



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Determinación de solicitudes de tornados sobre estructuras típicas del sur de Chile

Memoria de Título presentada por

Fernanda Salinas Guerra

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Vivian Aranda

12 DE MARZO DE 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Determinación de solicitaciones de tornados sobre estructuras típicas del sur de Chile.

Nombre del candidato(a): Fernanda Antonia Salinas Guerra

Carrera / Grado: Ingeniera Civil

Campus: Casa Central

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Vivian Aranda, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses

☐ 12 meses

☐ 2 años

☐ 3 años

☐ 5 años

☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12 / 03 / 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12 / 03 / 2026

Firma:



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA MEMORIA:

**Determinación de solicitudes de tornados sobre estructuras típicas
del sur de Chile**

AUTOR:

Fernanda Salinas Guerra

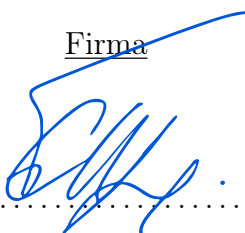
TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de
INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Profesor Guía

Vivian Aranda

.....


Miembro 1 Comisión

Gilberto Leiva

.....

Valparaíso, Chile, 12 DE MARZO DE 2026

DETERMINACIÓN DE SOLICITACIONES DE TORNADOS SOBRE ESTRUCTURAS TÍPICAS DEL SUR DE CHILE

Fernanda Salinas Guerra¹, Vivian Aranda¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La ocurrencia de tornados destructivos en zonas urbanas de Chile, como Talcahuano (2019) y Puerto Varas (2025), ha expuesto las limitaciones de la normativa de viento (NCh432) al omitir efectos rotacionales y succiones verticales críticas. Esta investigación analiza, mediante la interacción fluido-estructura (FSI) en el software ANSYS, la respuesta de viviendas de madera y galpones de acero ante tornados de categoría EF0 a EF2. Utilizando un modelo de Vórtice de Rankine, se contrastaron los esfuerzos de Von Mises y deformaciones frente al procedimiento estático normativo. Los hallazgos demuestran que, aunque la norma actúa como una envolvente de seguridad conservadora, subestima los gradientes de succión localizados y los momentos volcantes basales inducidos por el flujo rotacional. Dado que los esfuerzos registrados en el material permanecen mayoritariamente bajo el límite de fluencia, se concluye que la vulnerabilidad real radica en la discontinuidad del camino de carga en las conexiones estructurales. Se recomienda transitar hacia un enfoque de continuidad del camino de carga mediante el uso de anclajes mecánicos certificados, garantizando la estabilidad de la techumbre y envolvente ante fenómenos meteorológicos no sinópticos en el sur de Chile.

Palabras claves: Tornados, modelación, normativa, anclajes

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis papás por su apoyo incondicional durante todos estos años, por permitirme salir de nuestra ciudad para cumplir mis metas y sueños. También agradezco a mis hermanos, quienes son mi sustento y mi alegría; gracias por estar siempre y por aportar su dosis de locura para alegrar los días nublados.

Agradezco a mi profesora guía, Vivian Aranda, por su confianza, por acompañarme y guiarme de la mejor manera para lograr que esta investigación llegara a un excelente término. Del mismo modo, agradezco el apoyo del profesor Gilberto Leiva, quien me brindó apoyos y los consejos necesarios para que este proyecto fuera un éxito.

Por último, agradezco al Departamento de Mecánica, en especial a don Franco Perazzo, por permitirme utilizar los equipos de mayor capacidad para realizar las simulaciones de esta memoria. Finalmente, agradezco a don Francisco por el apoyo logístico que me brindó para aprender a ocupar estos equipos de manera remota, lo cual fue fundamental para avanzar en mi trabajo de investigación desde mi hogar.

Índice

1. Introducción	10
2. Objetivos	11
3. Marco Teórico	11
3.1. Descripción fenómeno	11
3.1.1. Ecuaciones que rigen el fenómeno	14
3.2. Cargas de tornados sobre estructuras	15
3.3. Normativa	16
4. Metodología	17
5. Modelación ANSYS	18
5.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	19
5.1.1. Ecuaciones y modelo matemático	19
5.1.2. Geometría volumen de control	21
5.2. Definición de Casos de Estudio	25
5.2.1. Caso 1: Vivienda de un piso	25
5.2.2. Caso 2: Vivienda de dos pisos	26
5.2.3. Caso 3: Galpón industrial	27
5.3. Modelación estructural FSI	27
5.3.1. Geometría	27
5.3.2. Materiales	27
5.3.3. Caso 4: Normativa NCh432of2025	28
6. Resultados y discusión	30
6.1. Análisis aerodinámico	30
6.2. Respuesta estructural	32
6.3. Análisis de deformaciones	34
7. Conclusiones y recomendaciones	37
Referencias	39
8. Anexos	40
A. Análisis aerodinámico	40
B. Respuesta Estructural	41
C. Deformaciones estructuras	42

Índice de figuras

3.1. Formación tornados en Chile. Fuente: Elaboración propia	12
3.2. Modelo conceptual que resume las principales características sinópticas de las tormentas convectivas durante mayo del 2019. Fuente: Vicencio et al. (2021)	14
3.3. Esquema de evaluación del término de advección de la ecuación de vorticidad. Fuente: Caballero (2024)	15
3.4. Esquema de la inclinación de vorticidad horizontal a lo largo de una cumbre de entropía constante. Fuente: Caballero (2024)	15
3.5. Fuerzas de viento sobre una estructura. Fuente: Van De Lindt et al. (2012)	16
5.1. Modelo aplicado en ANSYS. Fuente: Elaboración propia	19
5.2. Mallado Caso 1. Fuente:Elaboración propia	22
5.3. Velocidad en plano xy para Z=1. Fuente:Elaboración propia	22
5.4. Mallado Caso 2. Fuente:Elaboración propia	23
5.5. Velocidad en plano xy para z=1. Fuente:Elaboración propia	23
5.6. Mallado Caso 3. Fuente:Elaboración propia	24
5.7. Velocidad en plano xy para z=1. Fuente:Elaboración propia	24
5.8. Mallado Caso 4. Fuente:Elaboración propia	25
5.9. Velocidad en plano xy para z=1. Fuente:Elaboración propia	25
5.10. Geometría casa 1 piso. Fuente:Elaboración propia	26
5.11. Geometría casa 2 pisos Fuente:Elaboración propia	26
5.12. Geometría galpón. Fuente:Elaboración propia	27
6.1. Presión caso 1, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	31
6.2. Presión caso 2, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	31
6.3. Presión caso 3, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	32
6.4. Esfuerzo caso 1, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	33
6.5. Esfuerzo caso 1, según normativa. Fuente: Elaboración propia	33
6.6. Esfuerzo caso 2, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	33
6.7. Esfuerzo caso 2, según normativa. Fuente: Elaboración propia	33
6.8. Esfuerzo caso 3, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	34
6.9. Esfuerzo caso 3, según normativa. Fuente: Elaboración propia	34
6.10. Deformación caso 1, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	35
6.11. Deformación caso 1, según normativa. Fuente: Elaboración propia	35
6.12. Deformación caso 2, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	35
6.13. Deformación caso 2, según normativa. Fuente: Elaboración propia	35
6.14. Deformación caso 3, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia	36
6.15. Deformación caso 3, según normativa. Fuente: Elaboración propia	36
A.1. Presión caso 1, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	40
A.2. Presión caso 1, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	40
A.3. Presión caso 2, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	40
A.4. Presión caso 2, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	40
A.5. Presión caso 3, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	40
A.6. Presión caso 3, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	40

B.1. Esfuerzo caso 1, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	41
B.2. Esfuerzo caso 1, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	41
B.3. Esfuerzo caso 2, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	41
B.4. Esfuerzo caso 2, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	41
B.5. Esfuerzo caso 3, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	41
B.6. Esfuerzo caso 3, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	41
C.1. Deformaciones caso 1, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	42
C.2. Deformaciones caso 1, según normativa. Fuente: Elaboración propia	42
C.3. Deformaciones caso 2, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	42
C.4. Deformaciones caso 2, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	42
C.5. Deformaciones caso 3, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia	42
C.6. Deformaciones caso 3, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia	42

Índice de tablas

3.1. Escala de Fujita mejorada (EF) con daños potenciales.Fuente: National Geographic Society (2024)	13
5.1. Parámetros de entrada para el tornado.Fuente:Dirección Meteorológica de Chile (2025)	21
5.2. Velocidades tangenciales máximas por categoría de tornado.	21
5.3. Propiedades mecánicas de los materiales asignados según normativa vigente.	28
5.4. Coeficientes de presión externa (C_p) según NCh432.	29
5.5. Presiones de diseño normativo calculadas para ingreso en ANSYS [Pa].	29
6.1. Presiones internas calculadas para escenarios de tornado [Pa].	30
6.2. Comparativa de presiones máximas de succión registradas [Pa].	31
6.3. Esfuerzos máximos de Von Mises para cada escenario de carga [Pa].	32
6.4. Deformaciones totales máximas por escenario de carga [m].	34

Glosario de Variables

Variables Meteorológicas y de Vorticidad

$\vec{c}$	Vector velocidad de traslación de la tormenta o corriente ascendente.
$\vec{k}$	Vector unitario en la dirección vertical (z).
$\vec{S}$	Vector de cizalladura (<i>shear</i>) vertical del viento horizontal medio.
t	Tiempo.
u', v'	Perturbaciones de las componentes zonal y meridional del viento, respectivamente.
$\vec{v}$	Vector velocidad del viento horizontal.
$\vec{\bar{v}}$	Viento horizontal medio.
w	Componente vertical de la velocidad del viento (<i>updraft</i>).
w'	Perturbación de la velocidad vertical.
ζ	Componente vertical de la vorticidad relativa.
ζ'	Perturbación de la vorticidad relativa vertical.
$\vec{\omega}_h$	Vector de vorticidad horizontal.
∇	Operador nabla (gradiente).
∇_h	Operador nabla horizontal.

Variables de Ingeniería y Normativa (NCh432 y ASCE 7-22)

C_p	Coeficiente de presión externa.
G	Factor de efecto de ráfaga para tornados.
GC_{pi}	Coeficiente de presión interna (viento sinóptico).
GC_{pit}	Coeficiente de presión interna para tornados (incluye APC).
I	Factor de importancia de la estructura.
K_{dt}	Factor de direccionalidad para tornados.
K_e	Factor de elevación del suelo (densidad del aire).
K_{vt}	Factor de ajuste de presión vertical por efecto de tornados.
K_z	Coeficiente de exposición para la presión de velocidad.
K_{zt}	Factor topográfico.
p_t	Presión de diseño para cargas de tornado.
q_z	Presión de velocidad evaluada a una altura z .
q_{zt}	Presión de velocidad de tornado a una altura z .
V	Velocidad básica del viento (ráfaga de 3 s a 10 m de altura).

Variables de Modelación Numérica (CFD) y Vórtice de Rankine

k	Energía cinética turbulenta (en el modelo $k - \omega$ SST).
r	Distancia radial desde el centro del vórtice.
$r_{\max}$	Radio del núcleo del tornado (donde la velocidad es máxima).
$V_{\max}$	Velocidad tangencial máxima del tornado.
V_t	Velocidad tangencial a una distancia radial r .
V_{trans}	Velocidad de traslación del tornado a lo largo del dominio.
x_c, y_c	Coordenadas del centro del tornado en el plano XY .
z_0	Longitud de rugosidad aerodinámica del terreno.
θ	Ángulo polar en coordenadas cilíndricas para la descomposición de vectores.
ω	Tasa de disipación específica de la turbulencia.

1. Introducción

Hasta hace poco, la idea de tornados en Chile era considerada por muchos como un fenómeno meteorológico ajeno y extremadamente inusual. La percepción pública cambió drásticamente en mayo de 2019, cuando un tornado de gran intensidad azotó la ciudad de Talcahuano, dejando una estela de destrucción que evidenció la vulnerabilidad de las zonas urbanas a este tipo de eventos (Caballero, 2024). Este suceso marcó un punto de inflexión, instalando la idea de que los tornados son una amenaza real y presente en el país.

Contrario a la creencia de una ausencia de registros históricos, la investigación ha revelado una larga data de tornados y trombas marinas en el territorio nacional, con eventos documentados desde 1554 (Vicencio et al., 2021). Si bien muchos de estos fenómenos ocurrían en zonas rurales o se disipaban antes de tocar tierra, su ocurrencia no es nueva. Los análisis demuestran una clara estacionalidad, con un peak de eventos concentrado entre la segunda quincena de mayo y la primera de junio, y una mayor ocurrencia en la zona centro-sur del país (Caballero, 2024). Esta amenaza latente se manifestó con fuerza recientemente, en el tornado de Puerto Varas en mayo de 2025, que causó daños considerables y dejó múltiples heridos, subrayando la fragilidad de las comunidades ante estas fuerzas de la naturaleza (Dirección Meteorológica de Chile, 2025).

A pesar de su impacto documentado, el estudio de los tornados desde la ingeniería estructural es nulo en Chile. Las investigaciones post-evento, como las realizadas tras el tornado de Talcahuano, se han centrado principalmente en la caracterización meteorológica y la documentación de daños (Aránguiz et al., 2020; Vicencio et al., 2021). La problemática central para la ingeniería civil no es solo la ocurrencia del fenómeno, sino la falta de una metodología de diseño estructural que considere las solicitaciones específicas impuestas por las cargas de viento de un tornado, las cuales difieren de las ráfagas de viento convencionales contempladas en la normativa vigente.

En respuesta a esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo principal analizar la respuesta estructural de tipologías de viviendas representativas del sur de Chile ante cargas de viento tornádicas y proponer una metodología para el diseño de estructuras expuestas a estos fenómenos. El estudio se enfocará en tornados de baja a moderada intensidad, específicamente hasta la categoría EF2 en la Escala Fujita Mejorada. Esta delimitación se fundamenta en que la mayoría de los tornados registrados en Chile se encuentran en el rango EF0-EF2 y, según la literatura, los daños producidos por eventos de hasta categoría EF2 pueden ser controlados mediante mejoras constructivas análogas a las aplicadas en diseños para huracanes (Huang et al., 2016). Por tanto, el análisis en intensidades hasta EF2 permite proponer medidas de mitigación efectivas y económicamente viables.

Para cumplir dicho propósito, se desarrolla un análisis de interacción fluido-estructura (FSI) mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el software ANSYS, cuantificando los esfuerzos máximos sobre diversas tipologías habitacionales para su contraste con la normativa NCh432 (Instituto Nacional de Normalización, 2025). La presente memoria integra el marco teórico, la validación de las simulaciones y una discusión técnica sobre la brecha entre el régimen rotacional y el criterio normativo. El trabajo concluye con las recomendaciones necesarias para robustecer la práctica de la ingeniería civil y mitigar la vulnerabilidad estructural en Chile, consolidando así los resultados finales de esta investigación.

2. Objetivos

Analizar la aplicabilidad de la normativa chilena de viento al diseño de edificaciones de baja altura en zonas con riesgo de tornado en el sur de Chile. Para lograrlo, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar las presiones y esfuerzos inducidos por vientos tornadizos en modelos de edificaciones típicas del sur de Chile mediante simulación.
- Correlacionar los esfuerzos máximos obtenidos de la simulación con los prescritos por la normativa chilena de viento vigente (NCh432).
- Establecer posibles factores de amplificación de carga para el diseño estructural, basados en la brecha identificada entre las cargas simuladas y las normativas.

3. Marco Teórico

3.1. Descripción fenómeno

Los tornados son eventos meteorológicos extremos que se originan a partir de tormentas convectivas, conocidas como supercélulas. La formación de estas tormentas evoluciona desde nubes cumulonimbus y requiere una combinación de condiciones específicas: cizalladura del viento, es decir, una variación en su velocidad y dirección con la altitud, altos niveles de humedad atmosférica y una fuerte inestabilidad, producto del contraste entre el aire cálido en la superficie y una masa de aire fría en altura.

Tal como se ilustra en la Figura 3.1, la cizalladura del viento induce una rotación sobre un eje horizontal en las capas bajas de la atmósfera. Esta rotación es posteriormente absorbida e inclinada por la corriente ascendente de la tormenta, alimentada por el aire cálido y húmedo de la superficie. Al ponerse en posición vertical, este giro se organiza y da origen al mesociclón, el cual es un vórtice giratorio que constituye el corazón de la supercélula.

Posteriormente, este mesociclón comienza a estirarse verticalmente en dirección al suelo. Este estrechamiento provoca que su velocidad de rotación aumente drásticamente, dando lugar a la formación de la característica nube embudo. Finalmente, cuando esta columna de aire en violenta rotación hace contacto con la superficie, el fenómeno se define como un tornado.

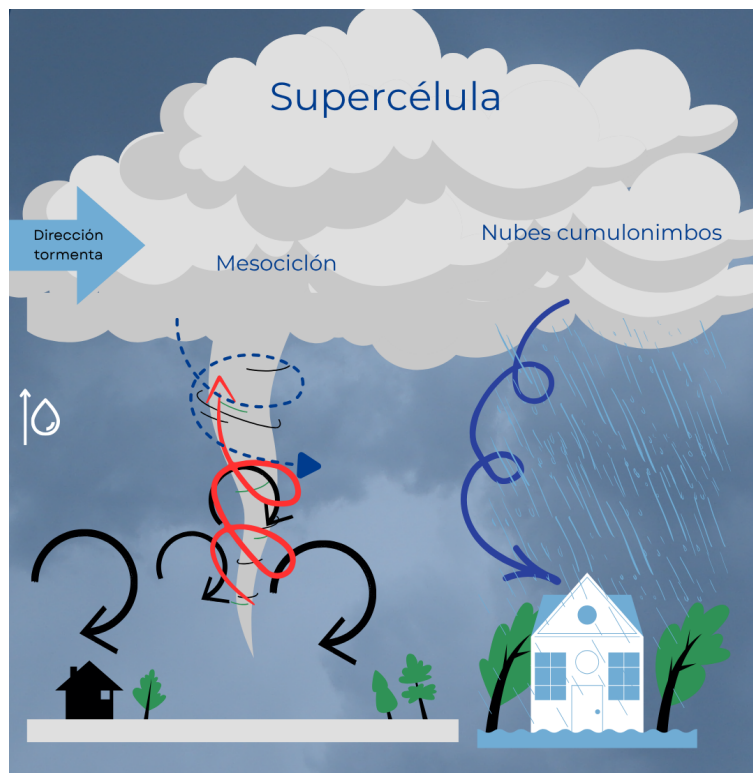


Figura 3.1: Formación tornados en Chile. Fuente: Elaboración propia

Medir la fuerza de un tornado es difícil y peligroso, ya que estos fenómenos destruyen la mayoría de los instrumentos a su paso. Por esta razón, los meteorólogos e ingenieros evalúan su intensidad de manera indirecta, analizando la escena después del evento. Para ello utilizan la Escala Mejorada de Fujita (EF), un sistema que estima la velocidad del viento de un tornado basándose en el tipo y la magnitud de los daños provocados.

La escala mejorada no solo se fija en cuánta destrucción hubo, sino que pone el daño en contexto. Por ejemplo, no se requiere la misma fuerza para derribar un granero de madera que arrasar una casa de ladrillos bien construida. La escala EF utiliza "indicadores de daño" y considera la calidad de la construcción para determinar con mayor precisión la fuerza del viento necesaria para causar ese nivel de daño.

Una vez evaluados los datos, se asigna una categoría que va desde EF0, para aquellos que causan daños leves como arrancar ramas o tejas, hasta EF5, para tornados más violentos y catastróficos, capaces de barrer con edificaciones sólidas. Esta escala se visualiza en la Tabla 3.1 .

Tabla 3.1: Escala de Fujita mejorada (EF) con daños potenciales. Fuente: National Geographic Society (2024)

Escala	Velocidad del viento		Frecuencia relativa	Daños potenciales
	mph	km/h		
EF0	65-85	105-137	98,5 %	Daños leves. Algunas tejas caídas y otras pequeñas piezas de los tejados arrancadas, algunos daños en canaletas, ramas de árboles rotas y algunos árboles poco profundos arrancados. Los tornados que no causan daños visibles (por ejemplo aquellos que se producen en campos abiertos) se valoran como de EF0, aunque en los últimos tiempos tales tornados han sido catalogados como EFU.
EF1	86-110	138-178	31,6 %	Daños moderados. Tejados seriamente despedazados, caravanas y casetas volcadas o seriamente dañadas, pérdida de puertas exteriores y ventanas y otros cristales rotos.
EF2	111-135	179-218	10,7 %	Daños considerables. Tejados de casas sólidas arrancados, los cimientos de las casas se pueden mover, caravanas completamente destruidas, árboles grandes partidos o arrancados, pequeños objetos convertidos en proyectiles, coches arrancados del suelo.
EF3	136-165	219-266	3,4 %	Daños graves. Pisos enteros de casas bien construidas destruidos, daños graves a los edificios grandes (tales como centros comerciales), trenes volcados, árboles descortezados, vehículos pesados levantados del suelo y arrojados a distancia, estructuras con cimientos débiles lanzados a cierta distancia.
EF4	166-200	287-322	0,7 %	Daños devastadores. Tanto las casas de hormigón y ladrillos como las de madera pueden quedar completamente destruidas, los coches pueden ser proyectados como misiles.
EF5	>200	>322	<0,1 %	Daños increíbles. Las casas fuertes pueden quedar arrasadas hasta los cimientos, las estructuras de hormigón armado dañadas críticamente, los edificios altos sufren graves deformaciones estructurales. Devastaciones increíbles. Conocido coloquialmente como "el dedo de Dios".

En Chile no se ha logrado evidenciar que todos los tornados se formen de una supercélula, pero ha sido lo más predictivo en los estudios realizados, como se ve en la Figura 3.2, donde se indican las principales características de las tormentas convectivas ocurridas en mayo de 2019.

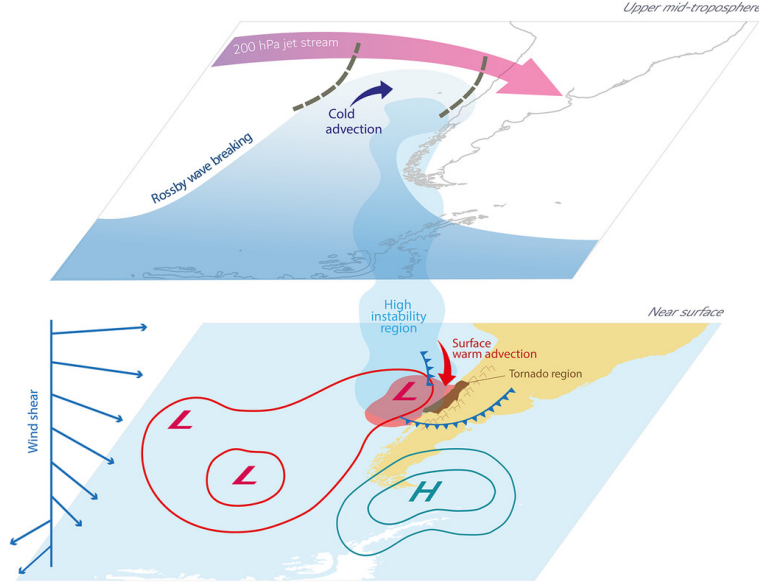


Figura 3.2: Modelo conceptual que resume las principales características sinópticas de las tormentas convectivas durante mayo del 2019. Fuente: Vicencio et al. (2021)

A pesar de que recientemente ocurrió un evento extremo en la ciudad de Puerto Varas, aún no se han publicado estudios exhaustivos sobre este fenómeno. No obstante, informes preliminares señalan dos aspectos clave: primero, que las condiciones atmosféricas de la jornada fueron consistentes con las descritas para la favorable formación de tornados en la región propuestas por la memorista Victoria Caballero para optar al grado de magíster en meteorología y climatología en la Universidad de Chile ; y segundo, que el tornado ha sido clasificado como un EF1 según la Tabla 3.1, en base en la evaluación de los daños provocados.

3.1.1. Ecuaciones que rigen el fenómeno

Las ecuaciones que modelan el fenómeno varían según diferentes autores. A continuación, se presentarán aquellas que se consideran más afines al tema de estudio.

Primero, el fenómeno ha sido estudiado de manera general por Caballero (2024). Se indica que la formación del mesociclón, que es la generación de vorticidad en niveles medios característica de la supercelda, se puede explicar mediante la Ecuación (3.1) de la vorticidad.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \zeta + \vec{\omega}_h \cdot \vec{\nabla} w + \zeta \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.1)$$

En esta ecuación, el primer término a la derecha representa la generación de vorticidad relativa vertical por advección; el segundo, la generación por inclinación de la vorticidad horizontal; el tercero, representa la generación por "stretching" o estiramiento.

Linealizando la ecuación (reemplazando $u = \bar{u}(z) + u'$, $v = \bar{v}(z) + v'$, $w = w'$, y $\zeta = \zeta'$, e ignorando los productos de perturbaciones) y reescribiéndola en un marco de referencia relativo a la corriente ascendente o "updraft" (con velocidad constante c), se obtiene la siguiente expresión conocida como *storm-relative* (sr)

$$\left(\frac{\partial \zeta'}{\partial t}\right)_{sr} = -(\vec{v} - \vec{c}) \cdot \nabla_h \zeta' + \vec{S} \times \nabla w' \cdot \vec{k}. \quad (3.2)$$

En la Ecuación (3.2) $(\vec{v} - \vec{c})$ corresponde a la velocidad del viento relativa a la tormenta, donde $\vec{v}$ es el viento horizontal medio, $\vec{S}$ es el vector de cizalladura vertical del viento horizontal medio. El término $\left(\frac{\partial \zeta'}{\partial t}\right)_{sr}$ es la tendencia de la perturbación de vorticidad vertical en dicho marco de referencia. El primer término de esta ecuación corresponde a la generación de ζ por advección, mientras que el segundo corresponde a la generación por inclinación de la vorticidad horizontal, asociada a la cizalladura vertical del viento medio, mediante gradientes horizontales de velocidad vertical.

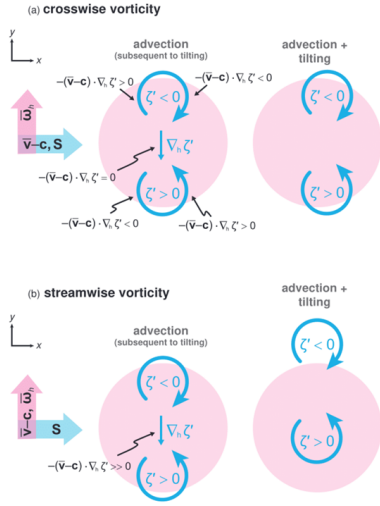


Figura 3.3: Esquema de evaluación del término de advección de la ecuación de vorticidad. Fuente: Caballero (2024)

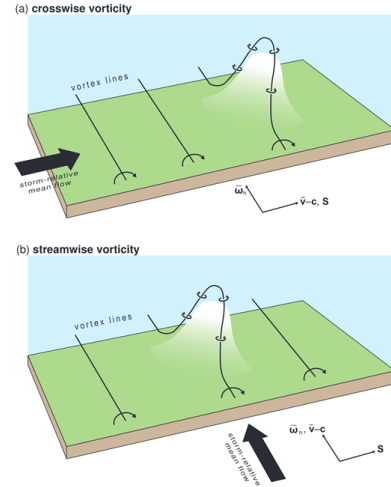


Figura 3.4: Esquema de la inclinación de vorticidad horizontal a lo largo de una cuma de entropía constante. Fuente: Caballero (2024)

En la Figura 3.3 y la Figura 3.4 se visualiza cómo la dupla de vórtices produce una advección por los vientos relativos a la tormenta.

El desplazamiento de los núcleos de vorticidad es mayor en el caso “*streamwise*” ya que el gradiente de vorticidad es más fuerte entre los núcleos de vorticidad que en la dirección del vector de cizalladura. Esto aumenta la magnitud de la vorticidad ciclónica en los niveles medios mediante el término de estiramiento (“*stretching*”).

3.2. Cargas de tornados sobre estructuras

Las cargas tornádicas se caracterizan por una combinación de presiones laterales y una intensa succión vertical (elevación) que actúa sobre la envolvente de la vivienda. Estas fuerzas de succión son transferidas a la cubierta del techo, y la falla de su revestimiento o sistema de anclaje bajo esta sollicitación es el principal mecanismo que conduce a la voladura de la techumbre.

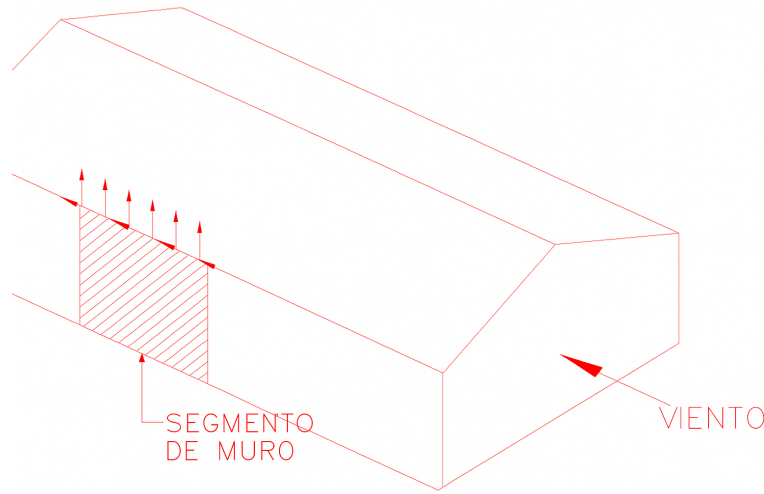


Figura 3.5: Fuerzas de viento sobre una estructura. Fuente: Van De Lindt et al. (2012)

3.3. Normativa

Para evaluar la respuesta estructural de las viviendas, se establece un marco de análisis basado en la normativa chilena vigente y en un estándar internacional de referencia. Este enfoque permite, por un lado, modelar una vivienda representativa de la práctica constructiva nacional y, por otro, compararla con los criterios de diseño avanzados para cargas tornádicas.

- **Decreto N°47 - Ordenanza General de Urbanismo y construcciones (OGUC):** Esta ordenanza constituye el marco legal y técnico para toda construcción en Chile. Su rol en esta investigación es fundamental, ya que establece la obligatoriedad de aplicar las Normas Chilenas (NCh) como normas oficiales, definiendo así las bases mínimas de diseño que debe cumplir una vivienda regularizada (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 1992).
- **Nch432(2025) - Cargas de viento:** La normativa chilena constituye el marco regulatorio para la determinación de los requisitos mínimos de carga de viento. Este estándar fundamenta su metodología en el análisis de vientos sinópticos, utilizando un enfoque de presión estática equivalente para el diseño del sistema principal resistente a la fuerza del viento (SPRFV) y de los componentes y revestimientos (C&R).

La normativa establece una velocidad básica del viento (V), definida como una ráfaga de 3 segundos medida a una altura de 10 metros sobre el suelo en una categoría de exposición de campo abierto. El diseño se articula mediante el cálculo de la presión de velocidad (q_z), la cual incorpora factores multiplicadores que consideran la importancia de la estructura, la rugosidad del terreno y los efectos topográficos locales. En particular, la expresión general para la determinación de esta presión se define como:

$$q_z = 0,613 \cdot I \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_e \cdot V^2 \quad (3.3)$$

Donde I representa el factor de importancia, K_z el coeficiente de exposición según la altura, K_{zt} el factor topográfico y K_e el factor de elevación del suelo. Un aspecto crítico de la NCh432

es que, si bien hereda gran parte de la lógica de versiones previas de la norma norteamericana ASCE 7, mantiene un enfoque conservador respecto a la variación de la velocidad en la capa límite atmosférica, asumiendo una reducción significativa de la magnitud del viento a medida que se aproxima a la superficie terrestre debido a la fricción. Finalmente, la norma chilena no presenta un espectro de diseño diferenciado para fenómenos de rotación intensa, como los tornados, tratando los eventos extremos bajo la estadística de recurrencia de tormentas convencionales.

- **ASCE 7-22 - Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures** :Esta norma desarrollada por la *American Society of Civil Engineers* de Estados Unidos, se utilizará como el estándar de referencia internacional que representa el estado del arte en la materia. Se eligió porque EE.UU. posee una vasta experiencia en el diseño contra tornados.

La edición 2022 introduce una innovación sustancial mediante la incorporación del Capítulo 32, el cual sistematiza el diseño específico para cargas tornádicas. A diferencia de los modelos de viento convencionales, la ASCE 7-22 reconoce que la física de un tornado difiere mecánicamente de los vientos sinópticos en variables críticas como el perfil de velocidad vertical y la presión hidrostática.

El procedimiento de diseño en esta normativa introduce el coeficiente de exposición de velocidad tornádica (K_{zTor}), el cual postula que, debido a la dinámica propia del vórtice, la velocidad del viento no disminuye cerca del nivel del suelo, manteniendo una magnitud máxima y uniforme en las cotas inferiores de la estructura. Asimismo, se incorpora el factor de ajuste del coeficiente de presión tornádica (K_{vT}), diseñado para capturar el efecto de las corrientes ascendentes o *updrafts*, las cuales incrementan las fuerzas de succión vertical en los sistemas de techumbre. La presión tornádica de diseño (p_T) se formula de la siguiente manera:

$$p_T = q \cdot G_T \cdot K_{dT} \cdot K_{vT} \cdot C_p - q_i \cdot (GC_{piT}) \quad (3.4)$$

Un elemento distintivo de este estándar es la consideración del Cambio de Presión Atmosférica (APC) dentro del coeficiente de presión interna (GC_{piT}). Este fenómeno explica la vulnerabilidad de edificios cerrados ante el paso del núcleo del tornado, donde la caída repentina de la presión exterior genera un gradiente expansivo que puede comprometer la integridad de la envolvente (Federal Emergency Management Agency, 2023). En el contexto de la investigación actual, la ASCE 7-22 proporciona un marco de referencia avanzado para proponer mejoras en la resiliencia estructural de zonas geográficas donde los modelos de viento estándar resultan insuficientes para caracterizar eventos de alta intensidad vorticial.

4. Metodología

La metodología de este estudio se ha diseñado para abordar los objetivos planteados y se desarrollará a través de una serie de actividades organizadas de manera secuencial y complementaria:

1. **Revisión de la Literatura y Fundamentación Teórica:** Se realizó un análisis exhaustivo de la literatura científica para caracterizar el fenómeno y establecer el estado del arte. Esta revisión incluyó el estudio de modelos matemáticos que describen la dinámica de los tornados, la investigación de eventos pasados en Chile para analizar cualitativamente los daños estructurales, y el análisis de metodologías de simulación empleadas en estudios internacionales.
2. **Descripción y Caracterización del Fenómeno:** A partir de la revisión literaria, se comprendieron y detallaron los aspectos físicos fundamentales de la formación y dinámica de los tornados. Se identificaron las ecuaciones matemáticas descriptivas pertinentes, lo cual facilitó una comprensión clara del fenómeno y sentó las bases teóricas para el posterior modelamiento numérico.
3. **Definición y Modelado de Casos de Estudio:** Se seleccionaron y modelaron en tres dimensiones las geometrías de estructuras representativas de la zona sur de Chile: una vivienda de un piso, una vivienda de dos pisos y un galpón industrial. Los modelos se basaron en planos tipo y dimensiones estándar.
4. **Análisis Numérico mediante Simulación CFD:** Se llevó a cabo un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando el software ANSYS Fluent. Se caracterizó la amenaza tornádica mediante un modelo de vórtice idealizado para las categorías EF0, EF1 y EF2, implementado como condición de borde en un dominio computacional. La simulación resolvió las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) para obtener los campos de presiones detallados y los esfuerzos globales sobre las estructuras para cada escenario.
5. **Cálculo de Cargas de Diseño según Normativa Vigente:** Para cada caso de estudio, se calcularán las cargas de diseño por viento de acuerdo con el procedimiento de la norma chilena NCh432. Este cálculo establecerá la línea base de diseño que representa la práctica ingenieril actual y servirá como referencia para el análisis comparativo.
6. **Análisis Comparativo y Cuantificación de Discrepancias:** Se realizará una comparación sistemática entre las cargas obtenidas de las simulaciones CFD y las calculadas según la normativa. Este análisis se centrará en identificar y cuantificar la magnitud de la subestimación de la norma, determinando los elementos estructurales más vulnerables y las condiciones más críticas.
7. **Formulación de Propuesta de Diseño:** Basado en los resultados del análisis comparativo, se formulará una propuesta metodológica para el diseño estructural.

5. Modelación ANSYS

La modelación del fenómeno de interacción tornado-estructura se desarrolló integrando dos bloques de análisis acoplados como se visualiza en la Figura 5.1, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) la cual tiene como objetivo determinar los campos de presión transitorios generados por el vórtice y Análisis de Elementos Finitos (FEA), destinada a evaluar las presiones para obtener los esfuerzos resultantes.

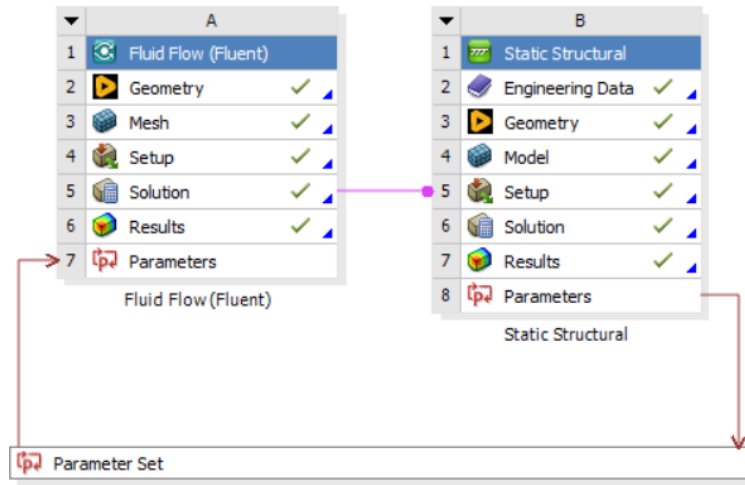


Figura 5.1: Modelo aplicado en ANSYS. Fuente: Elaboración propia

5.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Esta sección se detalla la configuración numérica utilizada para recrear el cambio de viento del tornado.

5.1.1. Ecuaciones y modelo matemático

Para poder modelar el tornado es necesario poner formulas en el bloque A4 *Setup*, para ejecutar el fenómeno.

La simulación numérica del flujo de aire se fundamenta en la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS), las cuales describen la conservación de masa y momento para un fluido. Para cerrar el sistema de ecuaciones es necesario emplear un modelo que caracterice los efectos de la turbulencia.

Para este estudio, se seleccionó el modelo de turbulencia $k - \omega$ *Shear Stress Transport (SST)*. Esta elección se debe a su naturaleza híbrida, que lo hace adecuado para problemas de aerodinámica externa con geometrías complejas. El modelo $k - \omega$ SST combina la robustez y precisión del modelo $k - \omega$ estándar en la región cerca a las paredes con la robustez del modelo $k - \epsilon$ en la corriente libre, lejos de la superficies. Esta capacidad dual es la ideal para el presente problema, ya que permite resolver con alta precisión la capa límite que se forma sobre la superficie del suelo y la estructura, al tiempo que mantiene la estabilidad en el modelado del vórtice del tornado en el campo lejano. La formulación SST también incluye modificaciones para predecir de manera más precisa la separación del flujo bajo gradientes de presión adversos, un fenómeno crítico en la interacción del viento con edificaciones.

Según la literatura, una aproximación analítica ampliamente aceptada y utilizada para describir la estructura de velocidades de un tornado es el modelo de Vórtice Rankine (Huang et al., 2016). Este modelo idealiza el tornado dividiéndolo en dos regiones distintas, definidas por la magnitud de su velocidad tangencial.

Región interna (Núcleo del vortice) : dentro del radio del nucleo ($r \leq r_{\max}$), el flujo se comporta como un vórtice forzado, rotando como un cuerpo sólido. En esta región, la velocidad tangencial aumenta linealmente desde cero en el centro hasta su valor máximo en el borde del núcleo. La magnitud de la velocidad se describe por le Ecuación 5.1

$$V_t(r) = V_{\max} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right) \quad \text{para } r \leq r_{\max} \quad (5.1)$$

Región externa : fuera del núcleo ($r > r_{\max}$), el flujo se comporta como un vórtice libre, donde se conserva el momento angular. En esta región, la velocidad tangencial disminuye de forma inversamente proporcional a la distancia desde el centro del vórtice, como se describe en la Ecuación 5.2

$$V_t(r) = V_{\max} \left(\frac{r_{\max}}{r} \right) \quad \text{para } r > r_{\max} \quad (5.2)$$

Donde las variables son:

- $V_t(r)$: Magnitud de la velocidad tangencial a una distancia radial r del centro del vórtice.
- $V_{\max}$: Magnitud de la velocidad tangencial máxima del tornado.
- r : Distancia radial desde el centro del vórtice.
- $r_{\max}$: Radio del núcleo del vórtice, donde se alcanza la velocidad $V_{\max}$.

Las ecuaciones del Vórtice de Rankine describen la magnitud de la velocidad de rotación. Para implementar este modelo como una condición de borde transitoria en ANSYS, es necesario convertir esta magnitud en un vector de velocidad cartesiano $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ en cada punto de la entrada y en cada instante de tiempo. El sistema de coordenadas de la simulación define el suelo como el plano xy y la altura como el eje z. El centro del tornado (x_c, y_c) , se mueve a una velocidad de traslación constante V_{trans} a lo largo del eje X. Su posición en el tiempo t se define en la Ecuación 5.3, además se mueve el tornado a $y_c=50$, para que así la estructura que se encuentra en el origen, le impacte la velocidad tangencial máxima que es al borde del tornado.

$$x_c(t) = X_{\text{start}} + V_{\text{trans}} \cdot t \quad , \quad y_c = 50 \quad (5.3)$$

Para cualquier punto (x, y) en la frontera de entrada, la distancia radial r al centro del tornado se calcula en el plano XY mediante la Ecuación 5.4.

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (5.4)$$

Con el valor de r , se calcula la magnitud de la velocidad tangencial, $V_{\text{tangencial}}$, utilizando las Ecuaciones 5.1 y 5.2. Posteriormente, esta magnitud se descompone en sus componentes cartesianos $(v_{x,\text{rot}}, v_{y,\text{rot}})$ mediante transformaciones trigonométricas, donde el ángulo θ se define como $\theta = \text{atan2}(y - y_c, x - x_c)$.

$$v_{x,\text{rot}} = -V_t \sin(\theta) \quad (5.5)$$

$$v_{y,\text{rot}} = V_t \cos(\theta) \quad (5.6)$$

Finalmente, se añade la componente de traslación para obtener el vector de velocidad total impuesto en el *inlet* . Se asume que la componente vertical en la entrada es nula

$$\vec{v}_{\text{inlet}}(x, y, t) = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x,\text{rot}} + V_{\text{trans}} \\ v_{y,\text{rot}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Adicionalmente, se implementó un factor de rampa para asegurar la estabilidad numérica, el cual incrementa gradualmente la magnitud de las velocidades impuestas desde cero hasta su valor máximo durante los 3 primeros segundos del cálculo.

Se establecieron los parametros del tornado en base a lo ocurrido el 25 de mayo del 2025, en Puerto Varas, para la velocidad de traslacion, el nucleo del tornado, ya que este fue categorizado como EF1 y la modelación se basara en velocidades maximas de EF0 a EF2, por lo tanto encontramos pertinente ocupar estos datos. Los parametros se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros de entrada para el tornado.Fuente:Dirección Meteorológica de Chile (2025)

Parámetro	Símbolo	Valor
Radio del núcleo	Radionucleo	50 [m]
Velocidad de traslación	VTraslacion	22,22 [m/s]

Tabla 5.2: Velocidades tangenciales máximas por categoría de tornado.

Escala EF	Vmax [m/s]
EF0	38,06
EF1	49,17
EF2	60,28

5.1.2. Geometría volumen de control

En primer lugar, para el bloque A1 *Geometry*, es relevante establecer un volumen de control que delimita el espacio por donde se moverá el tornado, la correcta elección de este dominio es fundamental para obtener resultados concluyentes.

Dada la limitada literatura sobre la modelación de tornados mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), se realizó un análisis iterativo para determinar la configuración geométrica y de mallado más adecuada para el volumen de control. El objetivo fue obtener una representación realista del fenómeno, caracterizada por altas velocidades a baja altura y un desarrollo coherente del vórtice a lo largo de su trayectoria. A continuación, se describen los casos de estudio evaluados y las decisiones tomadas en base a los resultados obtenidos.

Inicialmente, se modeló un volumen de control cilíndrico de 250 [m] de diámetro y 150 [m] de altura. Se aplicó un tamaño de elemento (*Element size*) global de 8[m]. Las condiciones de borde se

definieron asignando la cara lateral curva como entrada del flujo (*inlet*), la base del suelo (*ground*) y la cara superior como salida (*outlet*).

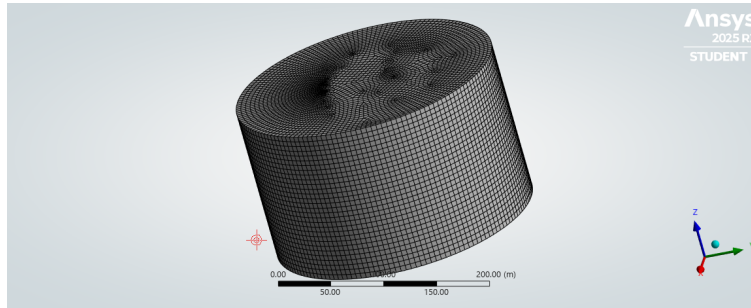


Figura 5.2: Mallado Caso 1. Fuente:Elaboración propia

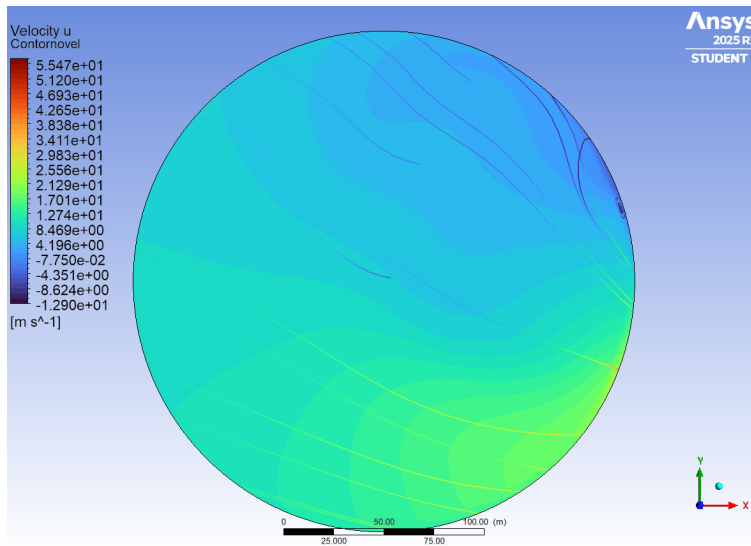


Figura 5.3: Velocidad en plano xy para Z=1. Fuente:Elaboración propia

Los resultados de esta configuración se presentan en la Figura 5.3. Como se puede observar, el núcleo del vórtice tienden a adherirse a la frontera de entrada, sin desarrollar una trayectoria clara a través del dominio. Se concluyó que definir toda la superficie lateral como *inlet* impide que el vórtice se separe de la frontera y encuentre una salida definida, lo que resulta en un comportamiento poco representativo de la realidad física.

Para solucionar las limitaciones, se optó por un volumen de control tipo “túnel de viento” utilizando un paralelepípedo de 400[m] (largo en x), 250 [m] (ancho en y) y 150[m] (alto en z). La trayectoria del tornado se definió a lo largo del eje x, centrada en $y=0$. Las condiciones de borde se establecieron con la cara en $x=-200$ [m] como *inlet*, la cara opuesta en $x=200$ [m] como *outlet*, y el resto de las caras (laterales y superior) como paredes *wall*, al igual que el suelo.

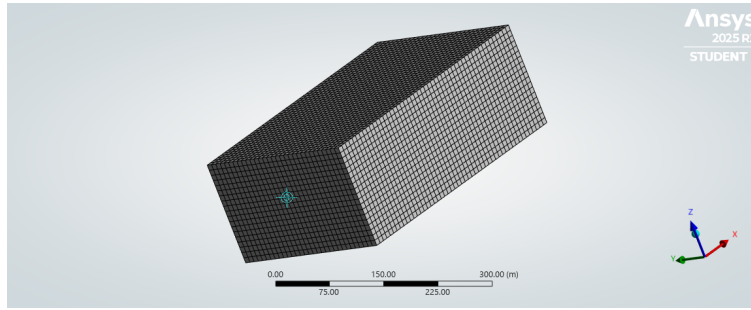


Figura 5.4: Mallado Caso 2. Fuente:Elaboración propia

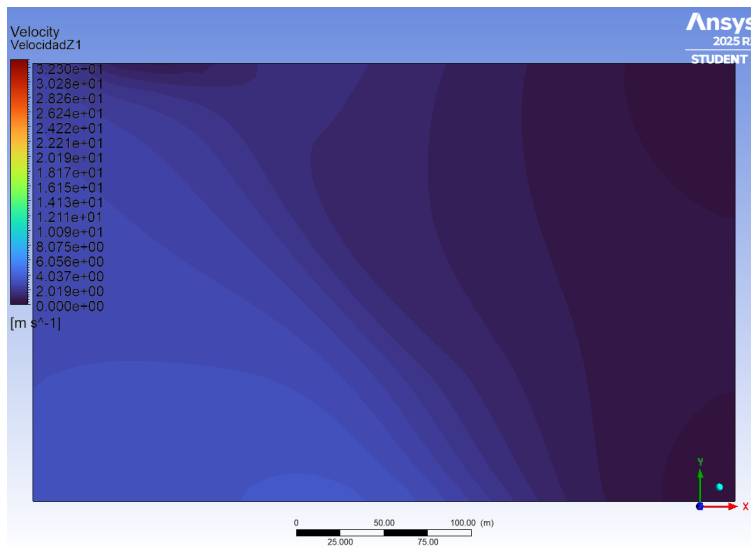


Figura 5.5: Velocidad en plano xy para $z=1$. Fuente:Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 5.5, si bien la trayectoria de entrada y salida del tornado quedó mejor definida, el vórtice seguía presentando una fuerte adhesión a una de las fronteras laterales. Este comportamiento se atribuyó a la interacción del flujo rotacional con la condición de borde de pared (*wall*), que introduce efectos de viscosidad no deseados en los límites del dominio.

A partir del análisis anterior, se realizaron dos modificaciones para un correcto desarrollo del tornado por la zona central de nuestro volumen de control. Primero, se aumentó el ancho del dominio en la dirección y de 250[m] a 450[m], proporcionando así una mayor distancia entre el núcleo del tornado (con un radio de 50[m]) y las fronteras laterales. Segundo, la condición de borde de las caras laterales y superior se cambió a *symmetry*, la cual representa de mejor manera un dominio abierto y minimiza los efectos de frontera.

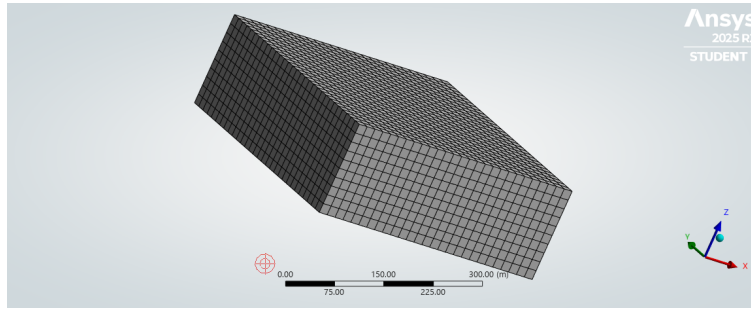


Figura 5.6: Mallado Caso 3. Fuente:Elaboración propia

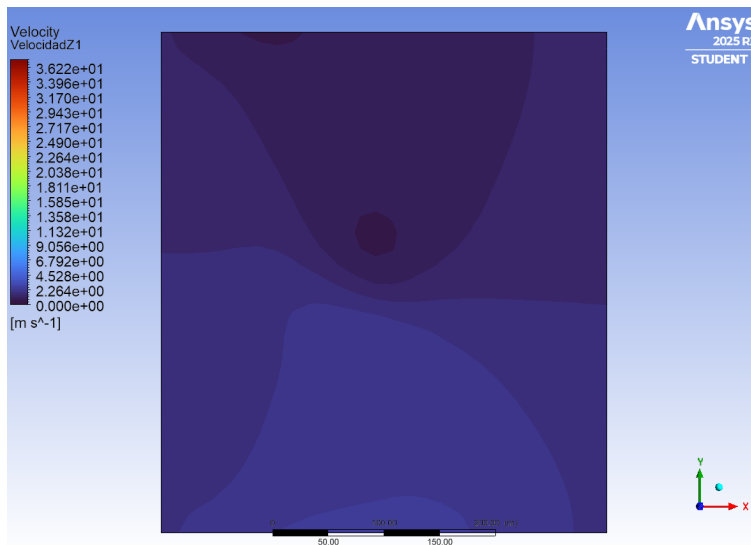


Figura 5.7: Velocidad en plano xy para $z=1$. Fuente:Elaboración propia

Los resultados, visibles en la Figura 5.7, demostraron una mejora significativa. El vórtice se desarrolló de forma más simétrica y su trayectoria transcurrió por el centro del dominio, desacoplado de las fronteras laterales. Sin embargo, se detectó un nuevo problema: debido al efecto de la capa límite en el suelo y a una malla relativamente gruesa (elementos de 8 [m]), las velocidades del viento a baja altura ($z < 10$ [m]) eran considerablemente menores a las esperadas. Dado que las estructuras a analizar están en ese rango, es de crucial importancia que las velocidades máximas se representen correctamente en esta región.

Para resolver adecuadamente la capa límite, se realizó una última optimización en la malla del dominio. Se aplicó un refinamiento de malla en la superficie del suelo y se introdujo una capa de *Inflation*. Esta técnica genera una serie de capas de elementos prismáticos muy delgados que crecen verticalmente desde el suelo, permitiendo al solver capturar con mayor precisión el fuerte gradiente de velocidad que ocurre cerca de la superficie (desde 0 [m/s] en $z=0$ hasta la velocidad del flujo libre).

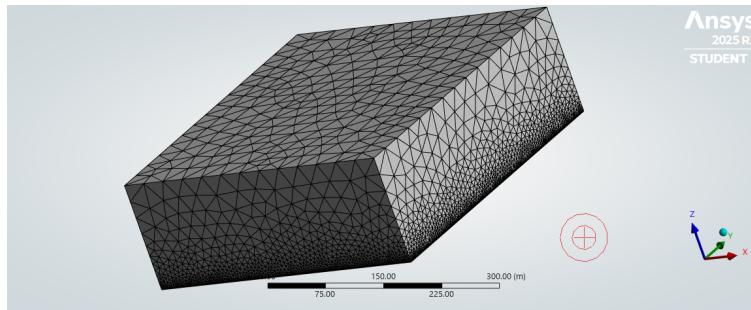


Figura 5.8: Mallado Caso 4. Fuente:Elaboración propia

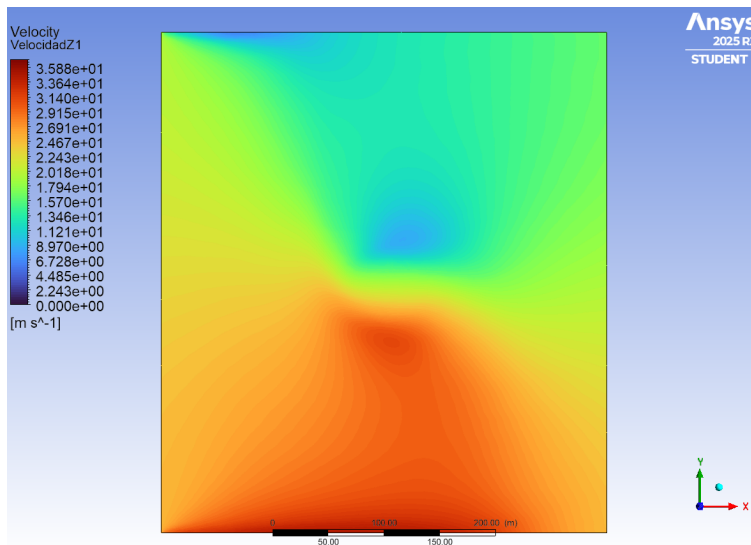


Figura 5.9: Velocidad en plano xy para $z=1$. Fuente:Elaboración propia

Como se evidencia en la Figura 5.9, esta configuración logró el objetivo deseado, se alcanzaron las velocidades cercanas a la máxima en alturas bajas, manteniendo al mismo tiempo una trayectoria estable y centrada del vórtice. Por consiguiente, se determinó que esta geometría y la estrategia de mallado son las más óptimas para proceder con el análisis de la interacción del tornado con las estructuras típicas del sur de Chile.

5.2. Definición de Casos de Estudio

Las tres estructuras se encuentran orientadas de tal forma que el tornado impacta por la cara lateral de cada edificación.

5.2.1. Caso 1: Vivienda de un piso

El primer caso de estudio consiste en una vivienda de un piso con dimensiones de 6,1 [m] de largo en el eje x, 9,4 [m] de ancho en el eje y, y una altura de 3,5[m] hasta la cumbrera en el eje z.

La estructura se encuentra ubicada en el origen de coordenadas (0,0,0), coincidiendo con el centro del volumen de control definido para el análisis.

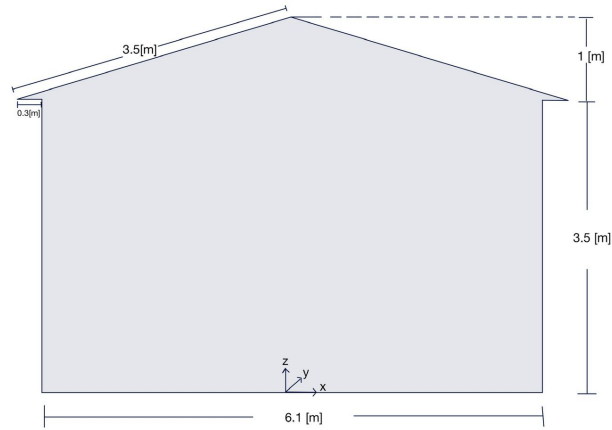


Figura 5.10: Geometría casa 1 piso. Fuente:Elaboración propia

5.2.2. Caso 2: Vivienda de dos pisos

Para este caso, la vivienda contempla las mismas medidas de planta que en el caso 1, pero la altura se duplica con un valor en el eje z de 7 [m]. Esta, al igual que la anterior, se encuentra centrada en el origen, tal como se visualiza en la Figura 5.11.

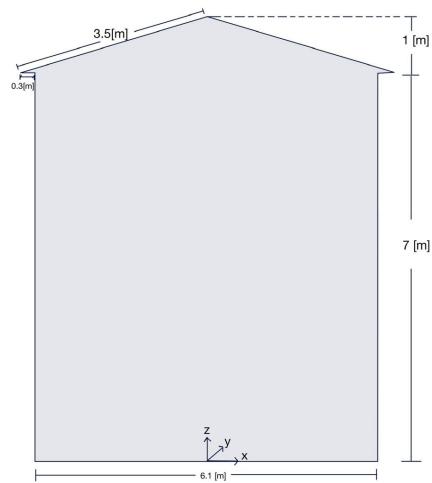


Figura 5.11: Geometría casa 2 pisos Fuente:Elaboración propia

5.2.3. Caso 3: Galpón industrial

El galpón industrial tiene dimensiones en el eje x de 38 [m], en el eje y 78[m] y en altura 8.5 [m] hasta antes de la cumbrera con 3 metros más hasta la cumbrera. Al igual se encuentra centrado, coincidiendo con el centro del volumen de control.

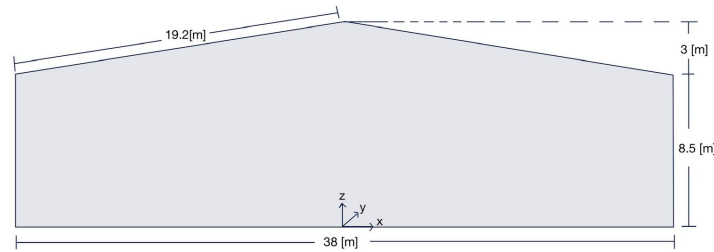


Figura 5.12: Geometría galpón. Fuente Elaboración propia

5.3. Modelación estructural FSI

Una vez resuelto el campo de flujo, se procedió a la configuración del análisis estructural mediante un acoplamiento unidireccional.

5.3.1. Geometría

Para representar el comportamiento de las estructuras de una manera más fidedigna, se optó por simplificar los volúmenes sólidos a geometrías de superficie (*Shells*). Esto nos permitió asignar espesores reales de tabiquería (0,1 [m]) y láminas de acero (0,003[m]) sin incurrir en costos computacionales altos. Además, se capturaron los esfuerzos de falla de manera más precisa, ya que con cuerpos sólidos gruesos no se visualizarían las deformaciones reales.

5.3.2. Materiales

Para los modelos de vivienda de uno y dos pisos, se ha seleccionado la madera de Pino Radiata Grado G2. Esta elección se basa en que en el sur de Chile el material de construcción típico en las casa es madera. La clasificación G2 corresponde a una madera de uso estructural con propiedades mecánicas certificadas bajo la norma NCh1207 (Instituto Nacional de Normalización, 2005). Para efectos de la modelación por elementos finitos, se ha asumido un comportamiento elástico isotrópico como simplificación del comportamiento ortotrópico real de la madera. Para el galpón industrial,

se asignó Acero Estructural grado A36. En el contexto de construcciones industriales, el acero es el material de preferencia debido a su alta ductilidad y capacidad resistente.

Las propiedades se detallan en la Tabla 5.3

Tabla 5.3: Propiedades mecánicas de los materiales asignados según normativa vigente.

Propiedad	Símbolo	Pino Radiata (G2)	Acero (A36)
Densidad (kg/m ³)	ρ	480	7.850
Módulo de Young (Pa)	E	$9,0 \times 10^9$	$2,0 \times 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	ν	0,30	0,30

Para el caso del Pino Radiata, se ingresó manualmente en la base de datos del software, para el acero se utilizó el material configurado por defecto en el software.

5.3.3. Caso 4: Normativa NCh432of2025

Para la determinación de las solicitaciones de viento en las estructuras descritas anteriormente, se aplicó el procedimiento direccional establecido en el Capítulo 6 de la norma chilena NCh432 (Instituto Nacional de Normalización, 2025). Este método permite segregar las presiones en cada cara de la edificación, lo que facilita su implementación en el modelo de simulación de interacción fluido-estructura (FSI). La presión de velocidad (q_h) representa la energía cinética del viento transformada en presión estática, se determina mediante la Ecuación 5.8 localizada en la Sección 5.8.

$$q_h = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_e \cdot V^2 \cdot I \quad (5.8)$$

Donde:

- $V = 40$ [m/s]: Corresponde a la velocidad básica del viento para la zona sur de Chile.
- $K_z = 0,71$: Coeficiente de exposición de la presión de velocidad. Se utiliza este valor ya que se asume Exposición B y las alturas son inferiores a 10 [m].
- $K_{zt}=1,0$: Factor topográfico. Se asume un terreno llano, por lo que no existe amplificación por velocidad en colinas.
- $K_e=1,0$: Factor de elevación del suelo. Se permite tomar el valor para todas las elevaciones.
- $I=1,0$: Factor de importancia. Se asigna la categoría de ocupación II para viviendas y galpones de uso común.

Sustituyendo los valores, se obtiene una presión de velocidad básica de $q_h = 696,4$ [Pa]. Vale decir que estos valores son constantes para las tres estructuras, ya que dependen de la geografía y topografía del lugar.

Para obtener la carga final que se aplica en las superficies del modelo, se utilizó la Ecuación 5.9:

$$p = q_h \cdot K_d \cdot G \cdot C_p - [q_h \cdot K_d \cdot (GC_{pi})] \quad (5.9)$$

Donde:

- $K_d=0,85$: Factor de direccionalidad del viento para el sistema principal resistente a fuerzas de viento (SPRFV)
- $G=0,85$: Factor de efecto ráfaga para estructuras rígidas
- C_p : Coeficiente de presión externa, dependiente de la geometría de la estructura y dirección del viento.
- GC_{pi} : Coeficiente de presión interna. Para un edificio clasificado como cerrado establece valores de $\pm 0,18$. Se selecciona el valor negativo (succión interna) para maximizar los esfuerzos de levantamiento en el techo y la succión en paredes laterales, siguiendo una condición conservadora de diseño.

Los valores tomados para el coeficiente de presión externa se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Coeficientes de presión externa (C_p) según NCh432.

Estructura	Superficie	Relación (L/B o h/L)	Ángulo (θ)	Coef. C_p
Viviendas (1 y 2P)	Muro Barlovento	—	—	+0,80
	Muro Sotavento	0,65	—	-0,50
	Muro Lateral	—	—	-0,70
	Techo 1 (Barlovento)	0,74	16°	-0,87
	Techo 2 (Sotavento)	0,74	16°	-0,60
Galpón Industrial	Muro Barlovento	—	—	+0,80
	Muro Sotavento	4,00	—	-0,20
	Muro Lateral	—	—	-0,70
	Techo 1 (Barlovento)	0,26	8°	-0,92
	Techo 2 (Sotavento)	0,26	8°	-0,50

A partir de lo anterior, se determinan las presiones netas para cada estructura. La carga interna constante para el caso normativo se calcula de la siguiente manera:

$$p_{int} = 696,4 \cdot 0,85 \cdot 0,18 = 106,5 [Pa] \quad (5.10)$$

Por lo tanto, los resultados para cada estructura se presentan en la Tabla 5.5. Los signos positivos indican presión hacia la estructura, mientras los signos negativos indican succión (presión hacia afuera). Los valores se ingresan de manera manual en el software para obtener los esfuerzos.

Tabla 5.5: Presiones de diseño normativo calculadas para ingreso en ANSYS [Pa].

Superficie	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Frente (Barlovento)	509	509	509
Atrás (Sotavento)	-358	-358	-358
Lados (Laterales)	-459	-459	-459
Techo 1 (Barlovento)	-544	-544	-570
Techo 2 (Sotavento)	-408	-408	-358

Para la modelación se optó por el Caso de Carga 1, el cual considera la aplicación simultánea y uniforme de las presiones máximas sobre las áreas proyectadas. Esto permite establecer una

comparación directa entre la magnitud de la presión estática uniforme y la presión dinámica del tornado. Este enfoque garantiza que las diferencias en los esfuerzos de Von Mises sean atribuibles a la distribución espacial de la carga y no a momentos tensores artificiales impuestos por la normativa.

6. Resultados y discusión

A partir de las simulaciones de interacción fluido-estructura (FSI), y de acuerdo con la descripción metodológica previa, se observó inicialmente que los esfuerzos resultantes ante la carga tornádica eran inferiores a los esperados. Este hallazgo motivó una revisión del modelo, en el cual se determinó que la normativa vigente considera la presión interna de la vivienda, factor que no fue incluido en la primera etapa de simulación de los tornados, dado que esta última se centró exclusivamente en la distribución de presiones en las caras externas.

La determinación de estas cargas se fundamenta en la suposición de que la estructura mantiene su integridad como edificio cerrado. La magnitud de esta presión interna (p_{int}) se calcula para cada nivel de intensidad de tornado mediante la Ecuación 6.1:

$$p_{int} = (0,613 \cdot K_z \cdot V^2) \cdot K_d \cdot (GC_{pi}) \quad (6.1)$$

Donde:

- V : Representa la velocidad tangencial máxima asociada a cada categoría (EF0, EF1 y EF2)
- $K_z=0,71$: Coeficiente de exposición que para sitios urbanos, aplicado de manera constante a las tres estructuras.
- $K_d=0,85$:Factor de direccionalidad estándar.
- $G C_{pi}=-0,18$: Coeficiente de presión interna para edificios cerrados. Se aplica con signo negativo(presión hacia el exterior), lo que equivale a la succión interna exigida por la normativa para maximizar los esfuerzos.

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6.1 y fueron aplicados manualmente en la simulación. La aplicación de estos valores sobre las superficies permite capturar el efecto de levantamiento estructural.

Tabla 6.1: Presiones internas calculadas para escenarios de tornado [Pa].

Intensidad	Vmax [m/s]	Presión Vel. (q_h)	Presión Int.
Caso 0 (EF0)	38,06	630,3	96,4
Caso 1 (EF1)	49,17	1.051,4	160,9
Caso 2 (EF2)	60,28	1.580,6	241,8

6.1. Análisis aerodinámico

Esta sección detalla las presiones obtenidas mediante el software ANSYS Fluent tras la simulación del fenómeno tornádico. Las máximas presiones de cada caso se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Comparativa de presiones máximas de succión registradas [Pa].

Estructura	EF0 (38,06 [m/s])	EF1 (49,17 [m/s])	EF2 (60,28 [m/s])	Norma (40 [m/s])
Casa 1 Piso	1.376	1.851	2.712	559
Casa 2 Pisos	491	689	1.020	559
Galpón Industrial	1.943	1.935	2.406	760

Se evidencia que los valores máximos son considerablemente superiores en los escenarios tornádicos en comparación con los normativos.

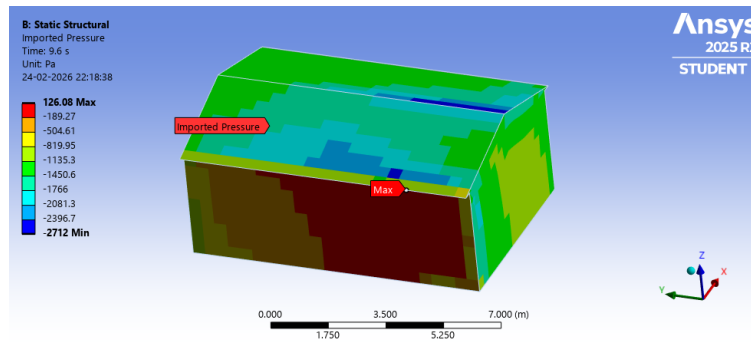


Figura 6.1: Presión caso 1, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

Los perfiles de presión importados desde el resolutor de fluidos evidencian la naturaleza altamente asimétrica y destructiva del viento horizontal. Se identifica que la sollicitación predominante es la succión (valores negativos), la cual alcanza los $-2.712[\text{Pa}]$ en el escenario EF2(Figura 6.1), duplicando la magnitud observada en el escenario EF0 (Anexo A.1). Este comportamiento es consistente con la física del Vórtice de Rankine, donde la caída de presión en el núcleo genera fuerzas de levantamiento que superan ampliamente los umbrales de diseño establecidos para vientos sinópticos.

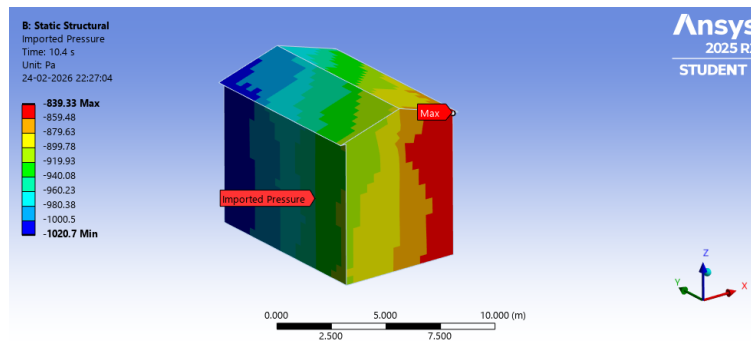


Figura 6.2: Presión caso 2, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

A diferencia del Caso 1, donde aún existía una cara con presión positiva (empuje), en la vivienda de dos niveles el tornado envuelve la estructura de tal manera que el campo de presiones es íntegramente de succión. Esto ocurre cuando la edificación se encuentra dentro del área de influencia inmediata del núcleo del vórtice, donde la caída de presión atmosférica es tan severa que supera la

presión dinámica de impacto. Según Tamura y Kareem (2013), este estado de succión total es el responsable del fenómeno de explosión estructural en edificios cerrados.

Aunque toda la vivienda se encuentra bajo succión, existe un gradiente de presión claro en el escenario EF2 (Figura 6.2): una arista experimenta $-839[\text{Pa}]$, mientras que la opuesta sufre $-1.020[\text{Pa}]$. Este diferencial genera un desequilibrio de fuerzas laterales que induce un momento torsor dinámico sobre la estructura; dada la altura de la edificación, se incrementa la sollicitación mecánica en la base .

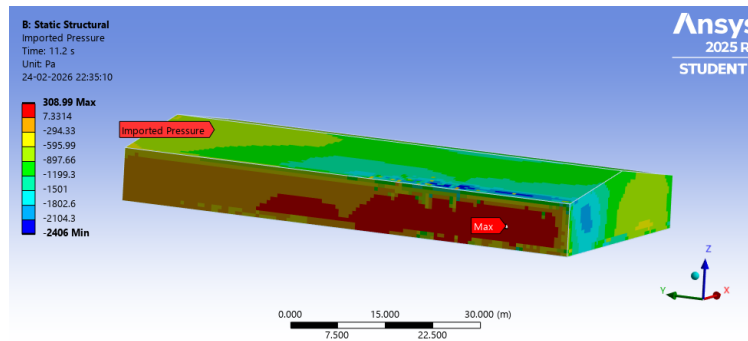


Figura 6.3: Presión caso 3, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

Para el galpón industrial, el análisis de presiones evidencia la severidad del fenómeno tornádico sobre estructuras de acero de gran superficie. Se registra un pico de succión de $-2.406[\text{Pa}]$ para la categoría EF2 (Figura 6.3), lo cual representa una sollicitación 216 % superior a la succión máxima definida por la norma NCh432 para vientos sinópticos. Esto confirma que la caída de presión en el núcleo del tornado, combinada con la aceleración del flujo sobre la techumbre de baja pendiente, genera cargas de levantamiento que invalidan los coeficientes estáticos convencionales.

Físicamente, los mapas de presión (Figura 6.3 y Anexos A.3 y A.4) muestran que la succión extrema no se limita a las aristas, sino que se extiende sobre grandes áreas del vano central.

6.2. Respuesta estructural

A partir de las simulaciones que integran las presiones tornádicas y las presiones internas, se presentan los resultados consolidados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Esfuerzos máximos de Von Mises para cada escenario de carga $[\text{Pa}]$.

Estructura	EF0 (38,06 [m/s])	EF1 (49,17 [m/s])	EF2 (60,28 [m/s])	Norma (40 [m/s])
Casa 1 Piso	96.220	102.701	201.340	328.570
Casa 2 Pisos	862.360	1.319.500	1.975.310	2.548.000
Galpón Acero	$2,9282 \cdot 10^9$	$4,2323 \cdot 10^9$	$6,1664 \cdot 10^9$	$8,1027 \cdot 10^9$

Los resultados se expresan mediante el esfuerzo de Von Mises, parámetro escalar que permite la comparación con los límites de fluencia del material para determinar posibles fallas. Asimismo, se evalúa si los valores normativos cumplen con el criterio de diseño (Ecuación 6.2) que establece la seguridad estructural. Para efectos de esta investigación, el análisis se centra en el límite de fluencia (σ_y), omitiendo el factor de seguridad por no ser el foco de estudio.

$$\sigma_v \leq \sigma_{admissible} \quad (6.2)$$

Los límites de fluencia considerados son :

- Pino Radiada G2: $\sigma_y = 65[MPa]$
- Acero A36: $\sigma_y = 250[MPa]$

Para realizar un análisis mas exhaustivo, resulta necesario visualizar el punto crítico donde se alcanza el valor máximo

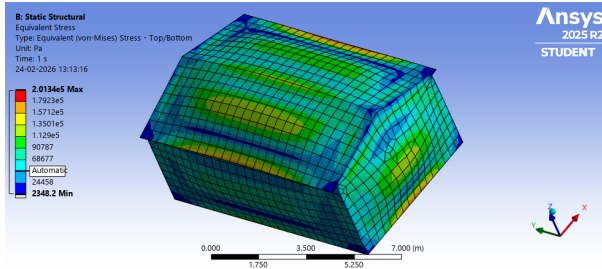


Figura 6.4: Esfuerzo caso 1, categoría EF2.

Fuente: Elaboración propia

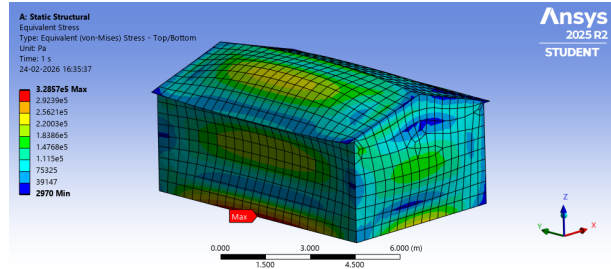


Figura 6.5: Esfuerzo caso 1, según normativa.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del modelo FSI para el Caso 1 revelan que el punto más crítico se localiza en la cara lateral (6.1[m]), orientada paralelamente a la trayectoria de traslación del tornado (Figura 6.4 y Anexos B.1 y B.2). Esto representa una desviación respecto al comportamiento esperado bajo vientos sinópticos, donde la fachada de barlovento (9.4[m]) suele concentrar las mayores solicitaciones. La justificación de este fenómeno reside en el desprendimiento del flujo y la formación de zonas de succión extrema en las caras laterales.

De acuerdo Tamura y Kareem (2013), el aire al impactar la cara de barlovento experimenta una aceleración convectiva al rodear las aristas verticales, lo que induce una caída de presión local. En el escenario EF2, esta succión alcanzó los $-2.712[Pa]$, superando en un orden de magnitud a la presión positiva de impacto frontal ($126[Pa]$). En consecuencia, la pared de 6.1[m] experimenta una carga neta de arranque hacia el exterior, lo cual genera momentos flectores críticos en la interfaz con la fundación. En contraste, las normativa actual (Figura 6.5) sitúa el punto máximo en la pared barlovento, lo cual no es coherente con los hallazgos de la simulación.

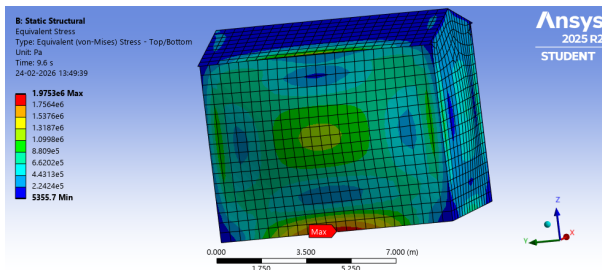


Figura 6.6: Esfuerzo caso 2, categoría EF2.

Fuente: Elaboración propia

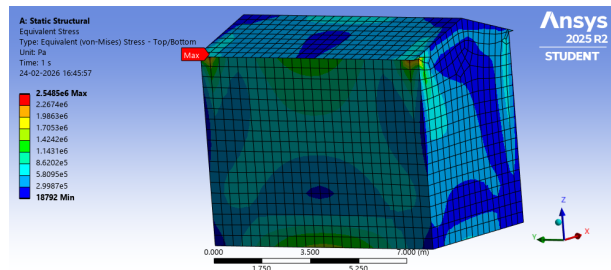


Figura 6.7: Esfuerzo caso 2, según normativa.

Fuente: Elaboración propia

En el caso 2, se observa una transición en la ubicación del nodo crítico. En el escenario de la NCh432 (Figura 6.7), el esfuerzo máximo de Von Mises se concentra en la interfaz techo-pared, lo cual es consistente con la teoría de diseño sinóptico. No obstante, en los escenarios de tornado (Figura 6.6 y Anexos B.3 y B.4), el esfuerzo máximo se localiza en el soporte fijo basal. Esta diferencia se fundamenta en la intensificación de las velocidades tangenciales en niveles próximos a la superficie, fenómeno característico del régimen tornádico que diverge del perfil logarítmico establecido en la normativa chilena. Investigaciones experimentales han demostrado que el flujo de entrada es más potente y las velocidades críticas se localizan en los primeros 10[m] de altura (Haan et al., 2008).

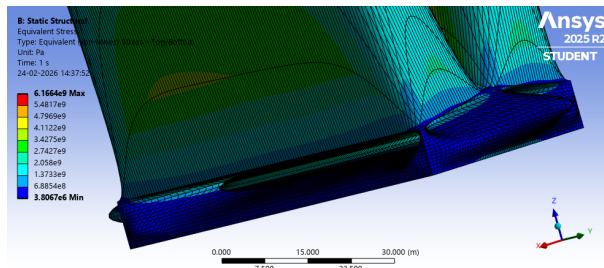


Figura 6.8: Esfuerzo caso 3, categoría EF2.

Fuente: Elaboración propia

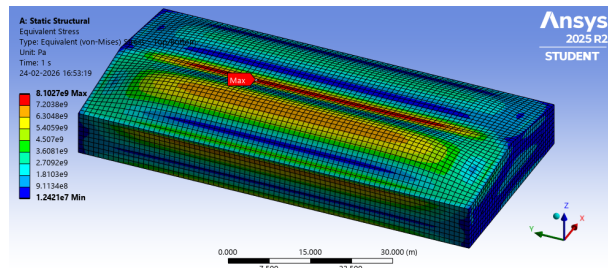


Figura 6.9: Esfuerzo caso 3, según normativa.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el galpón industrial revela una condición de colapso teórico, con valores de Von Mises en el orden de los gigapascales. Este fenómeno se explica mediante la teoría de placas delgadas: ante una luz transversal de 38[m] y un espesor de 3[mm], la relación entre ambas magnitudes supera ampliamente el límite de 20, lo que anula la capacidad de la placa para resistir cargas perpendiculares. La falla está gobernada por la flexión pura del vano central, donde las tensiones exceden en más de 20 veces el límite de fluencia del acero A36, provocando una inestabilidad elástica.

6.3. Análisis de deformaciones

Tabla 6.4: Deformaciones totales máximas por escenario de carga [m].

Estructura	EF0 (38,06 [m/s])	EF1 (49,17 [m/s])	EF2 (60,28 [m/s])	Norma (40 [m/s])
Vivienda 1 Nivel	0,00015	0,00020	0,00033	0,00061
Vivienda 2 Niveles	0,00374	0,00572	0,00856	0,01902
Galpón Industrial	174,12*	230,82*	321,88*	674,28*

Nota: Los valores con asterisco () indican una inestabilidad elástica (colapso teórico) de la cáscara.

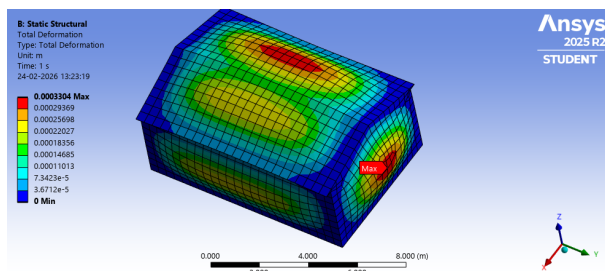


Figura 6.10: Deformación caso 1, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

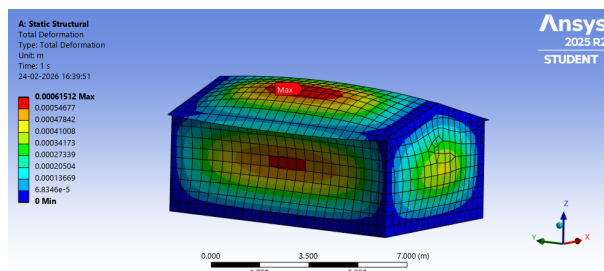


Figura 6.11: Deformación caso 1, según normativa. Fuente: Elaboración propia

En el Caso 1, la deformación máxima ocurre en la cara frontal (Figura 6.10), coincidiendo con el punto de mayor esfuerzo. Aunque la magnitud en EF2 (0,33[mm]) es inferior al caso normativo (0,61[mm]), la localización evidencia que el tornado solicita la estructura mediante un mecanismo de flexión que pone a prueba la estabilidad de la cara corta. En cambio, la normativa (Figura 6.11) muestra la deformación máxima en el techo, comportamiento derivado de la aplicación uniforme y estática de los coeficientes de succión.

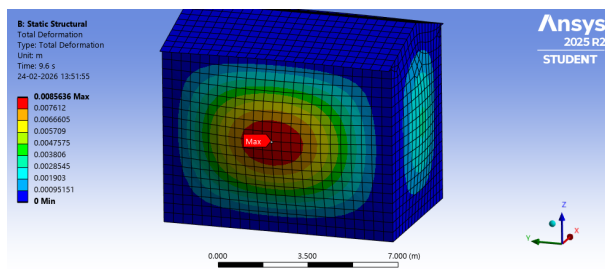


Figura 6.12: Deformación caso 2, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

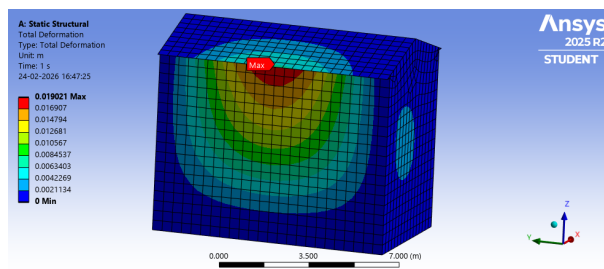


Figura 6.13: Deformación caso 2, según normativa. Fuente: Elaboración propia

La vivienda de dos niveles presenta desplazamientos que superan en un orden de magnitud a los del Caso 1, evidenciando una mayor sensibilidad en la rigidez lateral. En escenarios tornádicos, la deformación se concentra en el centro del muro barlovento como se ve en la Figura 6.12, respondiendo a la presión del impacto del vórtice. Por el contrario, la NCh432 induce una deformación crítica de 19[mm] (Figura 6.13) en la unión superior muro-techo.

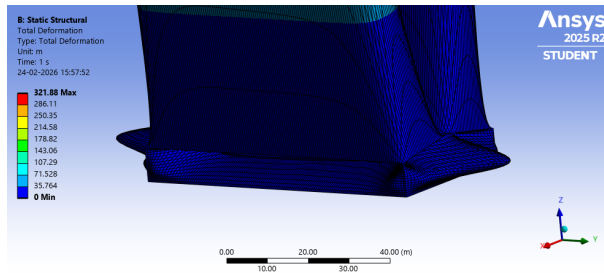


Figura 6.14: Deformación caso 3, categoría EF2. Fuente: Elaboración propia

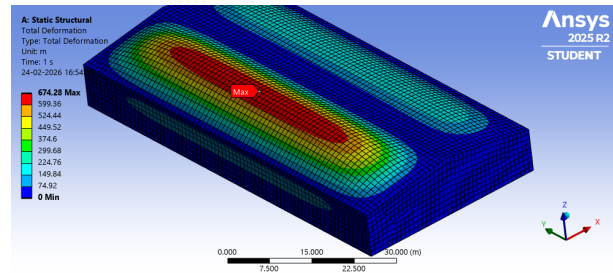


Figura 6.15: Deformación caso 3, según normativa. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la estructura industrial, los resultados indican un colapso inminente. Las deflexiones, que oscilan entre 174.12 [m] en el escenario EF0 (Anexo C.5) a 674.3 [m] en la normativa (Figura 6.15), exceden las dimensiones físicas de la edificación. Se concluye que el revestimiento metálico entra en un régimen de grandes deformaciones e inestabilidad elástica al carecer de apoyos secundarios (costaneras) en el modelo, lo cual invalida cualquier capacidad de resistencia estructural bajo estas cargas.

7. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la vivienda de un nivel presenta una respuesta estructural rígida y segura bajo los umbrales de resistencia del Pino Radiata G2. No obstante, se identifica una divergencia en la localización de las solicitaciones, mientras la normativa NCh432 sitúa el esfuerzo máximo en la pared barlovento y la techumbre debido a la aplicación sincrónica de cargas, la simulación de interacción fluido-estructura (FSI) demuestra que el fenómeno rotacional del tornado penaliza las fachadas laterales mediante succiones extremas de hasta $-2.712[\text{Pa}]$. Este hallazgo resulta de especial relevancia, dado que la normativa vigente exime a este tipo de estructuras de análisis torsionales. Los resultados sugieren que dicha exención técnica podría representar una subestimación del riesgo ante eventos tornádicos, donde el desprendimiento del flujo en las aristas laterales genera momentos basales que alteran el patrón de diseño.

En el caso de la vivienda de dos niveles, se determina que la esbeltez estructural incrementa significativamente la vulnerabilidad ante vientos rotacionales, registrándose desplazamientos hasta 25 veces superiores a los de la vivienda de un nivel para la categoría EF2. El análisis de presiones revela un comportamiento de succión total sobre la estructura, lo que valida la teoría de explosión estructural por presurización interna neta descrita por Tamura y Kareem (2013). Se observa que la mayor reacción mecánica ocurre en el soporte basal debido al momento de vuelco inducido por las altas velocidades tangenciales en la superficie del vórtice. Este comportamiento contrasta con el modelo normativo, cuya carga uniforme prioriza la falla en la unión techo-pared. Por lo tanto, se establece que para viviendas de múltiples niveles en el sur de Chile, la estabilidad global no depende exclusivamente del levantamiento de la techumbre, sino de la capacidad de cizallamiento de los anclajes inferiores ante cargas laterales no uniformes.

El análisis del galpón industrial evidencia un estado de colapso teórico inminente bajo todas las categorías de tornado evaluadas. Los esfuerzos de Von Mises en el orden de los gigapascuales y las deformaciones métricas masivas que indican que la envolvente metálica de 3 [mm] es insuficiente para resistir, de forma aislada, succiones que superan en un 216 % a los máximos normativos. Se concluye que la falla está gobernada por la flexión pura del vano central, donde la inestabilidad elástica de la cáscara imposibilita el mantenimiento de la configuración geométrica. Este resultado resalta la insuficiencia del revestimiento metálico para actuar como elemento resistente sin la participación de un sistema de costaneras y arriostramientos secundarios. La investigación demuestra que, ante un tornado EF2, el revestimiento perimetral sufriría un desgarró catastrófico antes de transferir la carga a los marcos principales, lo que invalida los coeficientes estáticos de diseño para estructuras de grandes luces.

De manera global, se establece que la norma NCh432 funciona como una envolvente de seguridad conservadora para la integridad del material, superando en esfuerzos globales a un tornado EF2 debido a la simplificación de la carga simultánea en toda el área tributaria. Sin embargo, la normativa tiende a subestimar los picos de presión localizados y los efectos dinámicos de succión vertical propios de los vientos rotacionales. Como recomendación técnica, se propone la implementación de anclajes mecánicos de alta resistencia, conocidos internacionalmente como *hurricane ties* usados en Estados Unidos y además el aumento del diámetro en los pernos de fijación para estructuras industriales en zonas de riesgo. Este requerimiento se fundamenta en que la integridad de las viviendas estudiadas no está condicionada por la sección transversal de sus elementos de madera, dado que los

esfuerzos máximos resultaron significativamente inferiores al límite de fluencia del Pino Radiata. Por consiguiente, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en el diseño de conexiones clavadas y apernadas, puesto que la vulnerabilidad real radica en la incapacidad de las uniones para garantizar la trayectoria de carga continua que el Sistema Principal Resistente de Fuerza de Viento (SPRFV) requiere.

Dado que la ocurrencia de tornados en el centro-sur de Chile ha dejado de ser un evento fortuito, resulta imperativo transitar desde el claveteado convencional hacia sistemas de conectores de acero galvanizado certificados. Se propone que la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) adopte criterios de diseño basados en la norma ASCE 7-22 (Federal Emergency Management Agency, 2023), la cual establece que la resiliencia habitacional depende de garantizar un camino de carga continuo que vincule mecánicamente la techumbre con las fundaciones. Esto obligaría a que las viviendas en zonas vulnerables cuenten con anclajes capaces de resistir los gradientes de succión localizados identificados en este estudio.

Finalmente, se reconoce como la principal limitación de esta investigación la escasez de antecedentes técnicos y estaciones de medición en Chile que permitan caracterizar con precisión el perfil de velocidades de tornados locales. La modelación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), aunque robusta, se ve limitada por el alto costo computacional de resolver la capa límite en entornos urbanos complejos, lo que obliga a realizar simplificaciones geométricas en los elementos secundarios de soporte. Por último, la falta de estudios previos a nivel nacional sobre la respuesta dinámica de viviendas ante tornados restringe la validación empírica de los resultados, subrayando la necesidad de fomentar esta línea de investigación en la academia.

Referencias

- Aránguiz, R., Saez, B., Gutiérrez, G., Oyarzo-Vera, C., Nuñez, E., Quiñones, C., Bobadilla, R., & Bull, M. T. (2020). Damage assessment of the May 31st, 2019, Talcahuano tornado, Chile. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101853. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101853>
- Caballero, V. (2024). *Estacionalidad de ambientes favorables para la formación de tornados en la zona centro-sur de Chile* [Tesis de maestría, Universidad de Chile] [Memoria para optar al título de Meteorólogo]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/202381>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2025). *Informe sobre el Análisis Técnico del Tornado que afectó a la ciudad de Puerto Varas el pasado 25 de mayo de 2025* (inf. téc.) (Informe final). Dirección Meteorológica de Chile. Santiago, Chile. <https://www.meteochile.gob.cl/>
- Federal Emergency Management Agency. (2023). *Design Guide for New Tornado Load Requirements in ASCE 7-22*. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_asce-7-22-tornado-loads-design-guide_012023.pdf
- Haan, F. L., Sarkar, P. P., & Gallus, W. A. (2008). Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. *Engineering Structures*, 30(4), 1146-1159. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.010>
- Huang, Z., Fan, X., Cai, L., & Shi, S. Q. (2016). Tornado hazard for structural engineering. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2392-z>
- Instituto Nacional de Normalización. (2005). *NCh1207:2005 Pino Radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad*. INN. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2025). *NCh432:2025 Diseño estructural - Cargas de viento* (3ra). INN. Santiago, Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU]. (1992). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones [D.S. N.º 47, de 1992].
- National Geographic Society. (2024). *Tornadoes and the Enhanced Fujita Scale*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/tornadoes-and-enhanced-fujita-scale/>
- Tamura, Y., & Kareem, A. (Eds.). (2013). *Advanced Structural Wind Engineering* [eBook ISBN: 978-4-431-54337-4]. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54337-4>
- Van De Lindt, J., Amini, M., Standohar-Alfano, C., & Dao, T. (2012). Systematic Study of the Failure of a Light-Frame Wood Roof in a Tornado. *Buildings*, 2(4), 519-533. <https://doi.org/10.3390/buildings2040519>
- Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., Padilla, R., Abarca, R., Barahona, C., Delgado, R., & Nicora, G. (2021). The Chilean Tornado Outbreak of May 2019: Synoptic, Mesoscale, and Historical Contexts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E611-E634. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0218.1>

8. Anexos

A. Análisis aerodinámico

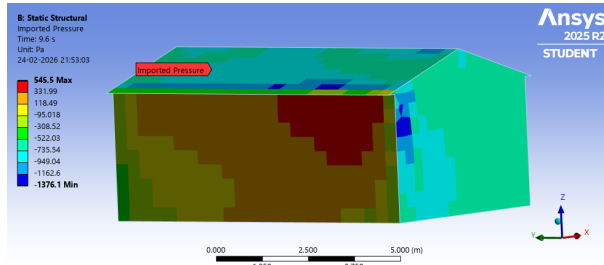


Figura A.1: Presión caso 1, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

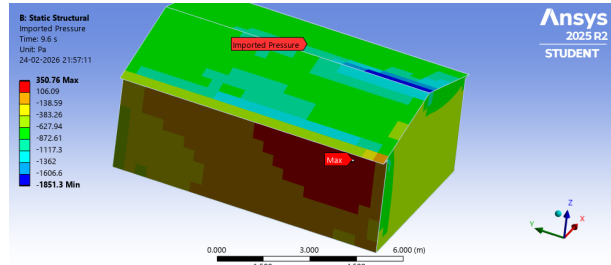


Figura A.2: Presión caso 1, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

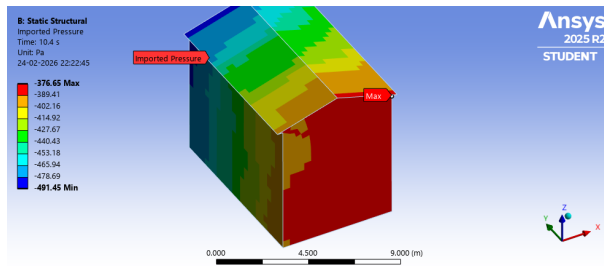


Figura A.3: Presión caso 2, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

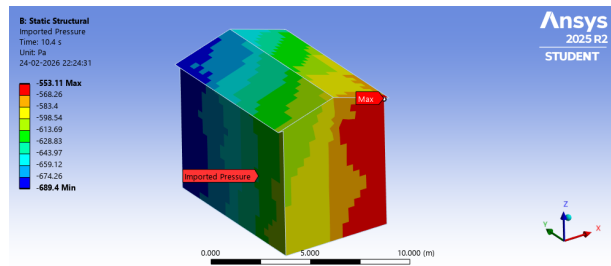


Figura A.4: Presión caso 2, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

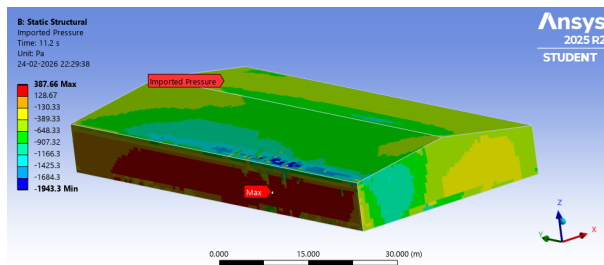


Figura A.5: Presión caso 3, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

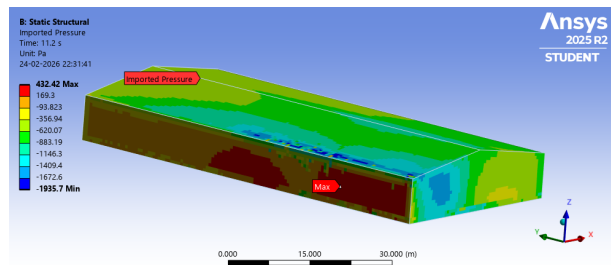


Figura A.6: Presión caso 3, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

B. Respuesta Estructural

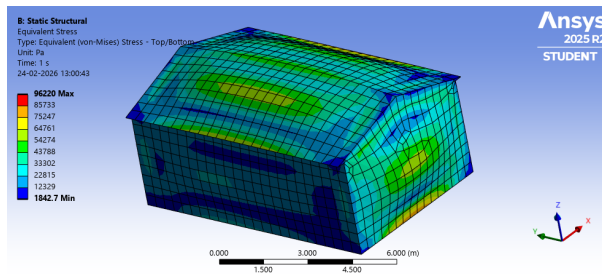


Figura B.1: Esfuerzo caso 1, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

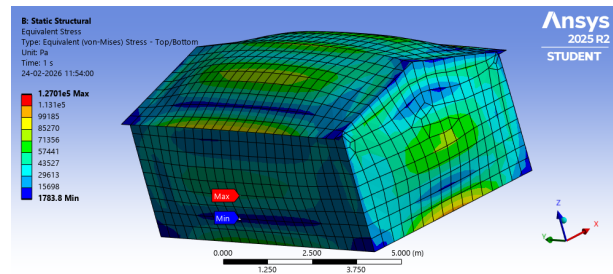


Figura B.2: Esfuerzo caso 1, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

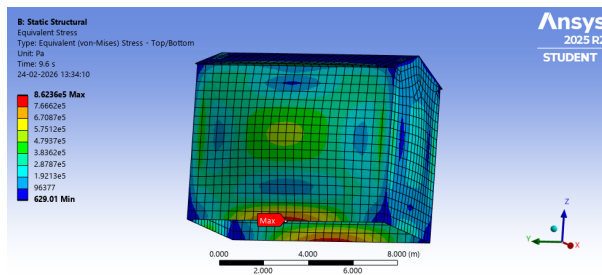


Figura B.3: Esfuerzo caso 2, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

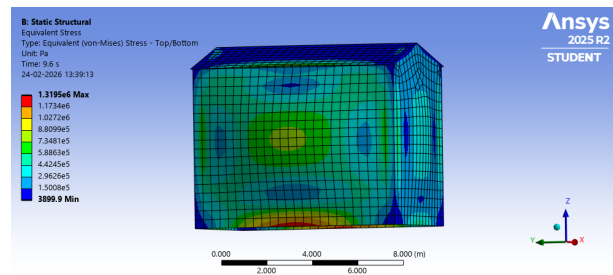


Figura B.4: Esfuerzo caso 2, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

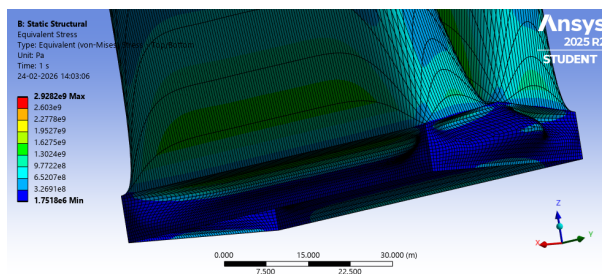


Figura B.5: Esfuerzo caso 3, categoría EF0.
Fuente: Elaboración propia

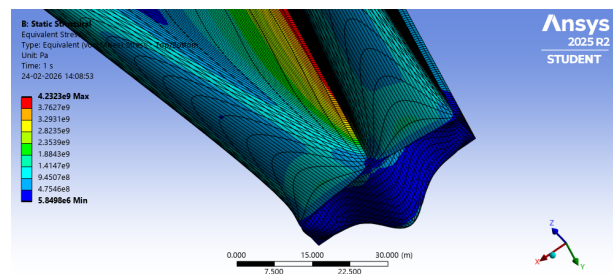


Figura B.6: Esfuerzo caso 3, categoría EF1.
Fuente: Elaboración propia

C. Deformaciones estructuras

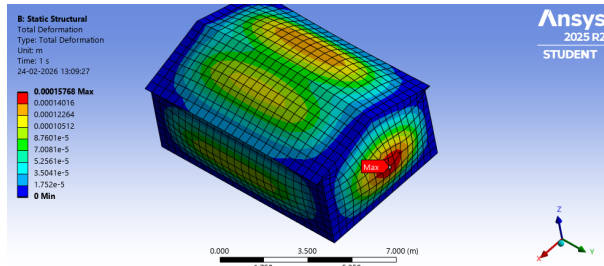


Figura C.1: Deformaciones caso 1, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia

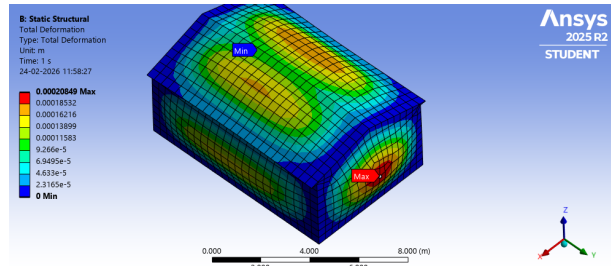


Figura C.2: Deformaciones caso 1, según normativa. Fuente: Elaboración propia

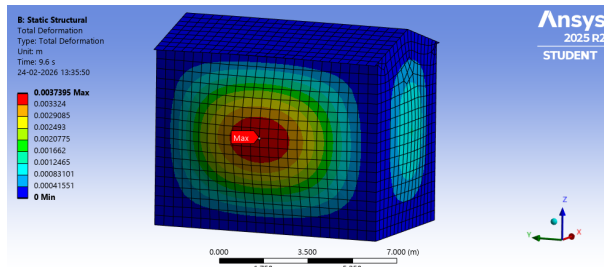


Figura C.3: Deformaciones caso 2, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia

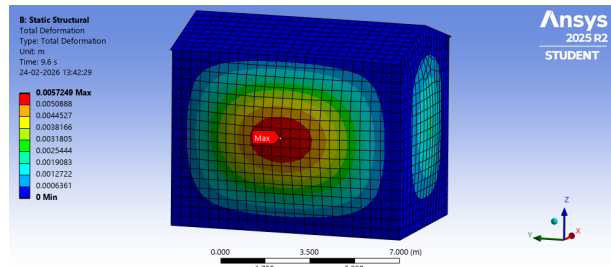


Figura C.4: Deformaciones caso 2, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia

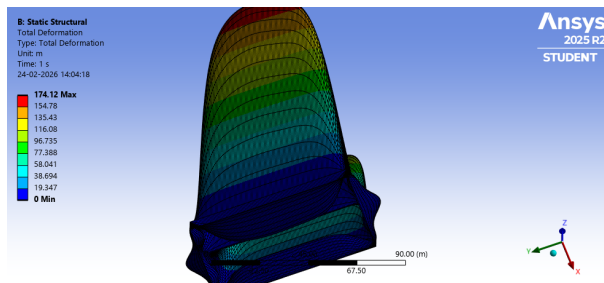


Figura C.5: Deformaciones caso 3, categoría EF0. Fuente: Elaboración propia

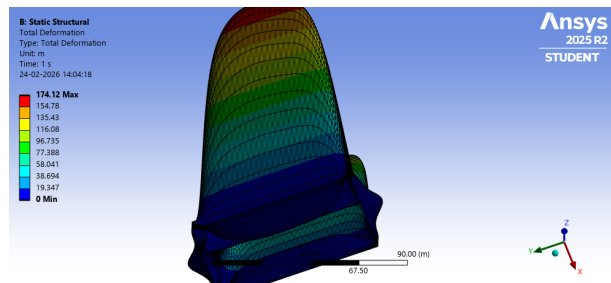


Figura C.6: Deformaciones caso 3, categoría EF1. Fuente: Elaboración propia