómeno produce aceleración del fluido en algunos sectores de la sección de prueba que conducen a resultados no representativos de la realidad por lo que debieron realizarse dos series de ajustes para el correcto procesamiento de los resultados. Los ensayos se realizaron considerando distintas direcciones de viento incidente: 90°, 60°, 45°, 30° y 0°.

7.1 Principales aportes de la investigación

- Los resultados muestran que el coeficiente de presión obtenido en el túnel de viento se encuentra, en promedio, un cien por ciento por encima o por debajo (según la toma analizada) del valor establecido por la norma. Esto coincide con lo analizado por (Ginger & Holmes) en el año 2003, donde hay una gran diferencia entre los coeficientes propuestos por los autores y aquellos definidos por la norma.
- Se realizó una evaluación para determinar la conveniencia de techos de gran inclinación en la zona cordillerana, teniendo en cuenta las cargas producidas sobre el mismo por viento y nieve. Se encontró que al aumentar el ángulo de inclinación de la misma, la carga de nieve disminuye, mientras que la de viento aumenta, aunque en diferentes proporciones. Esta comparación se realizó solo para el viento proveniente de la dirección más desfavorable.
- Los datos de viento utilizados fueron extraídos del mapa de isotacas del reglamento CIRSOC 102. El mismo cuenta con tres isotacas de viento para toda la provincia, por lo que un estudio más particularizado para una localidad determinada requieren de mediciones in situ. La certeza de las velocidades estimadas con el reglamento también sería

mayor si el reglamento incorporara valores de velocidad básica para cada municipio, análogamente a la forma en que se presentan las cargas de nieve en el CIRSOC 104.

Respecto a la información brindada con el CIRSOC 102, se observa también que en la (Fig. 4) del reglamento, el caso B otorga el mismo valor de coeficiente de presión sin importar el ángulo de la cubierta. Esto no es correcto ya que la aceleración del flujo varía con la inclinación del techo. (Ginger & Holmes). La no consideración de la pendiente de la cubierta se traduce en sobredimensionamiento para techos de poca pendiente y subdimensionamiento para ángulos grandes.



7.2 Trabajos futuros

Para mejorar la calidad de las mediciones realizadas en este trabajo es necesario mejorar el modelo para evitar que se produzca el fenómeno de bloqueo. Así mismo la colocación de mayor cantidad de tomas estáticas podría mostrar mayor detalle en cuanto a los resultados obtenidos.

El prototipo analizado en este trabajo tiene cubierta con un ángulo de 45°. En un futuro podrían analizarse cubiertas a distintos ángulos, con el fin de conocer cuál de ellas ofrece la mejor relación esfuerzos – secciones resistentes.

- Análisis de prototipos con distintas relaciones largo – ancho (conservando el ángulo de la cubierta), permitirían identificar cuál configuración produce los esfuerzos de menor magnitud posible.
- Para evaluar la ventaja de las cubiertas de gran pendiente respecto a la nieve versus la desventaja de las mismas ante el viento, es necesario realizar un análisis para distintas inclinaciones de cubierta y para distintas direcciones de viento considerando todas las combinaciones de carga establecidas en la normativa.

BIBLIOGRAFÍA

American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston: Structural Engineering Institute.

Barlow, J., Rae, W., Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*; Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.

Centro de Investigación de los Reglamentos de Seguridad de las Obras Civiles. (2005). *Cirsoc 102: Acción del viento en las construcciones*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

Cluni, F., Gusella, V., Spence, S. M., & Bartoli, G. (2011). Wind action on regular and irregular tall buildings: Higher order moment statistical analysis by HFFB and SMPSS measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 682-690.

Crowe, C., Elger, D., & Roberson, J. (2002). *Mecánica de los Fluidos* (7ma. edición, 1ra. edición en español ed.). México D.F., México: C.E.C.S.A.

Ginger, J., & Holmes, J. (2003). Effect of building length on wind loads on low-rise buildings with a steep roof pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 1377–1400.

Huang, J., Gu, M., & Gao, Y. (2021); “Blockage effects on aerodynamics of isolated tall buildings under uniform turbulent flows”; *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 212.

Jeong, H., Lee, S., Kwon, S. (2018). Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine.

Kim, Y., & Kanda, J. (2010). Characteristics of aerodynamic forces and pressures on square plan buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 449–465.

Lässig, J., & Palese, C., & Apcarian, A. (2009). *Viento, Ciudad y Edificios. Capítulo 1: el viento*.

Neira, J., & Palese, C., & Lässig, J. (2014). Modelado del viento a escala local en terreno complejo: Parte I: período Noviembre - Abril. *Mecánica computacional Vol XXXIII, págs. 3455-3472*.

Pindado, S., Meseguer, J., & Franchini, S. (2011). Influence of an upstream building on the wind-induced mean suction on the flat roof of a low-rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 889-893.

Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes. (2010). *NSR-10: Reglamento colombiana de construcción sismo resistente*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Suaris, W., & Irwin, P. (2010). Effect of roof-edge parapets on mitigating extreme roof suctions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 483–491.

Sutton, O. G. "Micrometeorology". (1953). McGraw-Hill Book Co. Inc.

Tomás, A., & Morales, M. (2012). Revisión y estudio comparativo de la acción del viento sobre las estructuras empleando Eurocódigo. *Informes de la Construcción*, 381-390.

APÉNDICE A

Para describir el perfil de velocidades de las tres curvas se utilizó la ley potencial de Sutton (1953) ya mencionada en el capítulo 3,

$$v(z) = v_1 * \left(\frac{z}{z_1}\right)^p$$

Al momento de querer utilizar la ley, faltaban los datos de velocidad y exponente p tanto para ambiente ciudad y suburbano, como para el túnel.

Los datos de velocidad de ambiente suburbano y ciudad de la localidad de San Martín de los Andes, se obtuvieron de la investigación realizada por Neira, J., & Palese, C., & Lässig, J. en el año 2014 (Fig. A.1 y Fig. A.2).

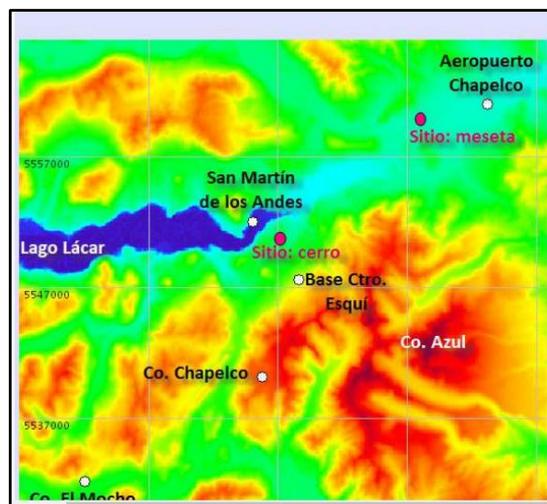


Figura A.1: mapa digital de elevación. Proyección Universal Transverse Mercator, zona 19 sur. Los puntos blancos corresponden a la posición de las estaciones de medición del viento.

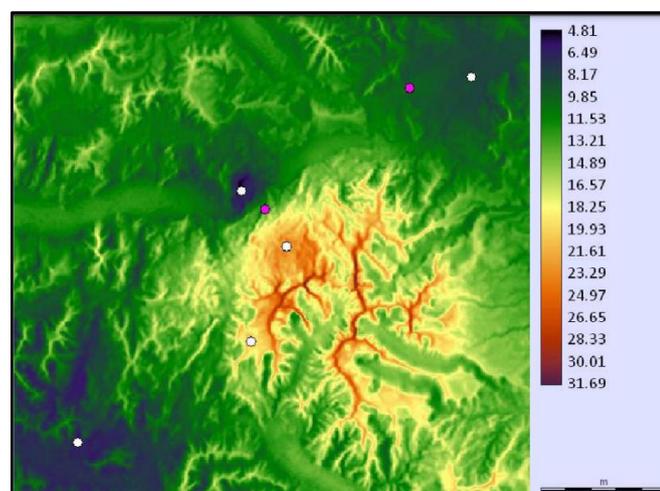


Figura A.2: : campo estimado de la velocidad media del viento (m/s) a 50 m sobre el nivel del suelo del semestre Nov. – Abr.

El coeficiente p para el caso de ciudad y suburbio se obtuvo de la tabla 4 del Reglamento CIRSOC 102 (Fig. A.3).

Exposición	α	Z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	\bar{a}	\bar{b}	c	ℓ (m)	$\bar{\varepsilon}$	Z_{min} (m)
A	5,0	457	1/5	0,64	1/3,0	0,30	0,45	55	1/2,0	18,3
B	7,0	366	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	98	1/3,0	9,2
C	9,5	274	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152	1/5,0	4,6
D	11,5	213	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198	1/8,0	2,1

Figura A.3: tabla 4 del Reglamento CIRSOC 102, de donde se obtuvieron los coeficientes p

Para el primero se utilizó $p = \frac{1}{4,0}$, mientras que para el segundo, $p = \frac{1}{6,5}$.

En cuanto a la velocidad del túnel, en ensayos previos se realizaron mediciones a dos alturas, obteniéndose así dos velocidades distintas (Tabla A.1).

Túnel			
V1 (m/s)	6.29274747	H1 (m)	0.295
V2 (m/s)	4.80270707	H2 (m)	0.105

Tabla A.1: velocidades obtenidas a dos alturas distintas

En el caso de que no se cuente con el exponente p , se puede obtener de la siguiente manera. Sutton (1953).

$$p = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}$$

donde,

$v_1 =$ velocidad de referencia a la altura z_1

$z_1 =$ altura de referencia 1

$v_2 =$ velocidad de referencia a la altura z_2

$z_2 =$ altura de referencia 2

Para el caso del túnel de viento la expresión será

$$p = \frac{\ln\left(\frac{4,80 \frac{m}{s}}{6,29 \frac{m}{s}}\right)}{\ln\left(\frac{0,105 \text{ mts}}{0,295 \text{ mts}}\right)} = 0,26$$

En las Tablas A.1, A.2 y A.3 se pueden observar los datos anteriormente mencionados, resumidos en tres distintas tablas.

Suburbio			
V1 (m/s)	11.53	H1 (m)	50.00
p	0.153846154		

Tabla A.2: resumen de datos para ambiente suburbio

Ciudad			
V1 (m/s)	6.49	H1 (m)	50.00
p	0.250000000		

Tabla A.3: resumen de datos para ambiente suburbio

Túnel			
V1 (m/s)	6.29274747	H1 (m)	0.295
V2 (m/s)	4.80270707	H2 (m)	0.105
p	0.26158192		

Tabla A.4: resumen de datos para túnel de viento

Una vez realizado esto, para adimensionalizar las velocidades se dividió todas las obtenidas por la velocidad a la altura de 60 metros.