

Ing. Luis Enrique
Gallo González

Análisis por viento de anuncios espectaculares
unipolares con mampara desfasada

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**ANÁLISIS POR VIENTO DE ANUNCIOS ESPECTACULARES
UNIPOLARES CON MAMPARA DESFASADA**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Luis Enrique Gallo González

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Codirigido por:

Dr. Humberto Yáñez Godoy

Querétaro, Qro., junio de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Análisis por viento de anuncios espectaculares
unipolares con mampara desfasada

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Luis Enrique Gallo González

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Codirigido por:

Dr. Humberto Yáñez Godoy

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Presidente

Dr. Humberto Yáñez Godoy
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Suplente

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio de 2025
México

Para mi pequeño Luis, por ser lo más hermoso que me ha podido suceder.

AGRADECIMIENTOS

Para la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes CONAHCYT) por el apoyo económico en mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por la formación obtenida.

Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, coordinador de la Maestría con línea terminal en Estructuras por inculcar en mí el interés por la investigación y la docencia. Por revisar este trabajo y hacerme todas las correcciones pertinentes. De igual manera, le agradezco por haberme motivado a concluir satisfactoriamente este proyecto, por los oportunos consejos brindados en las etapas más complicadas de mis estudios de maestría.

Al Dr. Humberto Yáñez Godoy, del Instituto de Mecánica e Ingeniería de la Universidad de Burdeos, Francia, por integrarse al trabajo y realizar aportaciones valiosas. Le agradezco también por aceptarme en su universidad, aun cuando no se pudo completar la estancia, agradezco mucho el esfuerzo dedicado para poder llevarla a cabo.

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, por todo el conocimiento compartido en el aula durante mi estancia en el posgrado, por hacerme ver aspectos faltantes en mi trabajo.

Al Dr. Iván Fermín Arjona Catzim, profesor, amigo y guía en momentos difíciles, por apoyarme en mis inicios como docente, por todos los consejos y el apoyo brindado a mi persona. Agradezco también por la orientación brindada para poder concluir este trabajo.

A todos los compañeros del cubículo, por la compañía y amistad brindada durante estos dos años de convivencia.

A mi madre, por siempre creer en mí y mostrarme de lo que soy capaz.

A mi hermana, por siempre apoyarme.

A Lupita, por siempre creer en mí y decidir estar a mi lado.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE GENERAL	II
INDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	5
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
2. ANTECEDENTES	7
2.1. ANUNCIOS ESPECTACULARES UNIPOLARES	8
2.2. ANÁLISIS POR VIENTO	10
2.3. MÉTODO ESTÁTICO.....	13
2.4. MÉTODO DINÁMICO	17
2.5. TÚNEL DE VIENTO	22
2.6. SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	25
2.6.1. <i>Navier-Stokes</i>	26
2.7. MODOS DE FALLA Y VULNERABILIDAD.....	30
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	34
3.1. HIPÓTESIS	34
3.2. OBJETIVO GENERAL.....	34
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	34
4. METODOLOGÍA.....	35
4.1. REVISIÓN DE LA NORMATIVA VIGENTE Y EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS EÓLICOS.....	35
4.1.1. <i>Revisión de normativa vigente</i>	36
4.1.2. <i>Evaluación de las metodologías para análisis y diseño existentes</i>	36
4.1.3. <i>Cálculo de la velocidad y presión de viento</i>	36
4.2. PROPUESTA GEOMETRÍA PROPUESTA A PARTIR DE LA NORMATIVA VIGENTE.	38

4.2.1.	<i>Propuesta de dimensiones del AEU.</i>	38
4.2.2.	<i>Propuesta de secciones del tubo columna y tubo mástil.</i>	38
4.2.3.	<i>Propuesta de sección en la armadura de la mampara.</i>	38
4.3.	REALIZACIÓN DE UNA MODELACIÓN DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	38
4.3.1.	<i>Generación del modelo geométrico propuesto</i>	39
4.3.2.	<i>Aplicación de las condiciones de frontera en CFD</i>	40
4.3.3.	<i>Extracción de las presiones de viento obtenidas en CFD</i>	42
4.4.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	42
4.4.1.	<i>Obtener los elementos mecánicos mediante ambas metodologías.</i>	43
4.4.2.	<i>Revisión de diferencias en los resultados entre los obtenidos con la normativa vigente y la modelación de fluidos computacional</i>	45
4.4.3.	<i>Proponer recomendaciones para el análisis y diseño</i>	45
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1.	REVISIÓN DE LA NORMATIVA VIGENTE Y EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS EÓLICOS	46
5.1.1.	<i>Revisión de normativa vigente</i>	46
5.1.2.	<i>Evaluación de las metodologías para análisis y diseño existentes</i>	46
5.1.3.	<i>Cálculo de la velocidad y presión de viento</i>	46
5.2.	PROPUESTA GEOMETRÍA PROPUESTA A PARTIR DE LA NORMATIVA VIGENTE	51
5.2.1.	<i>Propuesta de dimensiones del AEU.</i>	51
5.2.2.	<i>Propuesta de secciones del tubo columna y tubo mástil.</i>	52
5.2.3.	<i>Propuesta de sección en la armadura de la mampara.</i>	53
5.3.	REALIZACIÓN DE UNA MODELACIÓN DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	54
5.3.1.	<i>Generación del modelo geométrico propuesto</i>	55
5.3.2.	<i>Aplicación de las condiciones de frontera en CFD</i>	56
5.3.3.	<i>Extracción de las presiones de viento obtenidas en CFD</i>	58
5.4.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	63
5.4.1.	<i>Obtener los elementos mecánicos mediante ambas metodologías.</i>	63
5.4.2.	<i>Revisión de diferencias en los resultados entre los obtenidos con la normativa vigente y la modelación de fluidos computacional</i>	68
5.4.3.	<i>Proponer recomendaciones para el análisis y diseño</i>	68
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69

7. REFERENCIAS.....	71
8. APÉNDICE.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Partes de un anuncio espectacular unipolar.	1
Figura 1.2. Efectos producidos en el AEU con mampara desfasada: a) carga aplicada sobre el anuncio y b) efecto de torsión debido a la carga excéntrica.	3
Figura 1.3. Efectos producidos en una AEU con mampara centrada: a) carga aplicada sobre el anuncio , b) flexión simple producto de la carga aplicada.	3
Figura 2.1. Comportamiento del flujo de viento en diferentes edificios de acuerdo con su geometría y las obstrucciones existentes alrededor, extraído de Rojek, (2021).....	7
Figura 2.2. Tipos de AEU: a) anuncio unipolar típico, con la mampara centrada con respecto al tubo columna, b) anuncio unipolar de interés con la mampara desfasada con respecto al tubo columna.	9
Figura 2.3. Alturas y dimensiones permisibles con base en la clasificación del anuncio, extraído de Ayuntamiento de Querétaro, (2017).	10
Figura 2.4. Registros de velocidades de viento a distintas alturas, adaptado de Meli, (2011).	11
Figura 2.5. Variación de la velocidad de viento con respecto al altura para terreno con diferentes rugosidades, adaptado de Meli, (2011).	11
Figura 2.6. Flujo de aire sobre obstáculos fijos, adaptado de Arroyo (2015).	12
Figura 2.7. Formas generales de estructuras prismáticas contempladas para análisis dinámico en donde se definen la altura de referencia para la determinación de la respuesta dinámica; a) estructuras tales como edificios, b) estructuras con masas concentradas, adaptado de NTC (2023).	19
Figura 2.8 AEU de una sola cara sometido a pruebas en túnel de viento simulando campo abierto, extraído de Zuo, et al. (2014).	23

Figura 2.9. AEU sometido a presiones de viento en campo abierto, adaptado de Smith, et al. (2014).	24
Figura 2.10. Modelo aeroelástico de un AEU con mampara desfasada en forma de “V”, extraído de Li, et al. (2018)	24
Figura 2.11. Comparativa entre la complejidad que cada método permite modelar, adaptado de (Lange, 2023).....	29
Figura 2.12. Relación entre el costo computacional y la complejidad geométrica en las diferentes simulaciones propuestas, adaptado de (Lange, 2023).....	30
Figura 2.13. Modos de falla en los anuncios espectaculares unipolares.	30
Figura 2.14. Fallas locales en los AEU: a) daños en las láminas de recubrimiento de mampara y b) deformaciones leves o graves en la armadura de la mampara. Extraído de Wen & Xie (2020).	31
Figura 2.15. Fallas globales en los AEU: a) daño en el tubo mástil ocasionando el colapso de la mampara, extraído de Obinna (2020), b) pandeo en el tubo columna, extraído de Catarino (2024) y c) colapso total producido por un fallo en el anclaje de la cimentación, extraído de Serna (2024).	32
Figura 4.1. Metodología empleada.	35
Figura 4.2. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años, extraído de (CFE, 2020).	37
Figura 4.3. Entorno del usuario para obtener la velocidad regional.....	37
Figura 4.4. Metodología empleada para obtener las presiones de viento aplicadas sobre el AEU.....	39
Figura 4.5. Entorno de usuario del módulo <i>Mesh</i> de ANSYS Workbench.....	41
Figura 4.6. Entorno de usuario del módulo <i>Results</i> de ANSYS Workbench.	41
Figura 4.7. Entorno de usuario del módulo <i>Fluent</i> de ANSYS Workbench.	42

Figura 4.8. Metodología empleada para comparar los resultados obtenidos.....	43
Figura 4.9. Ventanas de variables paramétricas de Mechanical APDL: a) dimensiones generales del AEU, b) propiedades geométricas de las secciones y c) carga distribuida sobre el anuncio.....	44
Figura 5.1. Geometría del AEU escogida.....	52
Figura 5.2. Secciones propuestas para el análisis estructural del AEU: a) sección transversal del tubo columna, b) sección transversal del tubo mástil y c) sección transversal de la armadura de la mampara.....	54
Figura 5.3. Metodología empleada para obtener las presiones de viento aplicadas sobre el AEU.....	54
Figura 5.4. Geometría del AEU exportada a ANSYS Workbench.	55
Figura 5.5. Dimensiones del recinto para la simulación de fluidos computacional.	55
Figura 5.6. Configuración del recinto: a) entrada del fluido, b) salida del fluido y c) paredes sólidas donde el fluido ejerce contacto.....	56
Figura 5.7. Anuncio espectacular mallado con un tamaño de malla igual a los 0.80 m.....	57
Figura 5.8. Recinto mallado con un tamaño de malla igual a los 0.80 m.....	57
Figura 5.9. Velocidad de diseño conFigurada para la simulación CFD.....	58
Figura 5.10. Velocidad de viento en dirección al flujo en m/s (visto en planta).....	59
Figura 5.11. Velocidad de viento en dirección al flujo en m/s (visto en sección longitudinal)	59
Figura 5.12. Presión ejercida por el viento en dirección al flujo, en Pa (visto en sección longitudinal).	60
Figura 5.13. Presión ejercida por el viento en dirección al flujo, en Pa (visto en planta). ...	60

Figura 5.14. Presión ejercida por el viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal).....	61
Figura 5.15. Velocidad de viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal).....	61
Figura 5.16. Presiones de viento aplicadas en la cara de barlovento, en Pa (empuje).	62
Figura 5.17. Presiones de viento aplicadas en la cara de sotavento en Pa (succión).....	62
Figura 5.18. Configuración deformada, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.	64
Figura 5.19. Suma de vectores de desplazamiento, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.	65
Figura 5.20. Momento en el tubo columna, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.	66
Figura 5.21. Momento en el tubo mástil, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Factor topográfico FT, extraída de las NTCDV 2023.	14
Tabla 2.2 Valores c , α y δ para el cálculo del factor de exposición local, , extraída de las NTCDV 2023.	15
Tabla 2.3 Parámetros b y α según la categoría del terreno, extraída de las NTCDV 2023..	18
Tabla 2.4 Parámetros d , α , Z_0 , $Z_{mín}$ y $Z_{máx}$, extraído de las NTCDV2023.....	20
Tabla 5.1. Efectos actuantes en el AEU de acuerdo con diferentes metodologías.....	68

RESUMEN

La presente investigación aborda la comparativa entre las presiones de viento ejercidas en un anuncio espectacular unipolar con mampara desfasada obtenidas mediante la metodología descrita en la normativa vigente en México y una simulación de fluidos computacional. En el país se han observados múltiples colapsos de estructuras publicitarias, por lo que resulta necesario realizar diseños más seguros que consideren las presiones reales que actúan sobre la estructura. La investigación se centró en realizar una simulación de fluidos computacional que emuló los efectos que el viento podría ejercer sobre el anuncio, buscando de esta manera contrastar los resultados encontrados con las diferentes metodologías descritas. Para el anuncio se utilizó un diseño de acuerdo con la normativa vigente en el estado de Querétaro, con una altura total de 24 metros y un área de cartelera igual a 96 metros cuadrados. Los resultados confirman que las presiones de viento obtenidas mediante la simulación realizada son más críticas que las obtenidas según la normativa, lo que sugiere que la metodología actual podría no estar considerando adecuadamente los efectos que podrían presentarse realmente en una estructura publicitaria. Se concluye que es necesario que dichos resultados son al menos 10% más críticos, lo que en la práctica podría ocasionar una gran diferencia en cuanto a los esfuerzos actuantes en la estructura principal de la estructura. Por último, se recomienda en la práctica ingenieril hacer uso tanto de los métodos actuales como de una simulación de fluidos computacional y utilizar para diseño aquel valor que resulte más desfavorable.

(Palabras clave: anuncio espectacular unipolar, empujes de viento, simulación de fluidos computacional).

ABSTRACT

This research compares the wind pressures exerted on a single-pole billboard with an offset screen obtained using the methodology described in current Mexican regulations and a computational fluid simulation. Multiple collapses of advertising structures have been observed in the country, making it necessary to develop safer designs that take into account the actual pressures acting on the structure. The research focused on performing a computational fluid simulation that emulated the effects that wind could exert on the billboard, thus seeking to contrast the results found with the different methodologies described. For the billboard, a design was used in accordance with current regulations in the state of Querétaro, with a total height of 24 meters and a billboard area equal to 96 square meters. The results confirm that the wind pressures obtained through the simulation are more critical than those obtained according to the regulations, suggesting that the current methodology may not be adequately considering the effects that could have on an advertising structure. It is concluded that these results need to be at least 10% more critical, which in practice could make a big difference in terms of the forces acting on the main structure. Finally, it is recommended in engineering practice to use both current methods and computational fluid simulation and to use the most unfavorable value for design.

(**Keywords:** spectacular unipolar advertisement, wind thrusts, computational fluid simulation)

1. INTRODUCCIÓN

Los anuncios espectaculares unipolares (AEU) son un tipo de infraestructura publicitaria, cuya estructuración consiste en un tubo columna empotrado a una cimentación de zapata aislada a través de una placa base que, sostiene mediante un tubo mástil, una mampara conformada por armaduras metálicas (Smith et al. 2014), donde es posible colocar lonas, mantas o pantallas para fines publicitarios (Figura 1.1).

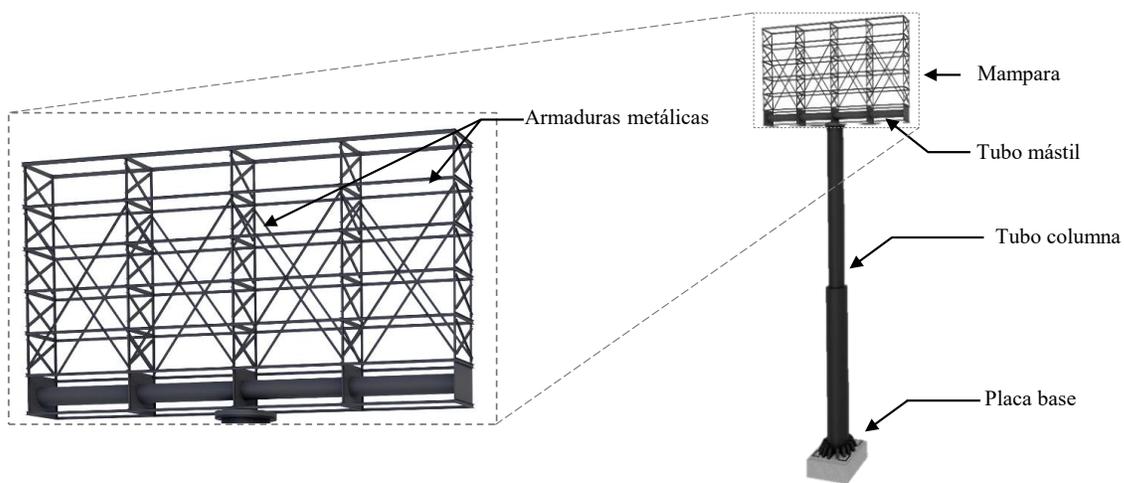


Figura 1.1. Partes de un anuncio espectacular unipolar.

Debido a sus ventajas comerciales, el aumento de AEU en carreteras y calles altamente transitadas en México ha sido notable en las últimas décadas, pues permite paneles publicitarios de gran formato a una altura considerable, lo que incrementa ventas y promoción a bajo costo. Por esto, a pesar de la preferencia por medios electrónicos, siguen siendo construidos regularmente en sitios de interés para las grandes empresas, comercios o servicios.

A causa de su diseño geométrico, los AEU tienen una configuración estructural muy diferente a cualquier edificación, debido a que concentran una gran masa en su parte más alta, lo que podría ocasionar que se comporte como un péndulo invertido

En la práctica, es común diseñar AEU con la mampara desfasada horizontalmente con respecto al tubo columna, lo cual sucede a menudo por la necesidad de que el contenido del anuncio tenga la mayor exposición posible para quien transita en la zona. Al contar un área de mampara de hasta 96 m^2 a una altura permitida máxima de 26 m (Ayuntamiento de Querétaro, 2017), es posible tener presiones de viento de grandes magnitudes aplicadas sobre la mampara que podrían ocasionar daños considerables sobre la estructura.

El viento es un fenómeno natural producido por el movimiento horizontal de masas de aire ocasionado por las diferencias de presión en las distintas zonas atmosféricas, así como también por la rotación del globo terráqueo. El análisis por viento permite obtener los valores de presión que ejerce este fluido sobre las estructuras. Dichas presiones actúan horizontalmente y se van amplificando en función de la altura, así como también de la velocidad del viento y las condiciones locales del sitio de estudio.

La velocidad del viento produce una presión directa sobre los elementos que se encuentran expuestos, como lo es la mampara y el tubo columna, lo cual, produce distintos efectos dependiendo de la posición de la mampara. En los AEU con mampara centrada suceden efectos de flexión simple, (Figura 1.2), mientras que en aquellos con mampara desfasada suceden al mismo tiempo efectos de flexión y torsión (Figura 1.3).

En el diseño estructural de los AEU se utiliza una metodología presente en la normativa vigente conocido como método estático equivalente (MEE), mediante el cual se obtiene una presión neta sobre la mampara y el tubo columna en función de la velocidad de diseño del viento y de las condiciones topográficas y ambientales de la zona. Sin embargo, Wen & Xie (2020) observaron que el MEE podría estar subestimando la respuesta dinámica del AEU en vientos de altas velocidades.

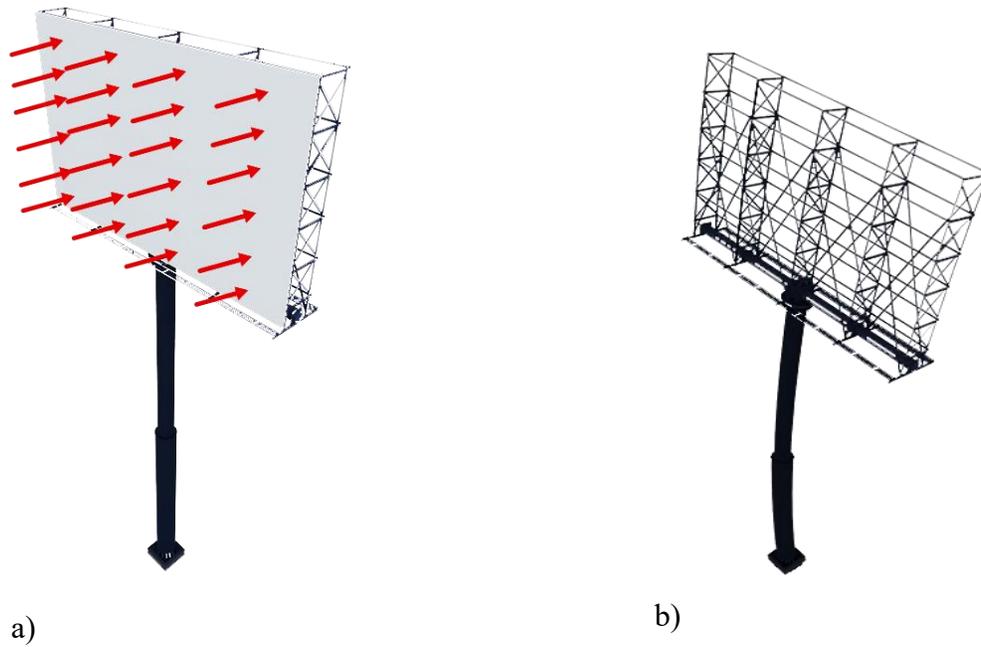


Figura 1.3. Efectos producidos en una AEU con mampara centrada: a) carga aplicada sobre el anuncio , b) flexión simple producto de la carga aplicada.

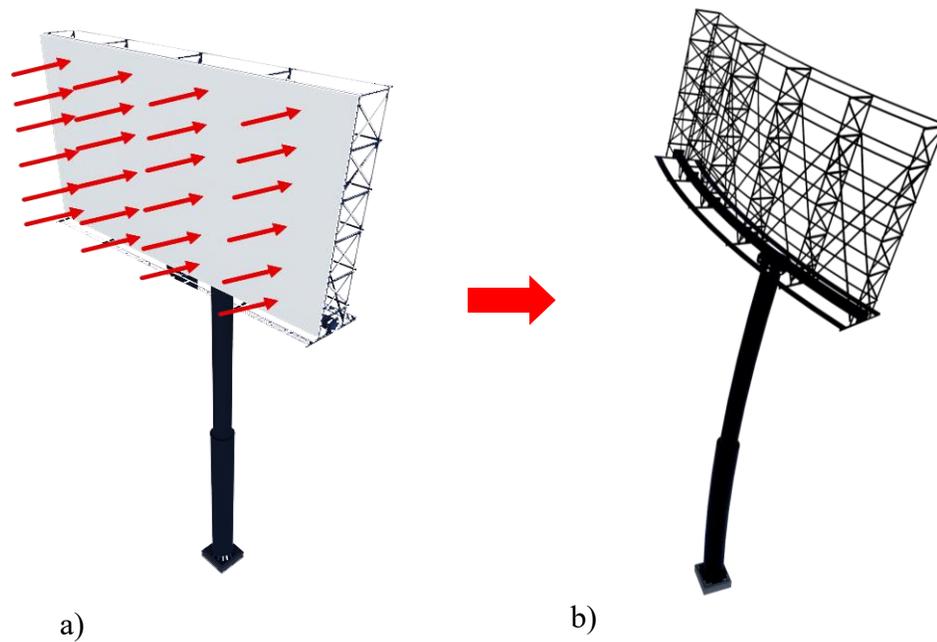


Figura 1.2. Efectos producidos en el AEU con mampara desfasada: a) carga aplicada sobre el anuncio y b) efecto de torsión debido a la carga excéntrica.

Actualmente, no existe normativa vigente que considere la carga excéntrica y la torsión en el diseño de los AEU, especialmente en aquellos con mampara desfasada. Debido a esto y al peligro que representan a peatones y automovilistas que habitan o transitan cerca, así como también el daño social y patrimonial que ocasionan en caso de colapso, resulta necesario considerar dichos efectos (Wang et al. 2022). Por otra parte, la ocurrencia de ráfagas de viento mayores a las estimadas mediante la normativa actual ha ido en aumento considerablemente en los últimos años en consecuencia del cambio climático (Salgado-Estrada et al. 2023).

Además, incluso cuando en los manuales de diseño se consideran factores para cubrir dichos eventos, se ha observado que a pesar de que los análisis determinísticos consideran dichos factores, existe la probabilidad de que los efectos considerados para diseño se vean superados (Wen & Xie, 2020).

En consecuencia, es común realizar estudios en túneles de viento a escala, lo cual permite analizar el comportamiento estructural de los AEU, así como la presión ejercida sobre el mismo. No obstante, a pesar de que el túnel de viento cuenta con un grado de aproximación sumamente aceptable, el costo que conlleva su utilización, así como las limitaciones para acceder a alguno de ellos, orilla a los investigadores a optar por una alternativa conocida como dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

La metodología CFD es una rama de la mecánica de fluidos que realiza una simulación computacional en donde emula las características del sitio de estudio y permite obtener valores aproximados a los de un túnel de viento experimental. Es por ello por lo que algunos programas de análisis y diseño estructural categorizan el CFD como un túnel de viento virtual en donde, a partir de un modelo con las características geométricas y mecánicas de la estructura, es posible obtener coeficientes de empuje de viento, así como presiones aplicadas sobre ella.

El presente trabajo utilizó CFD para simular los efectos de viento ejercidos sobre un AEU con mampara desfasada teniendo como objetivo comparar las discrepancias existentes entre la metodología presente en la normativa y un túnel de viento virtual, lo que permitió

observar que las presiones ejercidas sobre la mampara pueden llegar a ser superiores que las obtenidas mediante el análisis estático.

A continuación, se presenta la justificación y la descripción del problema, resaltando la importancia que tienen dichas estructuras publicitarias en el ámbito económico, así como la necesidad de mejorar las técnicas de diseño que se implementan para lograr diseños más seguros.

En el capítulo 2, se incluyen los antecedentes de aquellos trabajos previos que permitieron avanzar adecuadamente en la metodología, como lo son los experimentos en túnel de viento, las simulaciones CFD y los análisis teóricos realizados.

Posteriormente, en el capítulo 3 se menciona la hipótesis y objetivos de la presente investigación. Después, en el capítulo 4 se describe la metodología a seguir y finalmente en el capítulo 5 y 6, se abordan los resultados y conclusiones, respectivamente.

1.1. Justificación

El aumento de los AEU en las grandes carreteras y calles sumamente transitadas ha sido considerable en los últimos años, pues estos ofrecen grandes ventajas publicitarias al permitir colocar anuncios de gran formato a altura considerablemente elevadas, ayudando así a las marcas a aumentar ventas, difusión y promoción, además, resultan bastante rentables y de bajo costo.

En México, la inversión destinada a la publicidad en 2023 aumentó un 18.9% con respecto al año anterior, representando un total de \$123,705 millones de pesos (Malacara, 2023). De ese monto, se estima que el 18% es destinado a medios tradicionales, en dicho porcentaje de inversión se destina 23% a publicidad en exteriores tradicional representado cerca de \$11,665 millones de pesos (Rodríguez, 2024). Debido a esto, aun con la tendencia de las grandes empresas para utilizar los medios electrónicos para publicitarse, seguirán siendo construidos y utilizados los AEU para la publicidad exterior, así como cualquier otra estructura diseñada para ese fin.

Por la frecuente construcción de anuncios publicitarios, se ha observado que tan solo en la CDMX caen en promedio 18 estructuras publicitarias al año (Escobar, 2023). Esto debido a que, de las 2500 estructuras publicitarias existentes en CDMX, se estima que al menos el 80% se construyen sin permiso (Navarro, 2022), y en la mayoría de los casos también sugiere la falta del análisis y diseño estructural adecuado.

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, será posible generar consideraciones de diseño que permitan aproximar de mejor manera los efectos actuantes en los AEU con mampara desfasada para generar diseños más eficientes y adecuados con base en las presiones actuantes producidas por los efectos de viento en la zona de estudio.

1.2. Descripción del problema

En la actualidad, se utiliza el método estático para el análisis y diseño de AEU, el cual regularmente subestima la acción que podría presentarse sobre el anuncio, por lo que podrían presentarse casos en donde este fallará aún sin llegar a la velocidad de diseño (Wen & Xie, 2020). Por otra parte, debido a que los AEU son considerados en la normativa como estructuras menos importantes que edificios de gran tamaño y son construidos en breve período de tiempo, la resistencia de diseño puede no estar siendo considerada adecuadamente.

En los últimos años, a causa del aumento de la temperatura global, se ha incrementado la magnitud y la periodicidad de vientos extremos, lo que aumenta la vulnerabilidad de la estructura y el riesgo para todos aquellos que habitan y transitan en la periferia de este (Salgado-Estrada et al. 2023). Por ello, es necesario una metodología de análisis que aproxime con mayor precisión los efectos adversos del viento sobre los AEU, principalmente aquellos con mampara desfasada, ya que en la actualidad no existe normativa vigente en el país que considere los efectos de la carga excéntrica y torsión en el tubo columna.

Debido al impacto económico de estos anuncios, el peligro que estos representan a peatones y automovilistas que habitan o transitan cerca, así como también el daño social y patrimonial que ocasionan en caso de derrumbe, resulta necesario obtener presiones de viento con un mayor grado de aproximación a los que se podrían presentarse en la realidad.

2. ANTECEDENTES

De acuerdo con la normativa, el análisis y diseño estructural son necesarios en la etapa de planeación previa a la construcción de edificios, casas, puentes y estructuras en general. Es común considerar las cargas gravitacionales producto del peso propio de la estructura y del uso que se le pueda dar a la misma, sin embargo, también es necesario considerar los efectos de cargas accidentales producto de los fenómenos naturales como los sismos, viento, nieve o granizo.

Para estructuras de gran altura, el viento es uno de los efectos que más debe de ser tomado en consideración (Cruz S et al. 2018), el cual se define como movimientos horizontales de masas de aire producto de las diferencias de presión en las distintas zonas de la atmósfera y de la rotación terrestre.

Estos movimientos suceden en todo momento, no obstante, en el diseño estructural interesan únicamente los efectos de vientos producidos por velocidades muy grandes asociadas a fenómenos atmosféricos y ambientales muy grandes (Meli, 2011).

Los valores de la magnitud de las cargas de viento que pueden actuar en una estructura dependen de la localización geográfica, de las obstrucciones alrededor del terreno y de la geometría y modo de vibrar de las estructuras, como se observa en la Figura 2.1 (Kassimali, 2015).

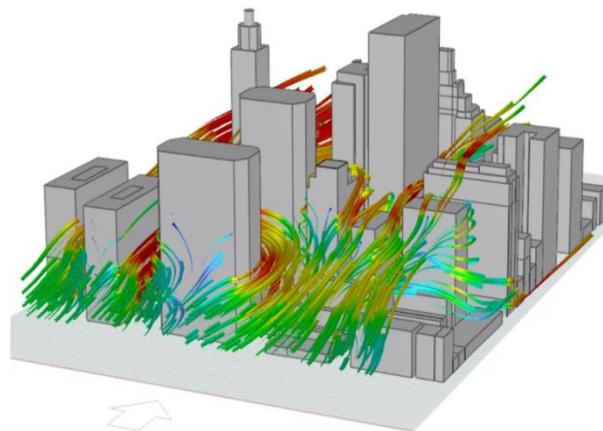


Figura 2.1. Comportamiento del flujo de viento en diferentes edificios de acuerdo con su geometría y las obstrucciones existentes alrededor, extraído de Rojek, (2021).

2.1. Anuncios espectaculares unipolares

Los anuncios espectaculares unipolares (AEU) son estructuras que se componen principalmente de dos caras publicitarias, ya sea paralelas entre sí o con un pequeño ángulo de abertura, donde se colocan lonas conformadas por láminas delgadas colocadas sobre la estructura de la mampara, la cual se construye regularmente por perfiles en ángulo o rectangulares tubulares.

De manera particular, resulta interesante el estudio del comportamiento estructural de los AEU, los cuales se cimentan con zapatas aisladas de concreto armado en donde a través de una placa base se conecta el tubo columna de sección circular hueca de acero estructural con una altura considerablemente alta que conectan con la mampara a través del tubo mástil el cual, al igual que el tubo columna se conforma de perfil de sección tubular hueco.

También se define como una estructura de un solo soporte hasta el piso que puede ser clasificado como sencillo, doble o múltiple según el número de caras útiles del anuncio con las medidas señaladas por los reglamentos de diseño y construcción vigentes. En la Figura 2.2a se observa la estructura de un AEU típico, en donde por lo regular, la mampara se encuentra centrada con respecto al tubo columna, sin embargo, el presente estudio se basa en el comportamiento estructural de los AEU con mampara desfasada como el que se observa en la Figura 2.2b.

La particularidad de estas estructuras radica en que aun cuando en apariencia resulten ser muy sencillos, porque únicamente cuentan con tres partes principales que son: mampara, tubo columna y cimentación, en realidad son estructuras que cuentan con accesorios y elementos en la mampara que complican su diseño estructural, además de que son susceptibles al volteo, especialmente por efecto de viento (Cruz S et al. 2018).



Figura 2.2. Tipos de AEU: a) anuncio unipolar típico, con la mampara centrada con respecto al tubo columna, b) anuncio unipolar de interés con la mampara desfasada con respecto al tubo columna.

Los AEU tienen una forma específica muy distinta a la de cualquier edificio, además, debido a que las mamparas se encuentran muy por arriba con respecto del nivel del suelo y al tener una superficie muy grande comparada con el tubo columna, producen efectos adversos necesarios de ser analizados.

Para tener noción de los criterios de diseño aplicables, en el Reglamento de Imagen Urbana del Municipio de Querétaro (RIUMQ) se especifica a través de la Norma Técnica Complementaria (NTC) con código NTC-RIU-TIV-CV-SEDESO-17 Diseño y Ubicación de Anuncios en Fachada (Ayuntamiento de Querétaro, 2017) los lineamientos para las alturas y superficies permisibles, el cual se puede resumir en la Figura 2.3, extraída de la normativa.

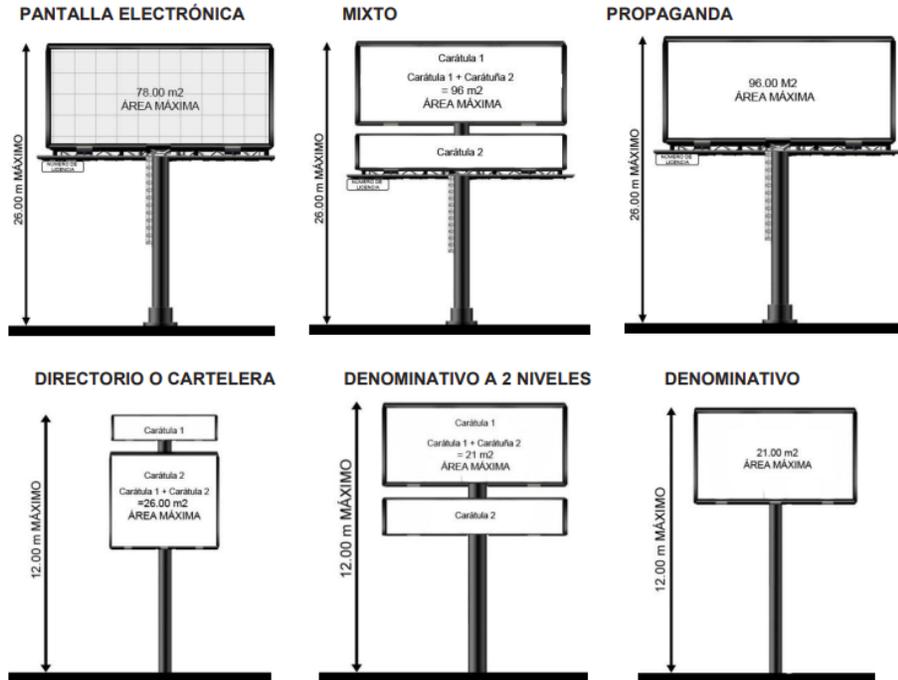


Figura 2.3. Alturas y dimensiones permisibles con base en la clasificación del anuncio, extraído de Ayuntamiento de Querétaro, (2017).

2.2. Análisis por viento

El viento actúa en distintas maneras sobre las estructuras en función de su geometría. Su velocidad produce presión directa sobre los elementos que se encuentran expuestos, los cuales transmiten esos esfuerzos hacia los elementos estructurales principales. Adicionalmente, también se generan empujes dinámicos en la dirección del viento, ocasionando fuerzas paralelas al flujo causadas por la turbulencia del viento y cuya variación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural (Hidalgo, 2013).

El comportamiento del flujo de aire es un fenómeno natural no uniforme; los gradientes de temperatura y la rugosidad de la superficie del terreno producen turbulencias. En la Figura 2.4 se observa un registro común de la variación de velocidades instantáneas del viento en función del tiempo.

No obstante, el modelo utilizado usualmente toma en cuenta el efecto estático, es decir, se considera una velocidad media que actúa durante varios minutos sobre la estructura, sumado a una oscilación aleatoria que tiene periodos del orden de algunos segundos y que se denomina efecto de ráfaga.

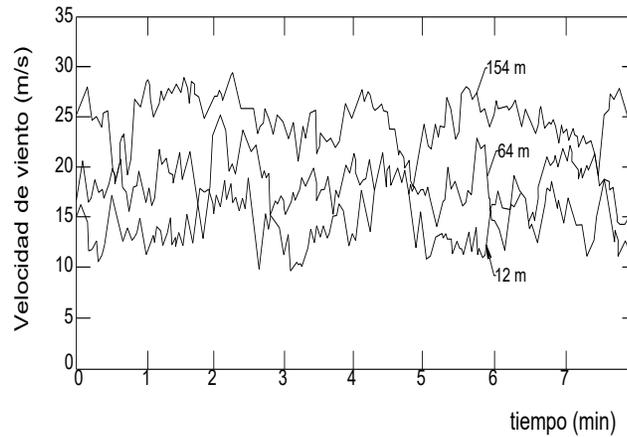


Figura 2.4. Registros de velocidades de viento a distintas alturas, adaptado de Meli, (2011).

La rugosidad del terreno reduce la velocidad del viento cerca del mismo, generando variaciones como se observa en la Figura 2.5. Las capas bajas del aire retrasan a las capas superiores, produciendo diferentes velocidades de viento desde el nivel de terreno hasta que las fuerzas entre las capas de viento hacen la velocidad igual a cero (Arroyo, 2015).

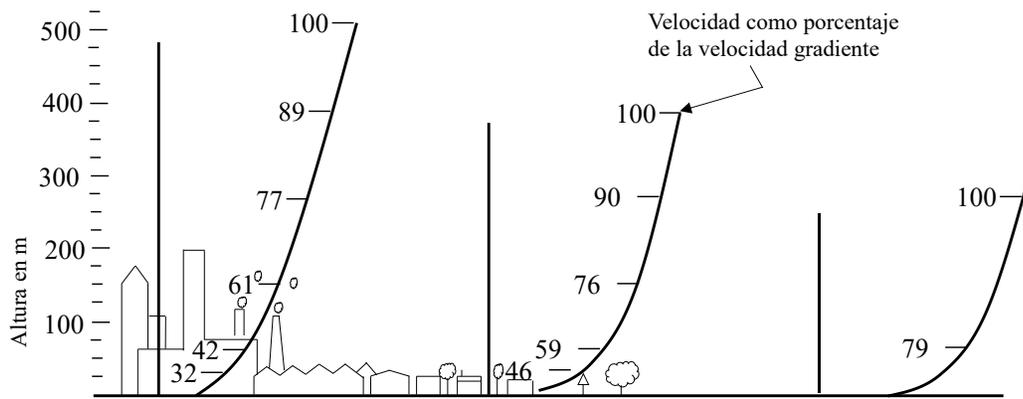


Figura 2.5. Variación de la velocidad de viento con respecto al altura para terreno con diferentes rugosidades, adaptado de Meli, (2011).

Para un terreno muy liso, el viento mantiene velocidades muy altas cerca de la superficie, no obstante, en entornos urbanos con edificaciones altas, la velocidad disminuye

conforme se acerca a la superficie del terreno. En la ecuación (2.1) se describe una expresión empírica que describe la variación de la velocidad del viento con base en la altura.

$$V = V_0 \left[\frac{Z}{Z_0} \right]^\alpha \quad (2.1)$$

Donde:

- V Velocidad del viento a una altura z por encima del terreno natural (km/h),
- V_0 Velocidad del viento a una altura de referencia (km/h),
- Z Altura por encima del terreno natural (m),
- Z_0 Altura de referencia (m) y
- α Coeficiente dependiente de la topografía (adimensional)

El viento, al igual que cualquier fluido, al encontrar un obstáculo en su camino se desvía para rodearlo, lo que produce presiones en el objeto. Las partículas de aire golpean la cara expuesta directamente al flujo del viento, denominada barlovento, la cual se opone a su libre circulación produciendo en ella empujes. Por el contrario, en la cara posterior, denominada sotavento, las estelas del flujo se separan del objeto produciendo succiones (Meli, 2011), como se muestra en la Figura 2.6. Estos dos efectos al sumarse generan una fuerza de arrastre sobre el objeto.

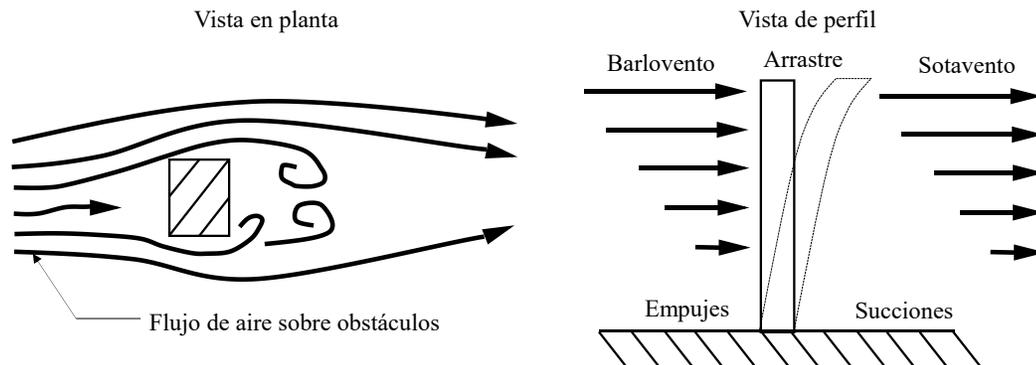


Figura 2.6. Flujo de aire sobre obstáculos fijos, adaptado de Arroyo (2015).

Al suponer que el aire es un fluido incompresible no viscoso, es posible aplicar la ecuación de Bernoulli en la dirección del flujo, considerando que la energía de presión más la cinética permanece constante en cualquier punto. Considerando este principio en un punto

1, antes del objeto y en un punto 0, situado al centro de la cara del objeto sometido al flujo, en la ecuación (2.2) se describe la presión actuante con base en este principio.

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \quad (2.2)$$

Donde:

C_D Factor de forma o empuje para el objeto analizado (adimensional),

ρ Densidad del aire, (1.23 kg/m³, a nivel del mar) y

V Velocidad del viento (km/h).

La distribución de la presión del viento sobre los paneles publicitarios resulta compleja de analizar, debido a que la normativa nacional solo proporciona un coeficiente de presión de viento para la mampara. En la actualidad, los valores de diseño de los AEU se seleccionan de acuerdo con varios diseños estándar y presiones de viento generalizadas (NTC, 2023). Además, regularmente se aplica el método de diseño estático equivalente, que, a menudo subestima las respuestas dinámicas reales ante vientos fuertes (Radu et al. 2018).

Considerando lo anterior, es importante el análisis del comportamiento de los anuncios espectaculares, también conocidos como *billboards* bajo los efectos de viento, los cuales son grandes elementos publicitarios que se ubican generalmente en zonas de alto tráfico como puede ser a lo largo de calles, avenidas, carreteras y caminos. Estas estructuras presentan mensajes publicitarios tanto a peatones como a conductores, buscando ser perfectamente visibles en toda el área designada (Castelán & Hernández, 2013).

2.3. Método estático

Como se observa en la ecuación (2.2) el empuje estático se ve afectado exponencialmente por la velocidad de viento. Por ello, en la práctica se busca que la velocidad de diseño sea aquella que tenga una escasa posibilidad de ser excedida durante el periodo para el cual dicha estructura fue diseñada, es decir, aquel valor de velocidad que represente un valor característico adecuado.

La ecuación (2.3) descrita en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV) 2023 (Gobierno de la Ciudad de México, 2023), permite calcular la velocidad de viento sobre una estructura o elemento de esta.

$$V_D = F_T F_{rZ} V_R \quad (2.3)$$

Donde

V_D Velocidad de diseño para presiones estáticas (km/h),

F_T Factor correctivo por topografía (adimensional),

F_{rZ} Factor de exposición local (adimensional) y

V_R Velocidad regional (km/h).

El factor correctivo por topografía, F_T , toma en cuenta las condiciones en donde se desplanta la estructura, dichos valores pueden tomarse de la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Factor topográfico F_T , extraída de las NTCDV 2023.

Tipos de topografía		F_T
T1	Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.8
T2	Valles cerrados	0.9
T3	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes con pendientes menores que 5% (normal)	1
T4	Terrenos inclinados con pendientes entre el 5 y el 10%	1.1
T5 a)	a) Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes entre 10 y 15 %, cañadas o valles cerrados	1.2
T5 b)	b) Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 15 %, cañadas o valles cerrados	1.5

Por otra parte, el factor de exposición local, F_{rZ} , relaciona la variación de la velocidad del viento con la altura de referencia, en función de la rugosidad de los terrenos circundantes del sitio de desplante. Se calcula según las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6).

$$F'_{rZ} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \text{ m} \quad (2.4)$$

$$F'_{rZ} = c \left(\frac{Z_s}{10} \right)^\alpha \quad \text{si} \quad 10 \text{ m} < Z_s \leq \delta \quad (2.5)$$

$$F'_{rZ} = c \left(\frac{\delta}{10} \right)^\alpha \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad (2.6)$$

Donde:

- c Coeficiente de escala de rugosidad (adimensional),
- α Exponente de la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura (adimensional),
- Z_s Altura medida a partir del nivel medio del terreno a la cual se calculará la velocidad del viento (m) y
- δ Altura gradiente (m).

Los valores c , α y δ se obtienen de la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores c , α y δ para el cálculo del factor de exposición local, extraída de las NTCDV 2023.

Tipos de rugosidad del terreno		c	α	δ (m)
R1	Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto. Las obstrucciones existentes, tienen alturas menores que 1.5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.	1.142	0.061	280
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones. Las obstrucciones existentes, tienen alturas de 1.5 a 5 m, la longitud mínima debe ser la mayor entre 1500 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.	1	0.095	350
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R4. Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 10 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.	0.832	0.14	410
R4	Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.	0.668	0.192	470

El empuje estático producido en un anuncio espectacular unipolar es posible obtenerlo con la ecuación (2.7) extraída de las NTCDV 2023 la cual se obtiene considerando la suma de los empujes de y succiones (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

$$P_n = C_{pn}[1 - (1 - \Phi^2)]q_z \quad (2.7)$$

Donde:

- P_n Presión neta sobre el anuncio (kg/m^2),

C_{pn} Coeficiente de presión neta del anuncio (adimensional),

Φ Relación entre el área sólida y el área total de la superficie del anuncio (adimensional) y

q_z Presión dinámica de base del viento

La presión dinámica descrita con anterioridad, definida como la presión que ejerce el flujo de viento sobre una superficie plana perpendicular a él, a una altura z , se puede calcular con la ecuación (2.8) descrita en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (MDOCDV) (CFE, 2020), el cual menciona que cuando el viento ejerce presión sobre una edificación genera presiones sobre su superficie que son variables de acuerdo con la intensidad de velocidad y a la dirección del viento.

$$q_z = 0.0048GV_D^2 \quad (2.8)$$

Donde:

q_z Presión dinámica de la base (kg/m²),

V_D Velocidad de diseño (km/h) y

G Factor de corrección por temperatura y altura con respecto al nivel del mar (adimensional).

El valor de G , adimensional, se calcula según la ecuación (2.9), el cual depende de la temperatura y la presión barométrica en función de la altura con respecto al nivel del mar en el que se encuentre el sitio de análisis.

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \quad (2.9)$$

Donde:

Ω Presión barométrica del aire en la altitud de diseño (mmHg) y

τ Valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)

Una manera de conocer la presión barométrica es a través de la ecuación (2.10).

$$\Omega = P_0(1 - 6.87535 \times 10^{-6} H_C)^{5.2561} \quad (2.10)$$

Donde:

P_o Presión a nivel del mar (mmHg) y

H_c Altura de diseño con respecto al nivel del mar (ft)

2.4. Método dinámico

En contraste con el método estático, el análisis dinámico es utilizado para obtener la acción resultante de la estructura mediante la interacción dinámica entre el flujo de viento y las estructuras. De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (MDOCDV) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se puede utilizar este método de análisis dinámico para las estructuras clasificadas como Tipo 2 y 3. Este método consiste en obtener las cargas estáticas equivalentes de viento que actúan sobre las estructuras sensibles a los efectos dinámicos producidos por la turbulencia del viento.

De igual manera, para este método también es necesario conocer la velocidad media, la cual se calcula con la ecuación (2.11), que corresponde a una velocidad de diseño para una altura dada en un tiempo promediado de diez minutos, utilizada para obtener el factor de respuesta de ráfaga

$$V'_D = \frac{F_T F'_{rz} V_R}{3.6} \quad (2.11)$$

Donde:

V'_D Velocidad media de diseño para una altura dada en un tiempo promediado de diez minutos (m/s),

F_T Factor de topografía (adimensional) y

F'_{rz} Factor de exposición para la velocidad media (adimensional)

El factor de exposición para la velocidad media indicado en la ecuación (2.11) se calcula de acuerdo a las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.14), en donde considera el efecto combinado de las características de rugosidad local y de la variación de la velocidad con la altura.

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad \text{si } z \leq 10 \quad (2.12)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si } 10 < z \leq \delta \quad (2.13)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{\delta}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si } z \geq \delta \quad (2.14)$$

Donde:

\bar{b} Coeficiente de escala de rugosidad para la velocidad media (adimensional),

α' Exponente de la variación de la velocidad media con respecto a la altura (adimensional),

z Altura medida a partir del nivel medio del terreno a la cual se calculará la velocidad del viento (m)

Los valores \bar{b} y α' depende de las condiciones de rugosidad y categoría del terreno y sus valores se toman de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros \bar{b} y α' según la categoría del terreno, extraída de las NTCDV 2023.

Categoría del terreno	\bar{b}	α'
R1	1.17	0.1
R2	1	0.14
R3	0.82	0.19
R4	0.61	0.26

En las NTCDV 2023 describe la presión dinámica equivalente actuante sobre una construcción abierta o estructura donde no exista presión interior se define de acuerdo con la ecuación (2.15) descrito en el numeral 4.3.

$$P_{eq} = \frac{P_n}{(1 + 7I_v(Z_s))} F_{RR} \quad (2.15)$$

Donde:

P_{eq} Presión estática equivalente (kg/m^2),

P_n Presión exterior (kg/m^2),

F_{RR} Factor de respuesta de ráfaga (adimensional),

$I_v(Z_s)$ Índice de turbulencia evaluado a la altura de referencia (adimensional) y

El factor de respuesta de ráfaga mencionado anteriormente se puede obtener a través de la ecuación (2.16) del MDOCDV, no obstante, sólo podrá ser empleada si se cumplen las siguientes condiciones:

1. La estructura corresponde a una de las formas generales mostradas en la Figura 2.7
2. La respuesta máxima en la dirección del viento es generada, principalmente, con base en la contribución del modo fundamental de vibrar, cuyas coordenadas modales tendrán el mismo signo, por consiguiente, los modos de vibrar superiores pueden ignorarse

$$F_{RR} = 1 + 2K_p I_v(Z_s) \sqrt{B_c^2 + R_c^2} \quad (2.16)$$

Donde:

F_{RR} Factor de respuesta de ráfaga para estructuras prismáticas (adimensional),

K_p Factor pico (adimensional),

$I_v(Z_s)$ Índice de turbulencia evaluado a la altura de referencia (adimensional),

B_c^2 Factor de repuesta de fondo (adimensional) y

R_c^2 Factor de respuesta en resonancia (adimensional).

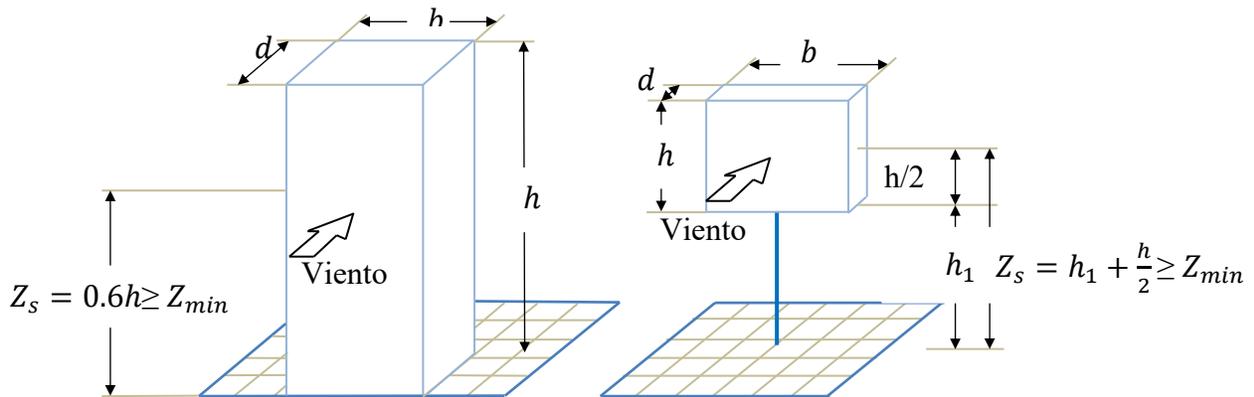


Figura 2.7. Formas generales de estructuras prismáticas contempladas para análisis dinámico en donde se definen la altura de referencia para la determinación de la repuesta dinámica; a) estructuras tales como edificios, b) estructuras con masas concentradas, adaptado de NTC (2023).

El índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia, $I_v(Z_s)$, se calcula de acuerdo con la ecuación (2.17) y (2.18) según la altura de referencia.

$$I_v(Z_s) = \bar{d} \left(\frac{Z_s}{10} \right)^{-\alpha'} \quad \text{si} \quad Z_{\min} < Z_s \leq Z_{\max} \quad (2.17)$$

$$I_v(Z_s) = \frac{1}{\ln \left(\frac{Z_{\min}}{Z_0} \right)} \quad \text{si} \quad Z_s \leq Z_{\min} \quad (2.18)$$

Donde:

- \bar{d} Parámetro de la escala de turbulencia, extraído de la tabla 4.1 del MDOCDV (adimensional),
- Z_s Altura de referencia (m),
- α' Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura para un intervalo de ráfaga de 3 s, extraído de la tabla 4.1 del MDOCDV (adimensional)

Los valores descritos con anterioridad se obtienen de la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Parámetros \bar{d} , $\bar{\alpha}$, Z_0 , Z_{\min} y Z_{\max} , extraído de las NTCDV2023.

Categoría del terreno	\bar{d}	$\bar{\alpha}$	Z_0	Z_{\min}	Z_{\max}
R1	0.12	0.44	0.001	1	200
R2	0.17	0.52	0.020	2	200
R3	0.25	0.61	0.200	5	200
R4	0.39	0.67	1.000	10	200

La longitud de la escala de turbulencia, $L(Z_s)$, para la altura de referencia, se calcula según la ecuación (2.19)

$$L(Z_s) = 300 \left(\frac{Z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \quad (2.19)$$

Donde:

- $\bar{\alpha}$ Exponente que define la variación de la longitud de escala con la altura, extraído de la Tabla 2.4 (adimensional).

Por otra parte, el factor de respuesta por turbulencia de fondo, B_c^2 , se calcula en función de la ecuación (2.20)

$$B_c^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left(\frac{b+h}{L(Z_s)} \right)^{0.63}} \quad (2.20)$$

Donde:

- b Base de la mampara (m) y
- h Altura de la mampara (m).

El espectro de densidad de potencia de viento, $S_L(Z_s, n_{1,x})$, se evaluar en función de la ecuación (2.21)

$$S_L(Z_s, n_{1,x}) = \frac{6.8 \left(\frac{n_{1,x} L(Z_s)}{V'_D(Z_s)} \right)}{\left[1 + 10.2 \left(\frac{n_{1,x} L(Z_s)}{V'_D(Z_s)} \right) \right]^{5/3}} \quad (2.21)$$

Donde:

- $n_{1,x}$ Frecuencia fundamental de la estructura (Hz).

Para el cálculo de la frecuencia reducida considerando la dimensión de la altura de la mampara, n_h , se utiliza la ecuación (2.22).

$$n_h = \frac{4.6h n_{1,x}}{V'_D(Z_s)} \quad (2.22)$$

La función de admitancia aerodinámica para la forma modal fundamental en función a la altura de la mampara se obtiene de la ecuación (2.23)

$$R_h(n_h) = \frac{1}{n_h} - \frac{1}{2n_h^2} (1 - e^{-2n_h}) \quad (2.23)$$

De manera análoga, la frecuencia reducida considerando la dimensión de la base de la mampara, n_b y la función de admitancia aerodinámica para la forma modal fundamental en función a la base de la mampara se obtienen de las ecuaciones (2.24) y (2.25), respectivamente.

$$n_b = \frac{4.6b n_{1,x}}{V'_D(Z_S)} \quad (2.24)$$

$$R_b(n_b) = \frac{1}{n_b} - \frac{1}{2n_b^2} (1 - e^{-2n_b}) \quad (2.25)$$

El factor de respuesta en resonancia, R_c^2 , dependiente de las ecuaciones anteriores, se obtiene según la ecuación (2.26).

$$R_c^2 = \frac{\pi}{4\zeta_{t,y}} S_L(Z_S, n_{1,x}) R_h(n_h) R_b(n_b) \quad (2.26)$$

Donde:

$\zeta_{t,y}$ Relación de amortiguamiento total en la dirección transversal del viento
(adimensional)

La frecuencia de cruces por cero o tasa media de oscilaciones, v , se calcula de acuerdo con la ecuación (2.27).

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R_c^2}{B_c^2 + R_c^2}} \quad (2.27)$$

El factor pico, k_p , se obtiene en función de la ecuación (2.28).

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600v)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(600v)}} \quad (2.28)$$

2.5. Túnel de viento

Una manera práctica de determinar de manera aproximada las presiones ocasionadas por el viento en los AEU es a través del túnel de viento. Paulotto et al. (2006) utilizaron un túnel de viento para evaluar de presión actuante sobre un cartel tipo marco situado en un entorno urbano regular. Evaluando dicho letrero con apoyos simples y empotrados, encontrando que la relación entre la presión actuante del viento en el cartel es menor cuando esta empotrado que al estar simplemente apoyo.

Por su parte, Warnitchai et al. (2009), demostraron que el coeficiente de fuerza de arrastre alcanza su valor máximo cuando el ángulo de ataque del viento está entre -45° y 45° , de igual manera, la torsión inducida por el viento alcanza su valor máximo entre los 45° y 60° .

Wang et al. (2016) hicieron estudios en túnel de viento para AEU de dos y tres caras, encontrando que la carga de viento para las placas sometidas a barlovento es similar para ambas configuraciones.

De igual manera Zuo et al. (2014) realizaron pruebas en túnel de viento a escala para cinco diferentes tipos de AEU: de caja cerrada, de una sola cara, dos caras, dos caras en V con 30° de apertura y dos caras en V con 10° , con diferentes relaciones geométricas, encontrando que la configuración rectangular elegida para la mampara afecta significativamente la carga de viento (Figura 2.8).

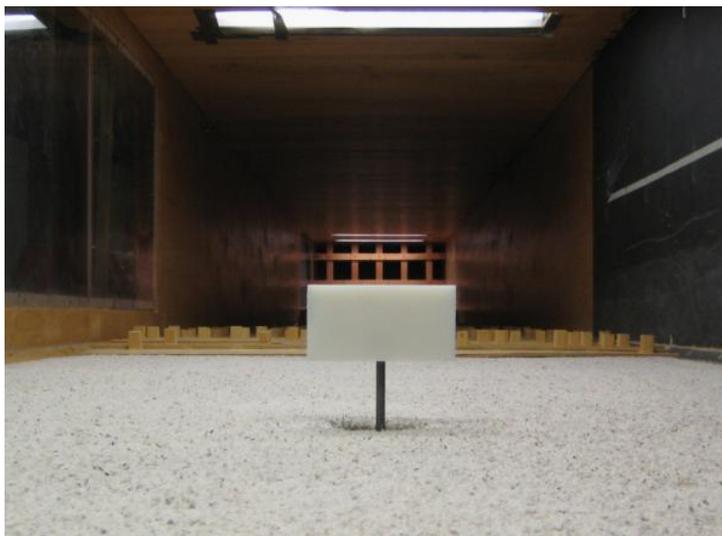


Figura 2.8 AEU de una sola cara sometido a pruebas en túnel de viento simulando campo abierto, extraído de Zuo, et al. (2014).

Se demostró que para los 5 tipos de AEU, los que tienen los lados abiertos experimenta mayor momento producido por la carga de viento alrededor del eje vertical del anuncio que aquellos anuncios de una sola cara y de caja cerrada.

Li et al. (2018) realizaron un estudio en túnel de viento con un AEU con mampara desfasada en forma “V” a escala 1:20 (Figura 2.9), con el objetivo de medir las presiones de

viento aplicadas sobre la mampara, así como la manera en la que se distribuyen a lo largo de la estructura.



Figura 2.9. Modelo aeroelástico de un AEU con mampara desfasada en forma de “V”, extraído de Li, et al. (2018)

Smith et al. (2014) realizaron un estudio con un AEU de tamaño real, en campo abierto, en donde con diferentes instrumentaciones para medir la velocidad, las presiones actuantes debido al viento y los esfuerzos ocasionados por las mismas (Figura 2.10)

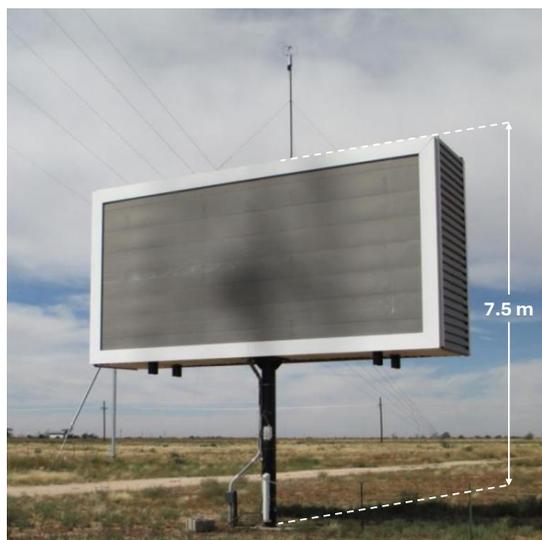


Figura 2.10. AEU sometido a presiones de viento en campo abierto, adaptado de Smith, et al. (2014).

Encontraron a grandes rasgos que los coeficientes de fuerza obtenidos en ensayos n túneles de viento anteriores para AEU de paneles delgados son mayores que los encontrados en este estudio, lo cual resulta interesante debido a que se observa que aun en estudios experimentales es casi impredecible obtener la presión actuante en el mismo.

No obstante, sería necesario realizar estos estudios en anuncios de mayor altura, ya que, para este caso, la altura total apenas llega a los 7.50 m, mientras que en la práctica se observan anuncios de mayores dimensiones.

Al aplicar su metodología, encontraron que la dirección de viento que produce una mayor carga en la estructura es la generada en la dirección perpendicular a la mampara, mientras que la que ocasiona mayor torsión en el AEU es a los 60° dextrógiros.

2.6. Simulación de dinámica de fluidos computacional.

La simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se utiliza para estudiar cómo los fluidos (e.g. el viento o el agua) interactúan con las estructuras. Esto es crucial en el diseño estructural, especialmente para edificaciones altas que sean vulnerables a los efectos del viento, como es el caso de los AEU.

Para Lorenzon et al. (2017), muchos métodos de CFD para la simulación de la turbulencia han sido sumamente aceptados por su capacidad de representar correctamente las características del flujo con un costo reducido en comparación con los túneles de viento. Por lo tanto, su uso podría ser muy útil para diseñadores e investigadores que no tengan acceso a túneles.

Para contrastar los resultados obtenidos a través de las metodologías como el túnel de viento, es válido utilizar la simulación dinámica de fluidos computacional, la cual es una rama de la mecánica de fluidos que permite la simulación numérica de flujos fluidos a través de métodos numéricos (Espinoza, 2023).

Dado que la naturaleza del comportamiento de los fluidos consta de un proceso iterativo. La dinámica de fluidos computacional es utilizada para comprender la estructura de flujo, así como los aspectos físicos importantes del elemento de estudio y permite obtener

resultados similares a los que se obtienen mediante la experimentación con túnel de viento (Jiyuan & Guan-Heng, 2018).

2.6.1. Navier-Stokes

La solución de las ecuaciones de Navier-Stokes describen el comportamiento de un fluido turbulento al considerarlo homogéneo e incompresible de viscosidad constante.

En general, las ecuaciones de Navier Stokes pueden expresarse de acuerdo con la ecuación (2.29), siempre y cuando el fluido se considere como incompresible.

$$\mathbf{v}' + (\text{grad } \mathbf{v})\mathbf{v} = \nu\Delta\mathbf{v} - \text{grad } \pi_o + \mathbf{b}_o \quad (2.29)$$

Donde:

- \mathbf{v}' Variación del tiempo
- ν Viscosidad cinemática
- \mathbf{v} Velocidad expresada
- π_o Presión del fluido
- \mathbf{b}_o Fuerzas de cuerpo

Se ha observado que debido a las limitaciones computacionales es prácticamente imposible resolver de forma directa las ecuaciones anteriores para flujos turbulentos. Esto debido a la complejidad que representa un flujo de condición irregular como el turbulento, que se caracteriza por una fuerte no linealidad y una gran amplitud de escalas de longitud, tiempo y velocidad.

No obstante, para fines ingenieriles, no es indispensable identificar todas las características del flujo, pues se ha encontrado que únicamente los remolinos de mayor energía son responsables de los efectos dinámicos en las estructuras (Dowell & Hall, 2000). Es por ello por lo que Lorenzon y sus colaboradores (2017) proponen 3 modelos que son posibles utilizar para aproximar los modelos de flujo de turbulencia.

2.6.1.1. Simulación Numérica Directa

La Simulación Numérica Directa (DNS, por sus siglas en inglés) es una simulación de fluidos computacional en donde las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas numéricamente sin considerar ningún modelo de turbulencia. Busca una solución completa, tridimensional y dependiente del tiempo de las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener los resultados de la velocidad instantánea de un fluido en función de la posición y el tiempo. No obstante, debido a la complejidad de las ecuaciones de transporte, es impráctico para la mayoría de las aplicaciones ingenieriles.

Debido a esto, el DNS ha sido usado únicamente en situaciones específicas de flujo para geometrías simples (e.g. flujo en un canal), y como cualquier uso de CFD, se cuentan con los problemas típicos de su aplicación como lo son la precisión numérica, la convergencia de los resultados, las condiciones de contorno específicas y el uso óptimo de los recursos informáticos.

Aunado a ello, para generar una imagen del campo de flujo turbulento las ecuaciones deben ser resueltas utilizando un mallado con dominio espacial lo suficientemente minúsculo para poder resolver los remolinos individuales que se generan.

Adicionalmente, es necesario utilizar intervalos de tiempo muy reducidos para captar adecuadamente la naturaleza inestable y oscilante del flujo turbulento. Lamentablemente, debido a que la escala de los remolinos minúsculos y la frecuencia de oscilación aumenta en proporcionalmente en función al número de Reynolds del fluido, la demanda computacional resulta elevada.

Aun con número de Reynolds relativamente bajos, los cálculos típicos DNS requieren una resolución entre 5 y 20 millones de nodos en el campo del flujo con un costo computacional entre 250 y 400 horas. Es por ello por lo que en la actualidad el DNS se recomienda principalmente como un sistema informático auxiliar en la verificación de resultados obtenidos a través de análisis experimentales, así como la solución de flujos ideales.

2.6.1.2. Simulación de grandes remolinos.

LES (Simulación de grandes remolinos, por sus siglas en inglés), es un modelo matemático utilizado en dinámica de fluidos computacional. Resuelve numéricamente los

vórtices principales, mientras que los remolinos de la submalla son modelados mediante simulación de grandes remolinos promediados a través de Reynolds.

Debido a que DNS se encuentra limitada por el poder computacional disponible, LES ha sido desarrollado como una herramienta con menor costo computacional que permite aproximar de mejor manera los resultados. Las ecuaciones de flujo son representadas numéricamente, pero se obtienen los resultados pertenecientes a los grandes remolinos.

De esta manera se obtiene un resultado aproximado del comportamiento real del fluido en la que faltan los valores procedentes de los remolinos de baja intensidad, sin embargo, para compensar la deficiencia de estos efectos, así como los ocasionados por la disipación de energía se modelan utilizando términos adicionales de la submalla insertado en las ecuaciones de movimiento.

El método LES parte del hecho de que los efectos de turbulencia de baja escala son débiles y mucho menos críticos que los ocasionados por grandes remolinos, los cuales cargan consigo la mayor cantidad de energía, lo que por ende genera una interacción más fuerte en la estructura analizada. Aunado a ello, los flujos turbulentos de baja intensidad tienden a ser cuasi-isotrópicos, por lo que resulta más sencillo modelarlos por separado.

No obstante, a pesar de todas las simplificaciones hechas, los requisitos informáticos necesarios para llevar a cabo la simulación LES sigue siendo muy elevados.

2.6.1.3. Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds.

En las ecuaciones RANS (Promedio de Reynolds para Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) se promedia todo el flujo y se modela la turbulencia a partir de varios enfoques.

Como se ha observado con anterioridad en los dos métodos precedentes, la solución completa de las ecuaciones de transporte de fluidos resulta laborioso debido a su complejidad matemática.

En la Figura 2.11 se resume gráficamente la complejidad que permite simular cada método.

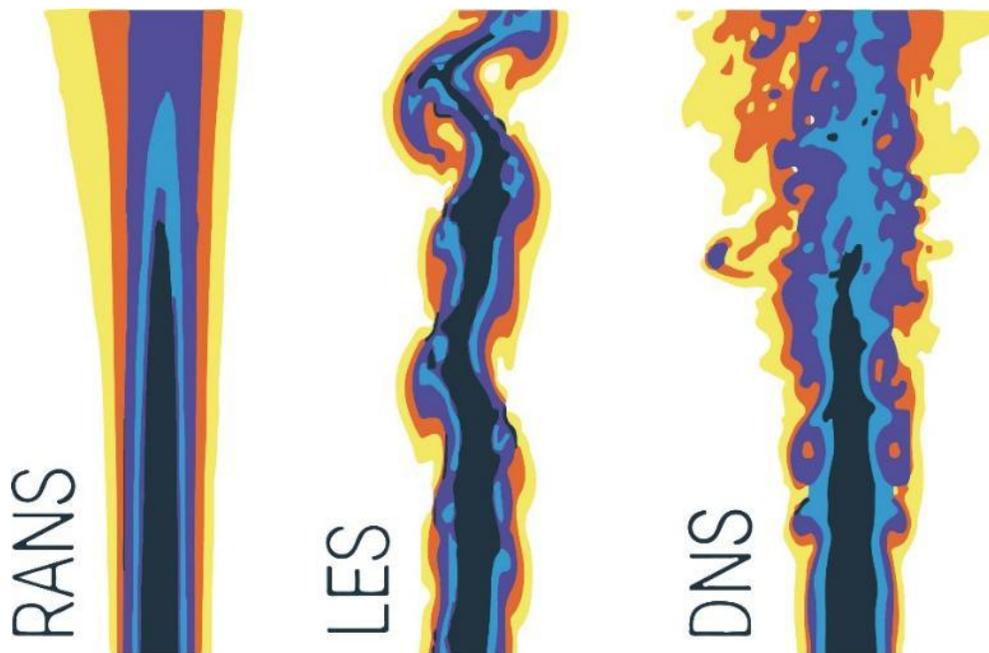


Figura 2.11. Comparativa entre la complejidad que cada método permite modelar, adaptado de (Lange, 2023).

Por otro lado, debido a que en las aplicaciones ingenieriles no siempre es necesario conocer finamente los comportamientos del fluido, para soluciones prácticas únicamente se requieren los efectos ocasionados por la turbulencia promedio, ya que los efectos de todos y cada uno de los remolinos no son de gran interés.

Al enfocarse únicamente en la turbulencia promedio, es posible reducir significativamente el número de nodos necesarios para caracterizar adecuadamente el fluido, lo cual permite reducir el número de mallas hasta en un 80%. Del mismo modo, debido que los eventos con mayor turbulencia ocurren rápidamente, la resolución de las propiedades instantáneas del flujo turbulento requiere intervalos de tiempo en el orden de 0.01 segundos.

Para aplicar esta consideración en la solución de las propiedades de la turbulencia promedio, es necesario reescribir las ecuaciones de continuidad y Navier Stokes utilizando las variables promediadas en el tiempo en lugar de los valores instantáneos.

En la Figura 2.12 se resumen las capacidades entre las metodologías descritas con anterioridad.

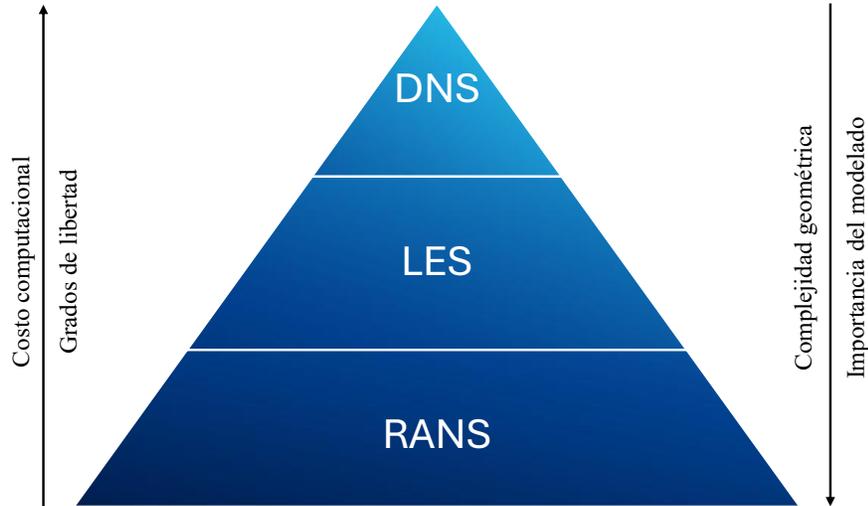


Figura 2.12. Relación entre el costo computacional y la complejidad geométrica en las diferentes simulaciones propuestas, adaptado de (Lange, 2023).

2.7. Modos de falla y vulnerabilidad

Se ha encontrado que después de tifones, huracanes o vientos de grandes magnitudes se han generado grandes daños en los AEU. Estos daños pueden considerarse locales o globales tal como se clasifica en el diagrama descrito en la Figura 2.13.

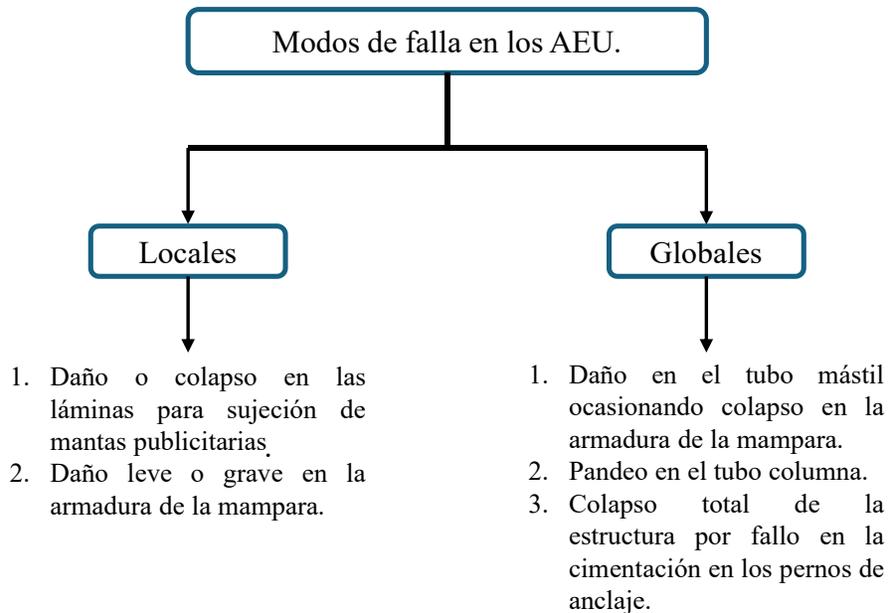


Figura 2.13. Modos de falla en los anuncios espectaculares unipolares.

Una falla local se entiende como un fallo que únicamente afecta una parte específica de la estructura, sin llegar a comprometer la estabilidad general de la misma. Dichas fallas pueden ser deformaciones locales, fallas locales o desprendimientos de elementos no estructurales.

Ejemplos de fallas locales en un AEU son daños en las láminas de recubrimiento de la mampara (Figura 2.14a), o deformaciones leves o graves en la armadura de la mampara (Figura 2.14b).

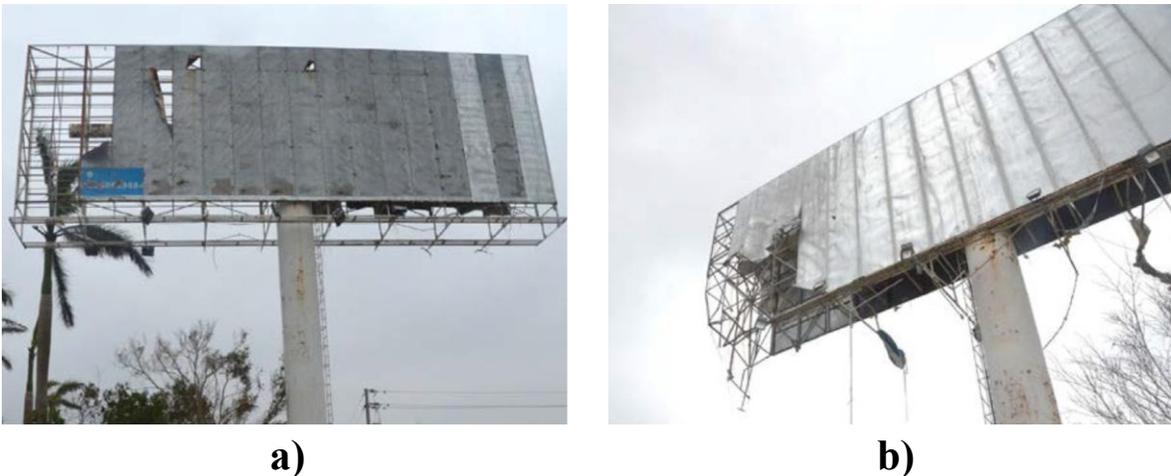


Figura 2.14. Fallas locales en los AEU: a) daños en las láminas de recubrimiento de mampara y b) deformaciones leves o graves en la armadura de la mampara. Extraído de Wen & Xie (2020).

Por otra parte, la falla global de una estructura se refiere a la que afecta la estabilidad e integridad de toda la estructura. Dicho colapso puede ser total o parcial de la estructura, inestabilidad global o fallo en la cimentación.

Las fallas globales en los AEU se categorizan como el daño en el tubo mástil ocasionando colapso en las armaduras (Figura 2.15a), pandeo en el tubo columna que podría inducir al colapso (Figura 2.15b) y colapso total producido fallo en la cimentación (Figura 2.15c)

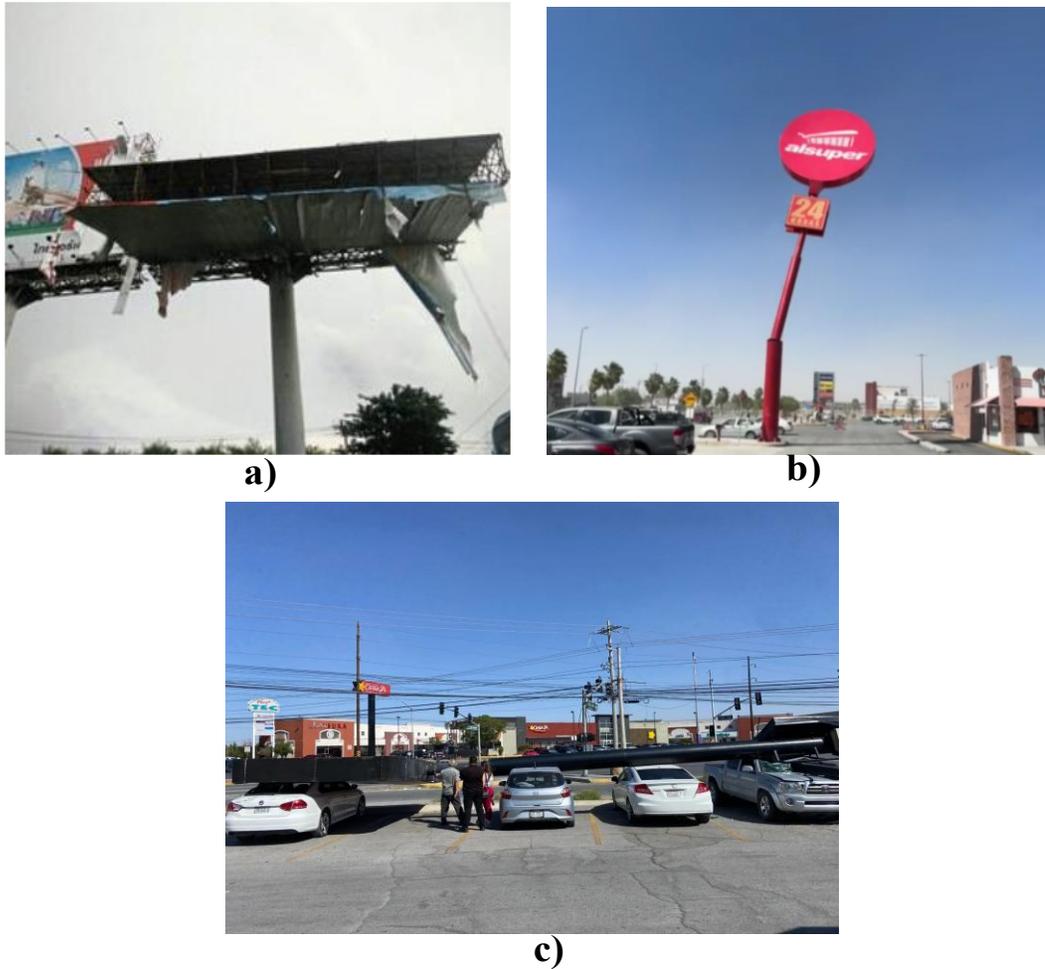


Figura 2.15. Fallas globales en los AEU: a) daño en el tubo mástil ocasionando el colapso de la mampara, extraído de Obinna (2020), b) pandeo en el tubo columna, extraído de Catarino (2024) y c) colapso total producido por un fallo en el anclaje de la cimentación, extraído de Serna (2024).

Las fallas recurrentes en este tipo de estructuras denotan la importancia que tiene realizar investigaciones más precisas acerca del comportamiento de las cargas de viento y los efectos que estas presiones ejercen en las estructuras.

En simulación dinámica se ha encontrado que el método estático empleado actualmente subestima seriamente las respuestas dinámicas reales de los AEU generadas por el viento, pudiendo ocasionar el colapso de la estructura aun con valores de velocidad de viento inferior a la de diseño (Li et al. 2018).

Debido a esto, Salgado-Estrada et al. (2023) propusieron una metodología para determinar la seguridad estructural de los AEU, mediante CFD, calculando los niveles de

seguridad, en donde se encontró que estas estructuras podrían contar con niveles de seguridad por debajo de los niveles mínimos aceptados.

En la bibliografía existente no se han encontrado estudios que analicen el comportamiento estructural de un AEU con mampara desfasada, por lo que es importante realizar una investigación que permita definir la respuesta estructural, así como la relación entre la torsión y la excentricidad de la carga.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis.

Los resultados de una modelación de fluidos computacional de un anuncio espectacular unipolar con mampara desplazada horizontalmente permitirán obtener presiones aplicadas en la mampara y tubo al menos 10% mayores en comparación a los obtenidos mediante el método de análisis estático equivalente.

3.2. Objetivo general.

Generar un modelo de estudio mediante dinámica de fluidos computacional que permita obtener las presiones aplicadas sobre el anuncio espectacular unipolar y a su vez compararlo con los valores obtenidos mediante el método de análisis estático equivalente.

3.3. Objetivos específicos.

1. Proponer una configuración geométrica de un AEU con mampara desfasada con base en la normativa vigente.
2. Evaluar un anuncio espectacular unipolar con la mampara desfasada de acuerdo con la normativa vigente y obtener las presiones aplicadas.
3. Realizar una modelación de fluidos computacional de la estructura propuesta considerando las condiciones locales del sitio.
4. Comparar los resultados de la modelación de fluidos computacional con los obtenidos a partir del método estático equivalente.

4. METODOLOGÍA

En la Figura 4.1 se resume la metodología realizada para llevar a cabo la presente investigación

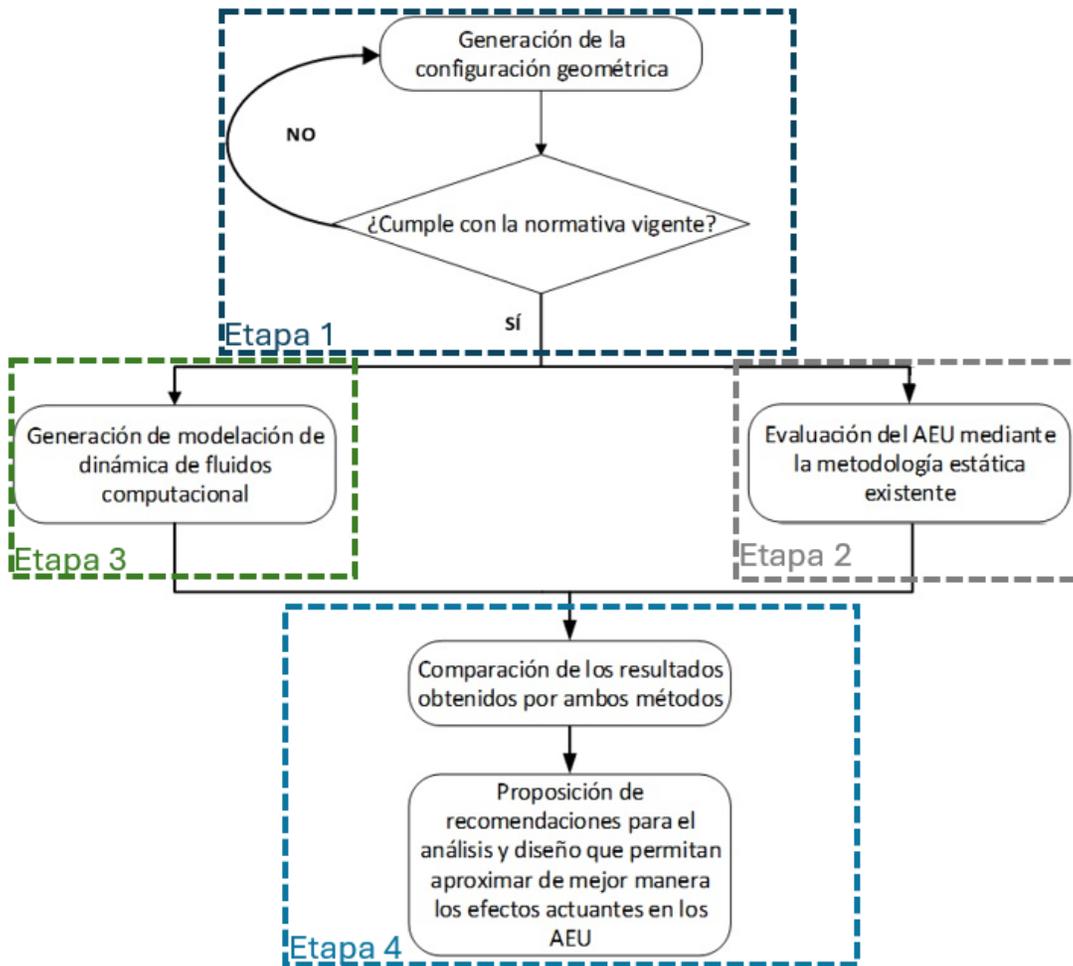


Figura 4.1. Metodología empleada.

4.1. Revisión de la normativa vigente y evaluación de los efectos eólicos.

Para el desarrollo de esta investigación se estudiaron los efectos de viento sobre un AEU con mampara desfasada a través de la normativa vigente y mediante una dinámica de fluidos computacional. A continuación, se describe detalladamente el proceso que se utilizó para realizar el trabajo.

4.1.1. Revisión de normativa vigente.

Se revisó la normativa vigente a nivel nacional y estatal con respecto al diseño y construcción de los AEU para determinar las metodologías de diseño, así como las dimensiones máximas y mínimas.

A nivel nacional, existe la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento (NTCDV) 2023, así como el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (MDOCDV) publicado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el año 2020.

En las NTCDV se especifica la metodología para obtener los factores de exposición local y por topografía, así como la velocidad de diseño, la presión dinámica de la base y la presión sobre el espectacular. Por su parte, en el MDOCDV se presenta una metodología para el análisis dinámico por viento, el cual consiste en calcular las cargas estáticas equivalentes que actúan sobre las estructuras sensibles a los efectos dinámicos producidos por las turbulencias del flujo.

4.1.2. Evaluación de las metodologías para análisis y diseño existentes.

De acuerdo con lo encontrado en las normativas vigentes, se decidió utilizar las NTCDV para obtener las cargas actuantes por viento sobre la estructura.

4.1.3. Cálculo de la velocidad y presión de viento

Para la velocidad de viento, es necesario en primera instancia conocer la velocidad regional de viento, la cual se encuentra en función del periodo de retorno a utilizar, en AEU es común utilizar un periodo de retorno igual a los 50 años.

Una manera de obtener la velocidad regional de viento es hacer uso de los mapas de isotacas para velocidades regionales para dicho periodo de retorno generados por la Comisión Federal de Electricidad (Figura 4.2).

Sin embargo, debido a que este método podría no ser del todo preciso, es posible también conocer dicha velocidad a través del software Sistema Viento V2.0 diseñado por la CFE, únicamente considerando la ciudad y el periodo de retorno (Figura 4.3).

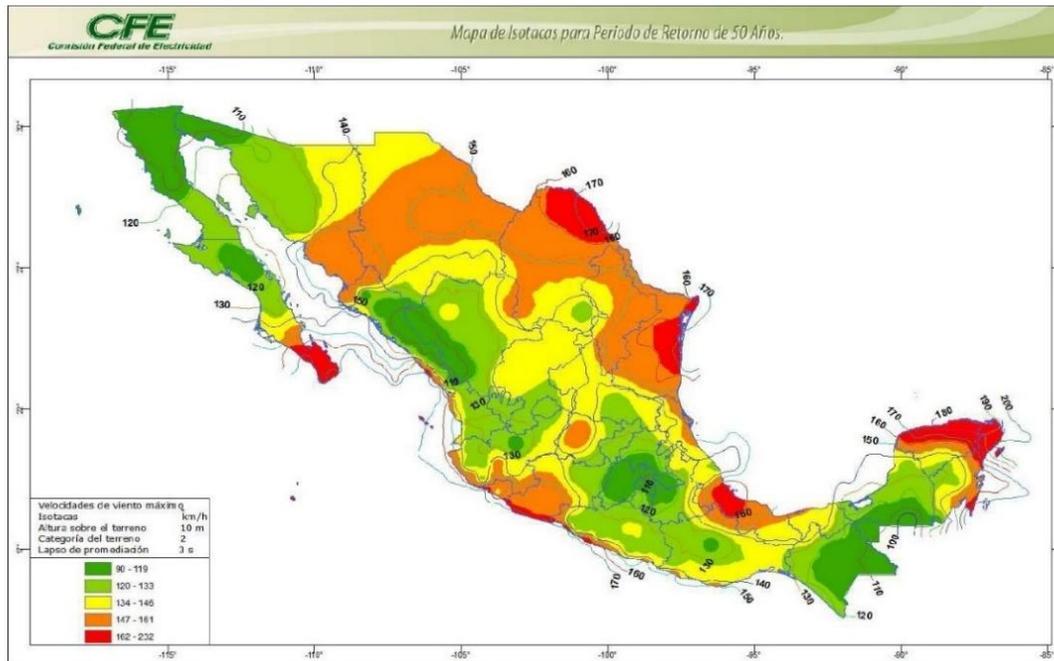


Figura 4.2. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años, extraído de (CFE, 2020).

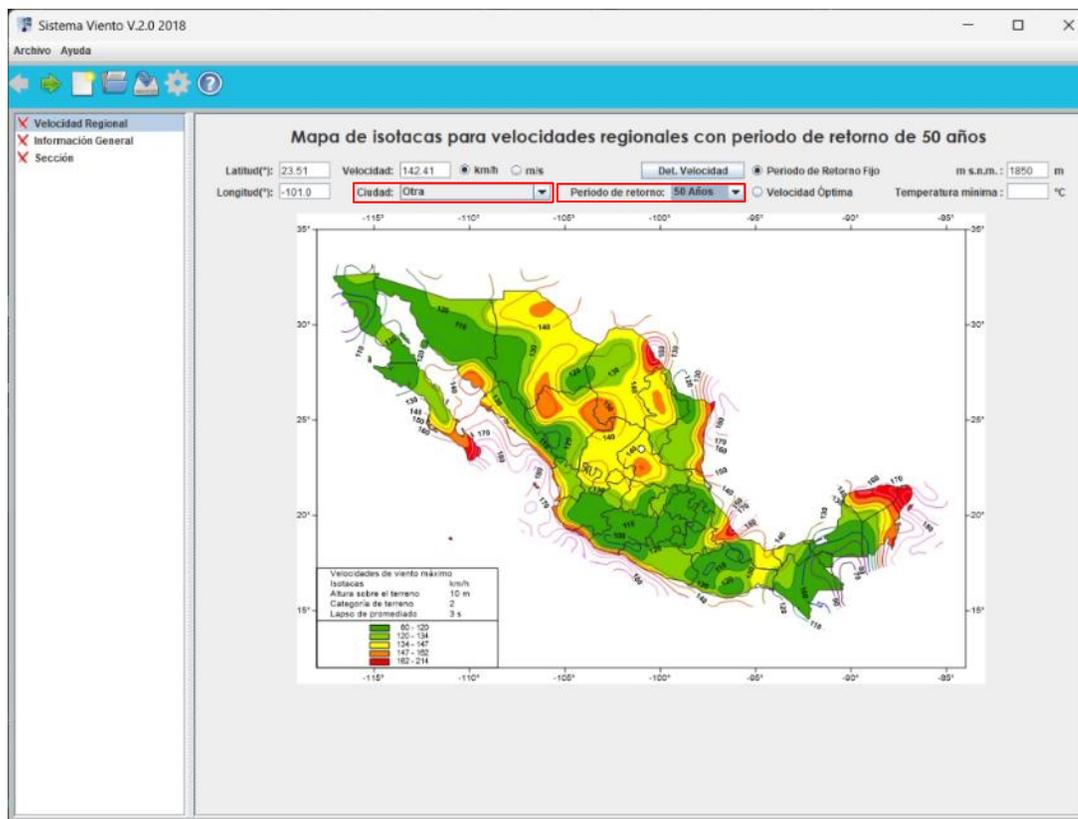


Figura 4.3. Entorno del usuario para obtener la velocidad regional.

Una vez conocida la velocidad regional para el periodo de retorno definido, fue posible conocer la velocidad de diseño de acuerdo con la ecuación (2.3), lo que permite

obtener la presión estática equivalente a través la metodología indicada en las NTCDV, la cual es obtenida mediante la ecuación (2.7) la cual a su vez está función de las ecuaciones (2.8) y (2.9).

4.2. Propuesta geometría propuesta a partir de la normativa vigente.

Se seleccionó una configuración geométrica que no rebasara la altura total máxima de 26 m, así como una dimensión no mayor a los 96 m² en la mampara para cumplir con la normativa vigente en la ciudad de Querétaro, Querétaro.

4.2.1. Propuesta de dimensiones del AEU.

Se propuso altura total del tubo columna, entre 5 a 20 m, dimensiones de mampara con una base entre 8 a 12 m, una altura de 4 a 10 m y un ancho entre 1 a 2 m, con base en la normativa vigente. Para el desfase se consideró un recorrido entre los 2 a 4 metros con respecto al eje del tubo columna.

4.2.2. Propuesta de secciones del tubo columna y tubo mástil.

Se seleccionó una sección tubular circular para el tubo columna y el tubo mástil, con un diámetro entre los 40 y 140 cm y espesor de la pared del tubo entre los 6.3 hasta los 25.4 mm. Todo esto en función del momento actuante y el módulo de sección.

4.2.3. Propuesta de sección en la armadura de la mampara.

Se propusieron secciones en ángulo de lados iguales, con la dimensión de los lados entre los 5 a 10 cm y un espesor entre los 50 a los 100 mm o en tubo rectangular, con una base entre los 5 a 10 cm, altura entre los 5 a 10 cm y espesor del tubo entre los 1.9 mm a los 6.3 mm, para la armadura de la mampara.

4.3. Realización de una modelación de fluidos computacional

Mediante el software ANSYS Fluent, se generó una modelación de fluidos computacional que permitió evaluar las presiones de viento en la estructura. Para ello, fue necesario seguir el procedimiento descrito en la Figura 4.4.

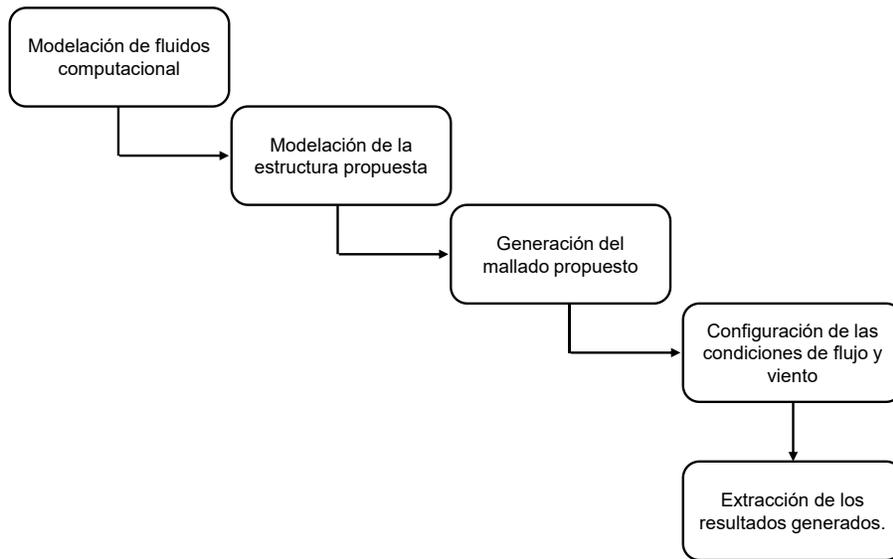


Figura 4.4. Metodología empleada para obtener las presiones de viento aplicadas sobre el AEU.

4.3.1. Generación del modelo geométrico propuesto.

Para generar el modelo geométrico, es posible mediante el entorno propio de ANSYS Fluent o exportarlo a través de algún programa de modelado 3D, como podría ser SketchUp.

Una vez teniendo la geometría modelada, fue necesario crear un recinto, el cual actúa como la frontera por donde el fluido podrá circular libremente hasta encontrarse con el sólido, en este caso, el anuncio espectacular.

Tanto la exportación de la geometría, como la generación del recinto, se crea a través del módulo *Geometry*.

Es de suma importancia configurar un tamaño de recinto o dominio de fluido que permita obtener resultados precisos y evitar efectos no deseados. Algunos autores como (Abu-Zidan et al. 2021) proponen recomendaciones para la distancia río arriba (de la entrada de aire al objeto), distancia río abajo (del objeto a la salida de aire) así como el ancho y la altura del dominio.

Para esta investigación se decidió de acuerdo con lo encontrado en el estado del arte (Blocken, 2015; Kim et al. 2017; Meng et al. 2018) utilizar el siguiente criterio:

- Distancia río arriba igual a $5H$,
- Distancia río abajo igual a $10H$,
- Ancho del dominio igual a $5H$ y
- Altura del dominio igual a $3H$ (por arriba del anuncio).

Donde H es igual a la altura total del anuncio.

La importancia de una adecuada distancia río arriba radica en la necesidad de lograr un desarrollo correcto del fluido antes de que este llegue a la estructura para evitar que las características del fluido se vean alteradas por las condiciones en la entrada del dominio.

Por otra parte, el hecho de contar con una distancia río abajo adecuada permite que las perturbaciones generadas por el impacto del fluido sobre la estructura se disipen, facilitando al flujo escapar sin interferencia alguna.

Tanto para el ancho como para la altura del dominio alrededor del objeto, es necesario contar con una distancia tal que evite que los efectos generados por el impacto del fluido sobre las paredes del recinto alteren los resultados obtenidos en la estructura.

Es necesario ir observando si el tamaño del recinto permite o no un comportamiento adecuado del fluido y en caso contrario corregir y ajustar para poder encontrar resultados con un grado de aproximación aceptable.

4.3.2. Aplicación de las condiciones de frontera en CFD.

Posterior a ello, en el recinto se configuró la entrada y salida de aire, así como las superficies sólidas en donde el fluido impactará y a su vez ejercerá una presión en dicha superficie. En la Figura 4.5 se observa el entorno de usuario del programa utilizado en el módulo *Mesh* que permite hacer tales configuraciones.

En este punto fue posible generar el mallado tanto del recinto como del AEU, en donde se debe escoger un tamaño de malla el cual, entre menor sea, más preciso será, sin embargo, tendrá mayor costo computacional, por lo que la elección dependerá en gran medida del poder informático disponible.

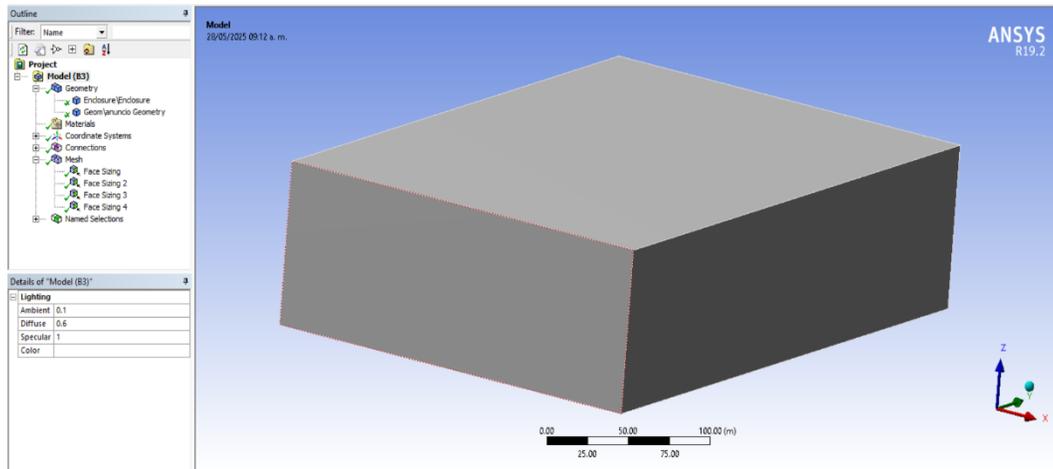


Figura 4.5. Entorno de usuario del módulo *Mesh* de ANSYS Workbench

De manera análoga, fue necesario configurar la velocidad de diseño, la cual se obtuvo de acuerdo con el apartado 4.1.3 y se adicionó al software mediante el módulo *Fluent* en el submódulo *Solution*. En la Figura 4.6 se observa el entorno de usuario de dicho módulo.

En este mismo módulo, se permite escoger el número iteraciones que se requieren que el software realice para llegar a un resultado aceptable. Con las condiciones de frontera configuradas adecuadamente, se podía continuar con la simulación de fluidos computacional para obtener las presiones que ejercen el viento sobre la mampara y el tubo columna de la estructura estudiada.

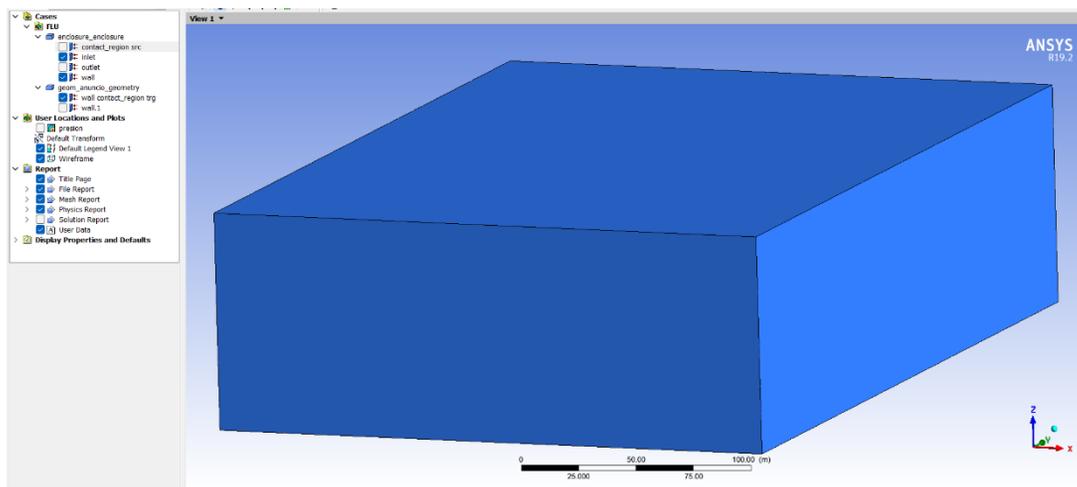


Figura 4.6. Entorno de usuario del módulo *Results* de ANSYS Workbench.

4.3.3. Extracción de las presiones de viento obtenidas en CFD.

Con las condiciones de frontera definidas, se da inicio a la obtención de resultados, a través del botón *Calculate*, mediante el cual se podrá observar la diferencia entre los resultados obtenidos entre cada paso de iteración, lo que permite conocer si dichos resultados son o no aceptables. El módulo *Results* (Figura 4.7) permite observar diferentes efectos que genera el fluido, como lo son la velocidad, la presión o la densidad

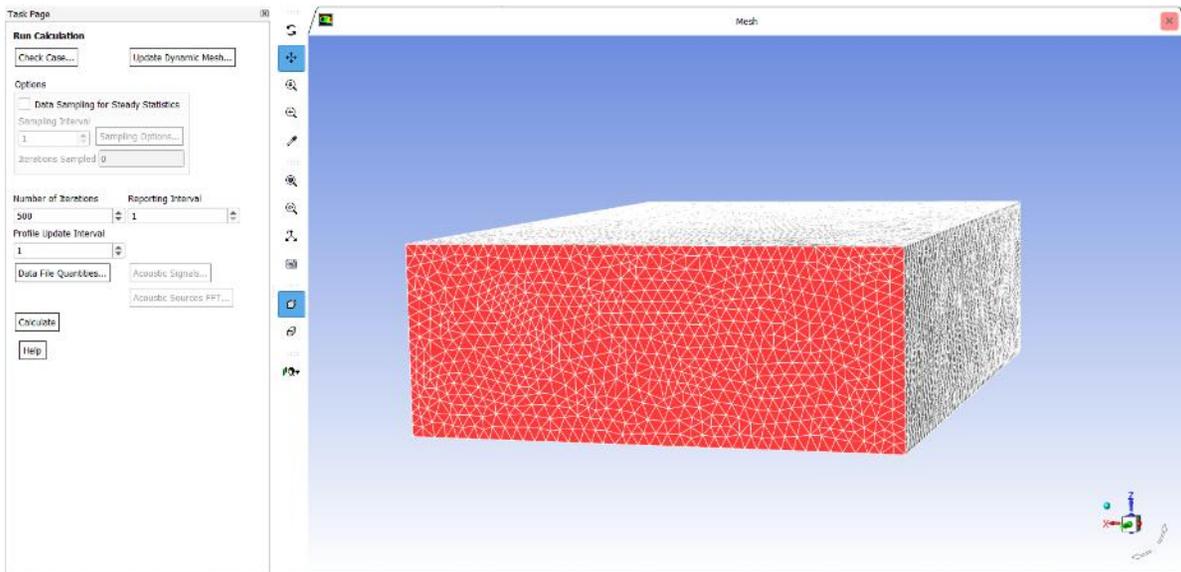


Figura 4.7. Entorno de usuario del módulo *Fluent* de ANSYS Workbench.

4.4. Comparación de los resultados obtenidos.

Con las presiones conocidas mediante el método estático, dinámico y CFD, lo subsecuente era compararlas propiamente, así como los efectos que generan dichas presiones sobre la estructura. En la Figura 4.8 se observa los pasos a seguir para llevar a cabo la comparativa propuesta, siendo lo más importante el momento flexionante que actúa sobre el tubo columna de la estructura, debido a que podría ocasionar una falla por resistencia en la sección predeterminada, así como volteó en consecuencia de una cimentación deficiente.

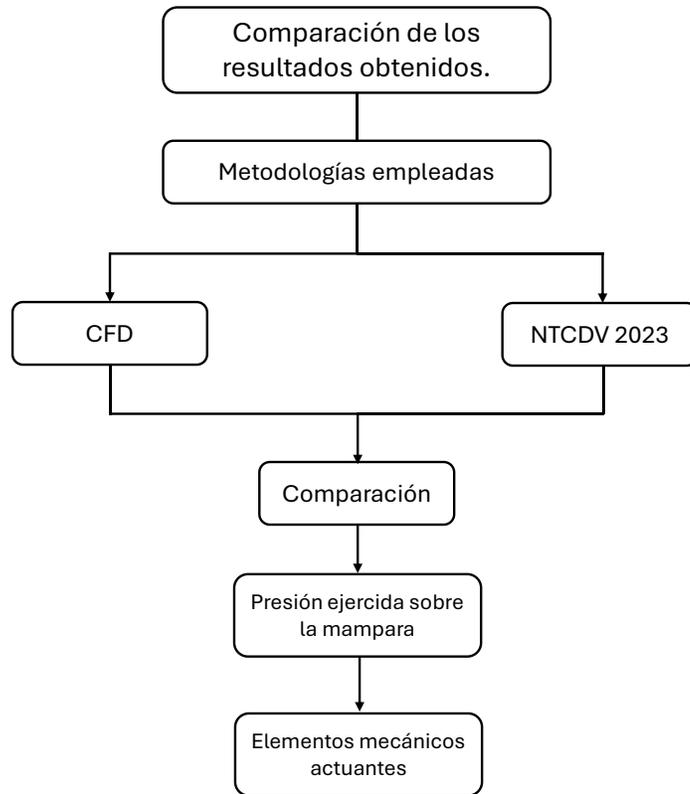


Figura 4.8. Metodología empleada para comparar los resultados obtenidos.

4.4.1. Obtener los elementos mecánicos mediante ambas metodologías.

Una vez conocida la presión estática equivalente, así como las secciones estructurales, es posible obtener los elementos mecánicos, para ello se utilizó el programa Mechanical APDL de ANSYS, descrito en el

APÉNDICE en donde se generó un programa de código que permita analizar distintas geometrías y cargas aplicables para un AEU.

Debido a que el programa se encuentra parametrizado, únicamente es necesario introducir los datos tales como dimensiones, secciones geométricas y carga de viento sobre la mampara. Las ventanas de variables paramétricas se observan en la Figura 4.9.

Una de las características más importantes de este programa es el hecho de que permite desfasar horizontalmente la mampara, lo que permite evaluar este tipo de estructuras con carga excéntrica.

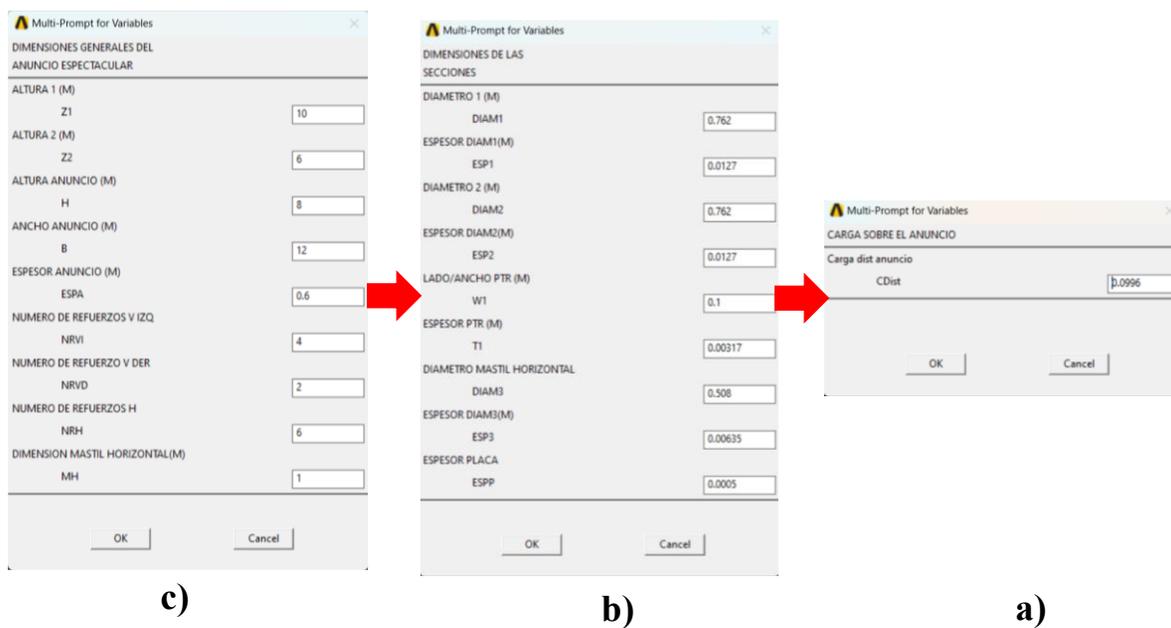


Figura 4.9. Ventanas de variables paramétricas de Mechanical APDL: a) dimensiones generales del AEU, b) propiedades geométricas de las secciones y c) carga distribuida sobre el anuncio.

Una vez configurado las dimensiones generales del anuncio, las secciones transversales de la estructura y la carga distribuida de viento sobre el anuncio, el programa realizó el análisis estructural mediante el cual se extraen los elementos mecánicos tales como:

- Fuerza axial
- Fuerza cortante
- Momento flexionante

- Momento torsionante,

Así como también, los desplazamientos que se presentaran en la estructura, producto de la carga aplicada. De esta manera, al conocer los elementos mecánicos ocasionados por la carga de viento obtenida en ambas metodologías, es posible observar la variación existente.

4.4.2. Revisión de diferencias en los resultados entre los obtenidos con la normativa vigente y la modelación de fluidos computacional.

En este apartado se comparó la variación existente entre cada método, así como también si dicha variación resulta significativa en el comportamiento y diseño de los AEU.

4.4.3. Proponer recomendaciones para el análisis y diseño.

Se revisaron mediante ambas metodologías las presiones de viento obtenidas, así como también los elementos mecánicos que ocasionan dichas cargas, seleccionando, de acuerdo con el análisis a realizar siempre la más desfavorable para garantizar la seguridad y resiliencia de la estructura.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Revisión de la normativa vigente y evaluación de los efectos eólicos.

5.1.1. Revisión de normativa vigente.

A nivel nacional, se encontraron tanto en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV) 2023 como en el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (MDOCDV) 2020 metodologías de análisis estático y dinámico de viento.

A nivel estatal, se encontró en la normativa vigente el Reglamento de Imagen Urbana de Querétaro (Ayuntamiento de Querétaro, 2017). Uno de los datos más importantes de dicho reglamento es las dimensiones máximas permitidas de altura igual a 26 m y área máxima de mampara igual a 96 m².

5.1.2. Evaluación de las metodologías para análisis y diseño existentes.

De acuerdo con lo encontrado en las normativas vigentes, se decidió utilizar la metodología propuesta por las NTCDV 2023, en lugar de la indicada en el MDOCDV 2020 debido a que es la más reciente en el país. No obstante, las metodologías presentes en ambos reglamentos son muy similar, por lo que los resultados obtenidos podrían no varían de manera considerable entre uno y otro.

5.1.3. Cálculo de la velocidad y presión de viento.

5.1.3.1. Método estático equivalente.

Antes de proceder con el cálculo, es necesario conocer los distintos valores presentes en la normativa de CFE de acuerdo con la rugosidad del terreno, para esta investigación se consideró categoría 2, por lo que utilizaron los siguientes valores según lo descrito en los apartados 2.3 y 2.4 del presente trabajo.

De la Tabla 2.2:

- $c=1.00$
- $\alpha=0.095$
- $\delta(m)=350$ m

De la Tabla 2.3:

- $\bar{b}=1.00$
- $\alpha'=0.14$

De la Tabla 2.4:

- $\bar{d}=0.17$
- $\bar{\alpha}=0.52$
- $Z_0(\text{m})=0.020$
- $Z_{\text{mín}}(\text{m})=2.00$
- $Z_{\text{máx}}(\text{m})=200$

Los valores que afectan a la velocidad de diseño son dos: el factor de topografía y el factor de exposición total. Para el factor de topografía debido a que el terreno se consideró con un pendiente menor que el 5%, se consideró igual a 1.00, según lo indicado en la Tabla 2.1.

Para poder obtener el factor de exposición local, primero fue necesario conocer la altura de referencia, la cual se calculó de acuerdo con lo indicado en la Figura 2.7, como se muestra a continuación:

$$Z_s = 16 \text{ m} + \frac{8 \text{ m}}{2} = 20 \text{ m}$$

Con esto dado, fue posible conocer el factor de exposición local en función a la ecuación (2.5):

$$F_{rz} = 1.00 \left[\frac{20 \text{ m}}{10} \right]^{0.095} = 1.07$$

La velocidad de diseño de viento se calcula de acuerdo con la ecuación (2.3), donde al sustituir los valores obtenidos previamente se obtiene que:

$$V_D = (1.0)(1.07)(131.6 \text{ km/h}) = 140.81 \text{ km/h}$$

La presión dinámica de base de viento, ecuación (2.8), se encuentra en función de la velocidad de diseño obtenida con anterioridad y el factor de corrección por temperatura y altura con respecto a nivel del mar, ecuación (2.9).

Para conocer el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar es indispensable conocer la presión barométrica a la altura de diseño de acuerdo con la ecuación (2.10).

Altura con respecto a nivel del mar $H_c = 5971.13$ ft

Valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias $\tau = 8$ °C

Sustituyendo en la ecuación (2.10).

$$\Omega = 760 \text{ mmHg} (1 - 6.87535 \times 10^{-6} (5971.13 \text{ ft}))^{5.2561} = 609.71 \text{ mmHg}$$

Sustituyendo en la ecuación (2.9)

$$G = \frac{0.392(609.71)}{273 + 8} = 0.89$$

Con la velocidad de diseño y el factor de corrección, es posible determinar la presión dinámica aplicada sobre la base de acuerdo con la ecuación (2.5)

Sustituyendo en la ecuación (2.8):

$$q_z = 0.0048(0.89)(140.81 \text{ km/h})^2 = 84.70 \text{ kg/m}^2$$

Antes de poder calcular la presión aplicada sobre el anuncio, primeramente, era necesario calcular el coeficiente de forma del anuncio.

$$C_{pn} = 1.30 + 0.5[0.3 + \log_{10}(b/h)](0.8 + h/H)$$

Donde al sustituir en función a las medidas acorde con la Figura 2.7 se obtuvo que:

$$C_{pn} = 1.30 + 0.5 \left[0.3 + \log_{10} \left(\frac{8 \text{ m}}{12 \text{ m}} \right) \right] \left(0.8 + \frac{8 \text{ m}}{24 \text{ m}} \right) = 1.41$$

Con todo esto dado, fue posible conocer la presión aplicada de acuerdo con la ecuación (2.7)

$$P_n = 1.41[1 - (1 - 1)^2](84.70 \text{ kg/m}^2) = 119.43 \text{ kg/m}^2$$

Esto significa que la presión estática equivalente ejercida sobre el anuncio es igual a 113.59 kg/m^2 .

5.1.3.2. Método dinámico

De igual manera, es posible conocer la presión dinámica equivalente, para esto se hace uso de la ecuación (2.15).

De primera instancia es necesario conocer el factor de exposición en función a la ecuación (2.13), donde al sustituir valores se obtiene que:

$$F'_{rz} = 0.702(1.00) \left(\frac{20 \text{ m}}{10} \right)^{0.14} = 0.77$$

Con esto dado, es posible conocer la velocidad media de diseño de acuerdo con la ecuación (2.11), encontrando un valor igual a:

$$V'_D = \frac{(1.00)(0.77)(131.6 \text{ km/h})}{3.6} = 28.27 \text{ m/s}$$

Posterior a ello, se calculó la intensidad de turbulencia a la altura de referencia de acuerdo con la ecuación (2.17).

$$I_v(Z_s) = 0.17 \left(\frac{20 \text{ m}}{10} \right)^{-0.14} = 0.15$$

Después, se obtiene la longitud de la escala de turbulencia, según la ecuación (2.19):

$$L(Z_s) = 300 \left(\frac{20 \text{ m}}{200} \right)^{0.52} = 90.60 \text{ m}$$

Siguiendo con ello, se calculó el factor de respuesta de fondo en función a la ecuación (2.20), encontrando un valor igual a:

$$B_c^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left(\frac{8 \text{ m} + 12 \text{ m}}{90.60 \text{ m}} \right)^{0.63}} = 0.74$$

Después, se obtuvo el espectro de densidad de potencia del viento, el cual según la ecuación (2.21) es:

$$S_L(Z_s, n_{1,x}) = \frac{6.8 \left(\frac{(1.55 \text{ Hz})(90.60 \text{ m})}{28.27 \text{ m/s}} \right)}{\left[1 + 10.2 \left(\frac{(1.55 \text{ Hz})(90.60 \text{ m})}{28.27 \text{ m/s}} \right) \right]^{5/3}} = 0.05$$

Seguidamente, se calculó la frecuencia reducida considerando la dimensión de la altura de la mampara, n_h y la función de admitancia aerodinámica para la forma modal fundamental en función a la altura de la mampara con las ecuaciones (2.22) y (2.23), respectivamente.

$$n_h = \frac{4.6(8 \text{ m})(1.55 \text{ Hz})}{28.27 \text{ m/s}} = 2.02$$

$$R_h(n_h) = \frac{1}{2.02} - \frac{1}{2(2.02)^2} (1 - e^{-2(2.02)}) = 0.38$$

De manera análoga, se obtuvieron los mismos valores, cambiando únicamente la altura por la base de la mampara, utilizando las ecuaciones (2.24) y (2.25).

$$n_b = \frac{4.6(12 \text{ m})(1.55 \text{ Hz})}{28.27 \text{ m/s}} = 3.03$$

$$R_b(n_b) = \frac{1}{4.03} - \frac{1}{2(4.03)^2} (1 - e^{-2(2.02)}) = 0.28$$

El factor de respuesta de resonancia se calculó según la ecuación (2.26), considerando la relación de amortiguamiento total en la dirección transversal del viento, se consideró igual al de una chimenea de acero soldada, sin recubrimiento y sin aislamiento térmico exterior ($\zeta_{t,y} = 0.002$), según las recomendaciones del MDOCDV (CFE, 2020).

$$R_c^2 = \frac{\pi}{4(0.002)} (0.05)(0.38)(0.28) = 1.92$$

Posteriormente, la frecuencia de cruces por cero, también llamada tasa media de oscilaciones se obtuvo en función de la ecuación (2.27):

$$v = (1.51 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{1.51^2}{0.72^2 + 1.51^2}} = 1.32 \text{ Hz}$$

Por lo que, el factor pico, según la ecuación (2.28), tiene un valor igual a:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600(1.27 \text{ Hz}))} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(600(\text{Hz}))}} = 3.81$$

Con todo lo anterior dado, ya era posible obtener el factor de respuesta de ráfaga, según lo observado en la ecuación (2.16), obteniendo que:

$$F_{RR} = 1 + 2(3.81)(0.15)\sqrt{(0.74)^2 + (1.51)^2} = 2.92$$

Para finalmente, obtener la presión estática equivalente en función del factor de ráfaga se encuentra según la ecuación (2.16):

$$P_{eq} = \frac{115.94 \text{ kg/m}^2}{(17(0.15))} (2.75) = 159.48 \text{ kg/m}^2$$

La presión actuante según el método dinámico es por lo menos 33% mayor que la encontrada en el método estático, no obstante, debido a que la normativa te permite usar el método estático, la comparativa más importante será entre CFD y este último.

5.2. Propuesta geometría propuesta a partir de la normativa vigente.

5.2.1. Propuesta de dimensiones del AEU.

Debido a lo encontrado en la normativa vigente en el estado de Querétaro y en función o lo observado en la práctica, se seleccionó una altura total de 24 m, con dimensiones de mampara igual a 8 m de altura por 12 m de ancho. Dicha propuesta geométrica puede observarse a detalle en la Figura 5.1.

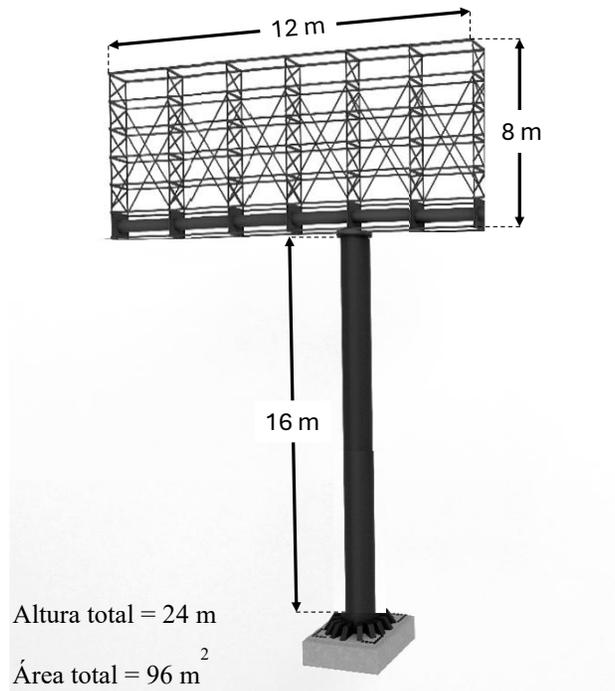


Figura 5.1. Geometría del AEU escogida.

5.2.2. Propuesta de secciones del tubo columna y tubo mástil.

Para seleccionar el tubo columna, se utilizó el momento actuante sobre la base, el cual posteriormente se divide entre el esfuerzo de fluencia del acero comúnmente utilizado para perfiles tubulares circulares HSS.

Para conocer el momento actuante es necesario obtener la fuerza total aplicada sobre el anuncio, para ello, es necesario multiplicar la presión neta del anuncio por el área de la mampara, se puede utilizar tanto la presión estática como dinámica, para este caso se optó por utilizar la estática.

$$P = P_n A = (119.43 \text{ kg/m}^2) (96 \text{ m}^2) = 11,465.28 \text{ kg}$$

Donde A, es el área de la mampara. Ahora es posible conocer el momento actuante multiplicando la fuerza por el brazo de palanca, el cual será la distancia entre el centroide de la cartelera y la base.

$$M = Pd = (11,465.28 \text{ kg})(2000 \text{ cm}) = 22,930,560 \text{ kg-cm}$$

Con el momento actuante, es posible calcular el módulo plástico requerido con la siguiente ecuación.

$$Z_{requerido} = \frac{M_A}{\phi \cdot F_u} = \frac{(22,930,560 \text{ kg-cm})}{0.9 \cdot 4080 \text{ kg/cm}^2} = 6244.71 \text{ cm}^3$$

Con el valor del módulo de sección plástico (Z) requerido se preselecciona un perfil HSS circular 36" x 0.37" con un $Z=6,647.59 \text{ cm}^3$.

De manera análoga, también es posible estimar la sección del tubo mástil.

$$Z_{requerido} = \frac{\lambda \cdot M_A}{\phi \cdot F_u} = \frac{(1078290.0 \text{ kg-cm})}{0.9 \cdot 4080 \text{ kg/cm}^2} = 323.017 \text{ cm}^3$$

Con el valor del módulo plástico, se selecciona un perfil HSS circular 20" x 0.25" mm con un $Z= 1,488.84 \text{ cm}^3$. Aun cuando se pudo usar un perfil con un menor diámetro para economizar, debido al procedimiento constructivo, es necesario contar con un tubo mástil de dimensiones parecidas al propuesto.

5.2.3. Propuesta de sección en la armadura de la mampara.

Para la armadura, se propuso un perfil HSS 4"x1/8", debido a que estos únicamente se encuentran sometidos a fuerza axial. De igual manera, se pudo haber utilizado ángulos de lados, redondos lisos o algún otro perfil que fungiera como armadura con una relación de esbeltez aceptable. En la Figura 5.2 se resumen las secciones propuestas.

Adicionalmente, se aclara que la configuración geométrica de la armadura se propuso en función a lo observado en campo, sin embargo, no es la única opción válida para utilizar para el modelado de estas estructuras, existe sin fin de arreglos geométricos que garantizan la seguridad y funcionalidad de estas.

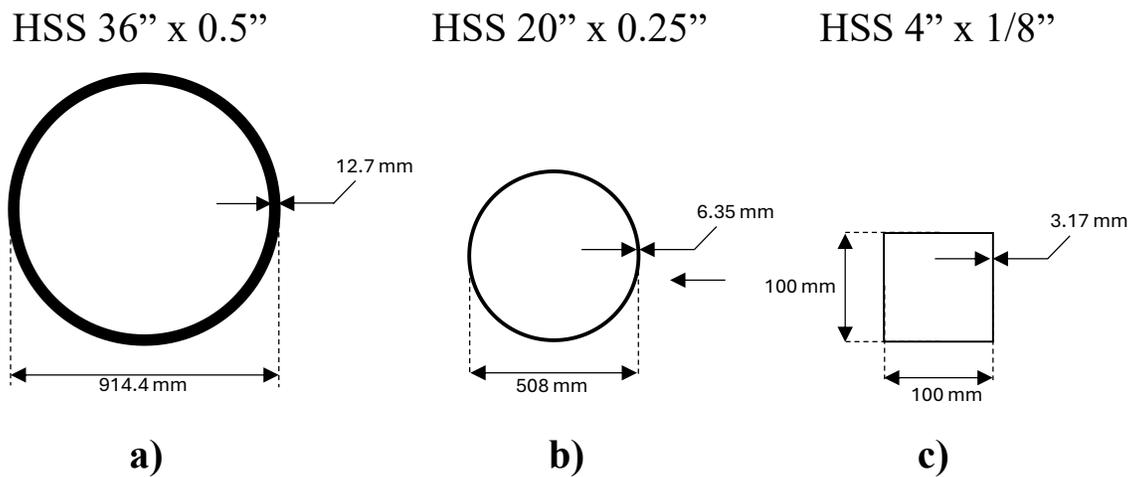


Figura 5.2. Secciones propuestas para el análisis estructural del AEU: a) sección transversal del tubo columna, b) sección transversal del tubo mástil y c) sección transversal de la armadura de la mampara.

5.3. Realización de una modelación de fluidos computacional.

Mediante el software ANSYS Fluent, se generó una modelación de fluidos computacional que permitió evaluar las presiones de viento en la estructura. Para ello, fue necesario seguir el procedimiento descrito en la Figura 5.3

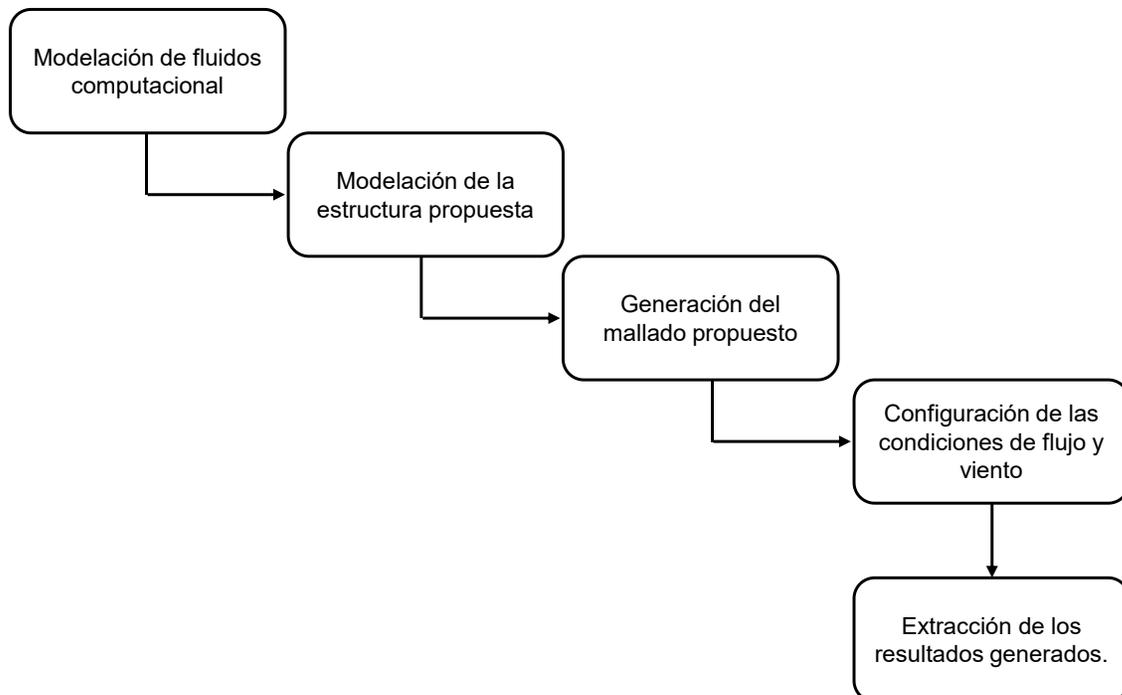


Figura 5.3. Metodología empleada para obtener las presiones de viento aplicadas sobre el AEU.

5.3.1. Generación del modelo geométrico propuesto.

En este trabajo, se modeló a través de SketchUp la configuración geométrica seleccionada y se exportó a ANSYS Fluent (Figura 5.4) para generar el mallado y la configuración de las condiciones iniciales de la simulación.

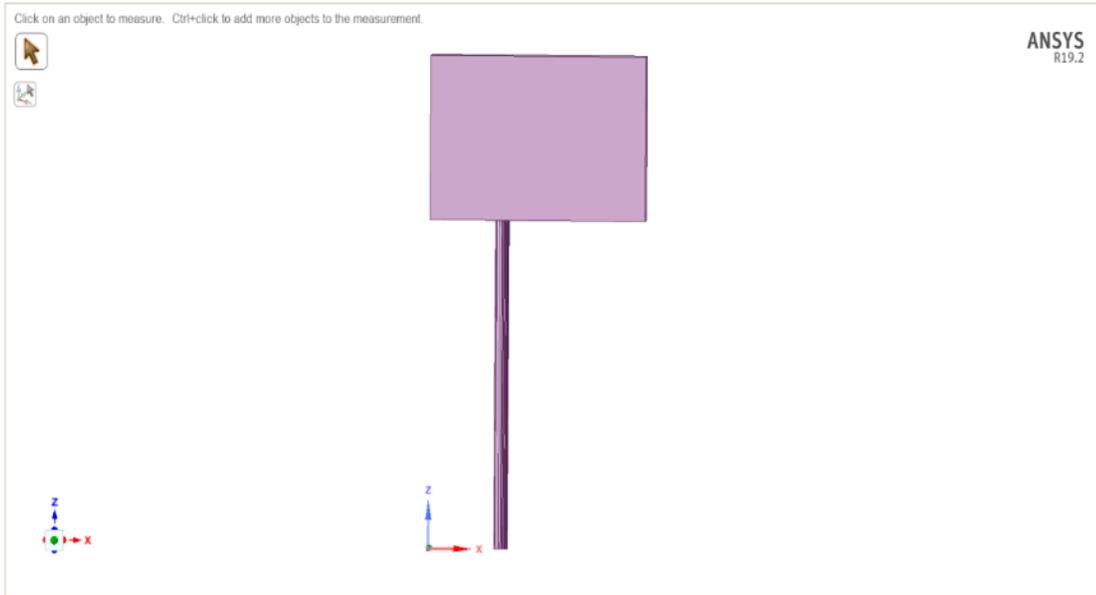


Figura 5.4. Geometría del AEU exportada a ANSYS Workbench.

El recinto se creó con medidas 24x 42x30 m con respecto a los ejes X,Y y Z como se observa en la Figura 5.5.

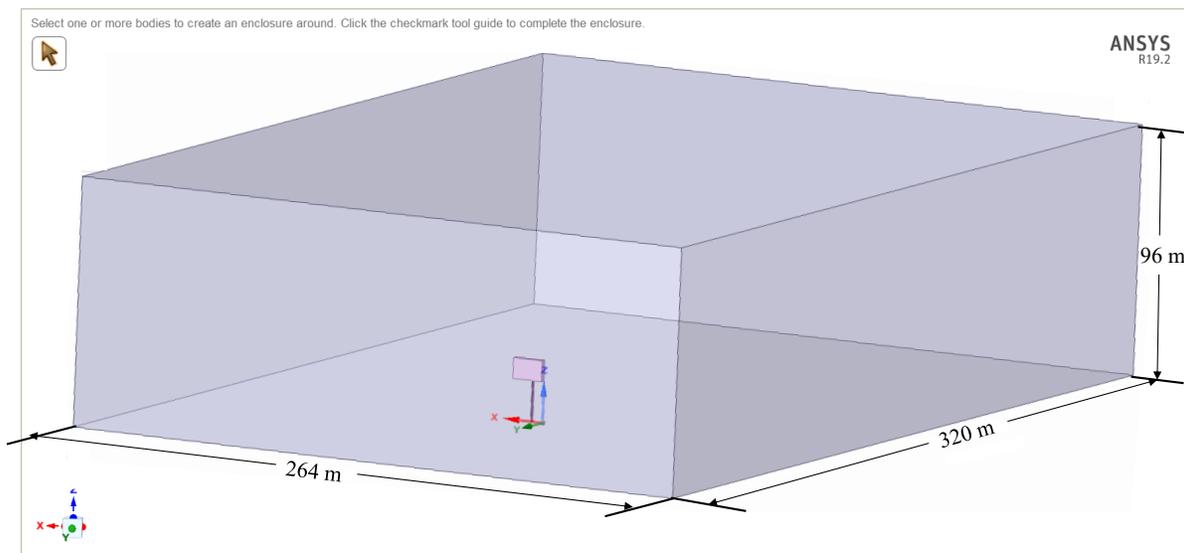


Figura 5.5. Dimensiones del recinto para la simulación de fluidos computacional.

5.3.2. Aplicación de las condiciones de frontera en CFD.

Posterior a ello, en el recinto se configuró la entrada (Figura 5.6a) y salida de aire (Figura 5.6b), así como las superficies sólidas en donde el fluido impactará y a su vez ejercerá una presión en dicha superficie, en este caso, los bordes interiores, así como todas las paredes exteriores del AEU (Figura 5.6c).

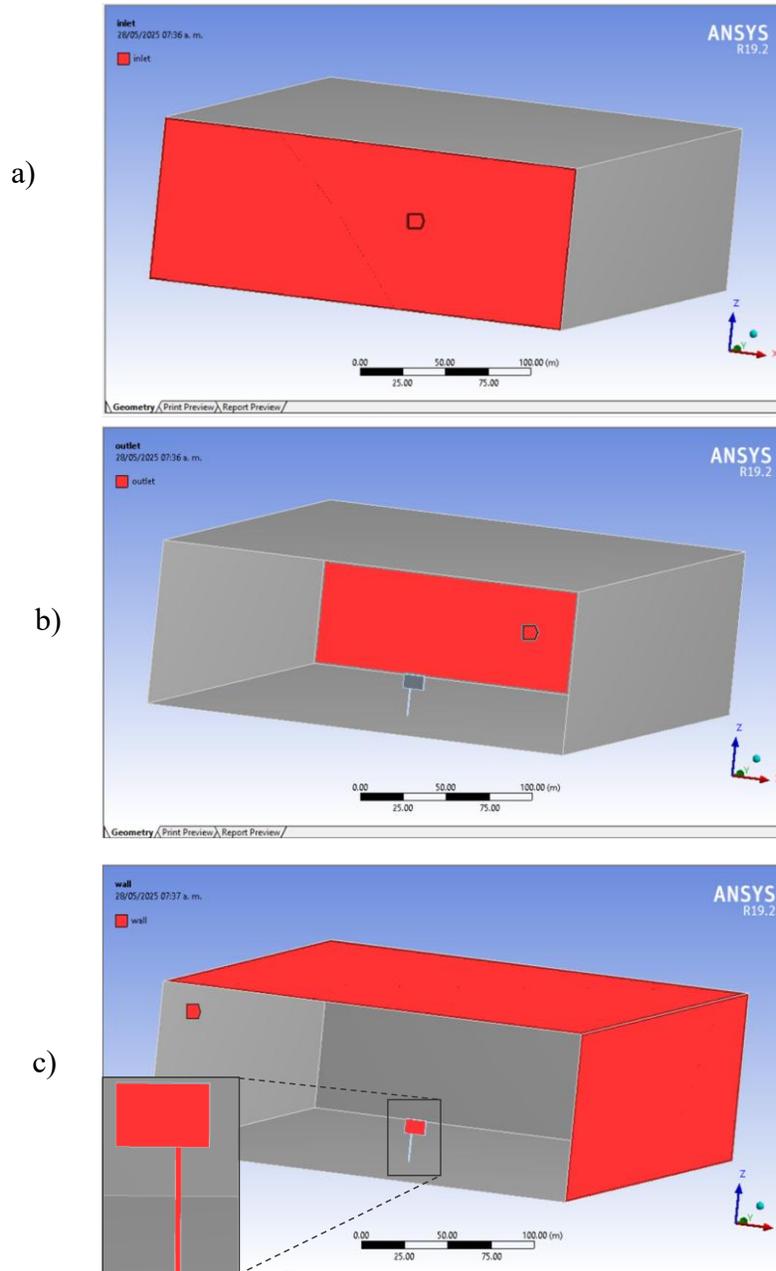


Figura 5.6. Configuración del recinto: a) entrada del fluido, b) salida del fluido y c) paredes sólidas donde el fluido ejerce contacto.

Tanto las paredes del recinto como la estructura se consideraron un cuerpo rígido en donde el fluido impacta y genera efectos tales como presión. Se puso especial atención a los efectos producidos sobre el AEU.

Al tener configurado de manera adecuada el recinto, se procedió con la distribución de la malla, la cual se seleccionó con un tamaño y disposición del mallado. Se determinó utilizar el mallado predeterminado en el software, el cual es una malla no estructurada de elementos tetraédricos, escogiendo para ello un tamaño de malla de 1.20 m. En la Figura 5.7 es posible observar recinto mallado, mientras que la Figura 5.8 muestra el AEU con la malla generada.

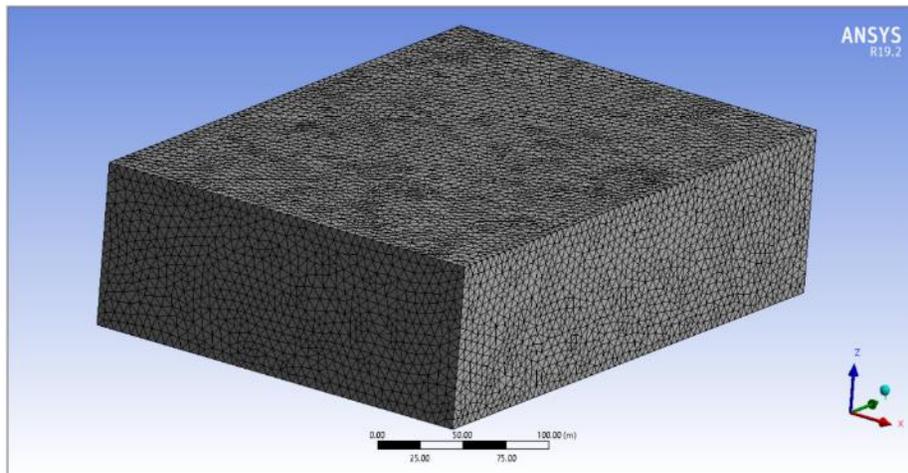


Figura 5.7. Recinto mallado con un tamaño de malla igual a los 0.80 m.

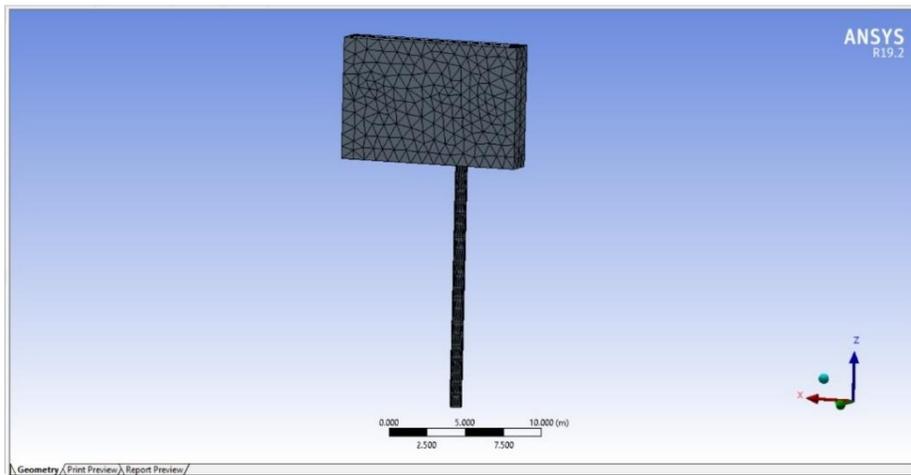


Figura 5.8. Anuncio espectacular mallado con un tamaño de malla igual a los 0.80 m.

Posterior a ello, se configuró la velocidad de viento, siendo uno de los valores más importantes. Para esto se retomó la velocidad obtenida en el apartado 5.1.3 igual a los 143.95 km/h que de igual manera podría ser expresado como 39.98 m/s (Figura 5.7).

En este mismo módulo, se configuró el número iteraciones, para esta investigación se escogió utilizar un número de iteraciones igual a 500.

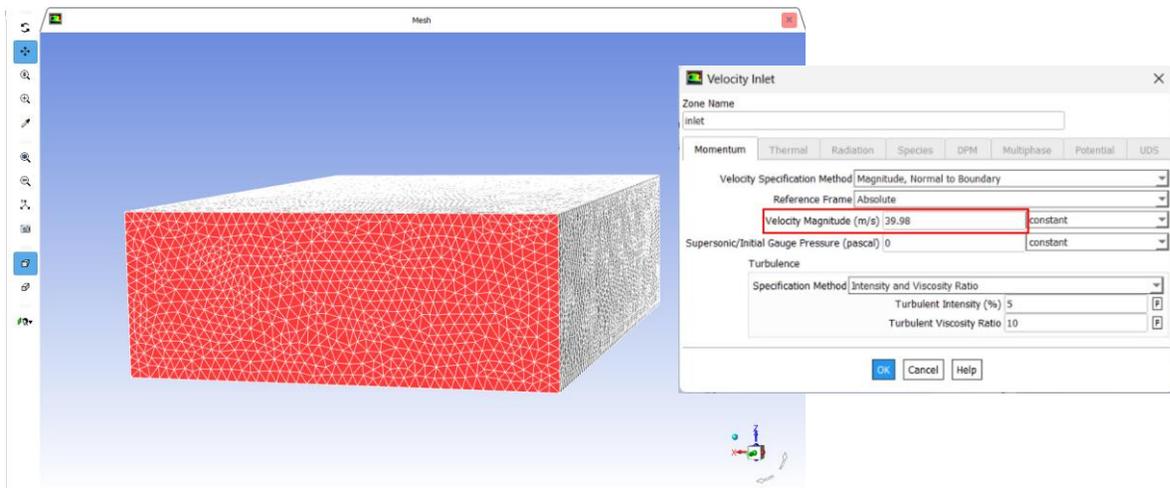


Figura 5.7. Velocidad de diseño configurada para la simulación CFD.

5.3.3. Extracción de las presiones de viento obtenidas en CFD.

Previo a extraer las presiones de viento, era necesario verificar que el comportamiento del fluido sea el adecuado, buscando de esta manera obtener resultados con un grado de aproximación aceptable. Para ello, se obtuvieron contornos de velocidad y presión en dirección perpendicular y paralela al flujo de viento y se observó que el tamaño del recinto era el adecuado para obtener un comportamiento correcto. A continuación, se describen los mapas obtenidos:

- Velocidad de viento en dirección al flujo (visto en planta), Figura 5.8.
- Velocidad de viento en dirección al flujo(visto en sección longitudinal), Figura 5.9.
- Presión ejercida por el viento en dirección al flujo (visto en planta) Figura 5.10.
- Presión ejercida por el viento en dirección al flujo(visto en sección longitudinal), Figura 5.11.
- Velocidad de viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal), Figura 5.13.

- Presión ejercida por el viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal), Figura 5.12.

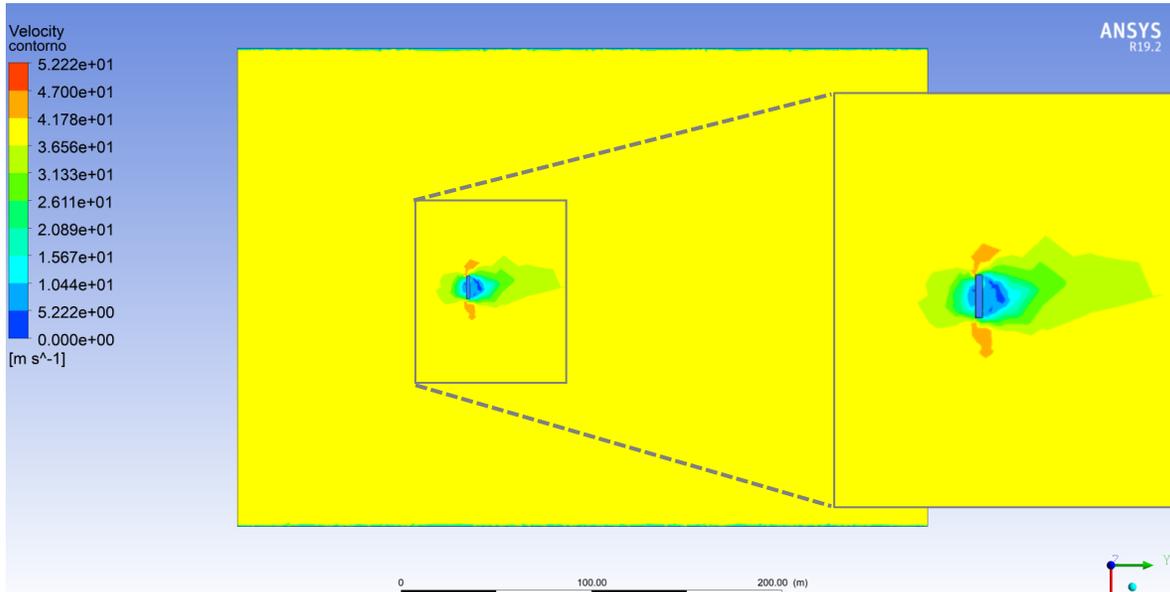


Figura 5.8. Velocidad de viento en dirección al flujo en m/s (visto en planta).

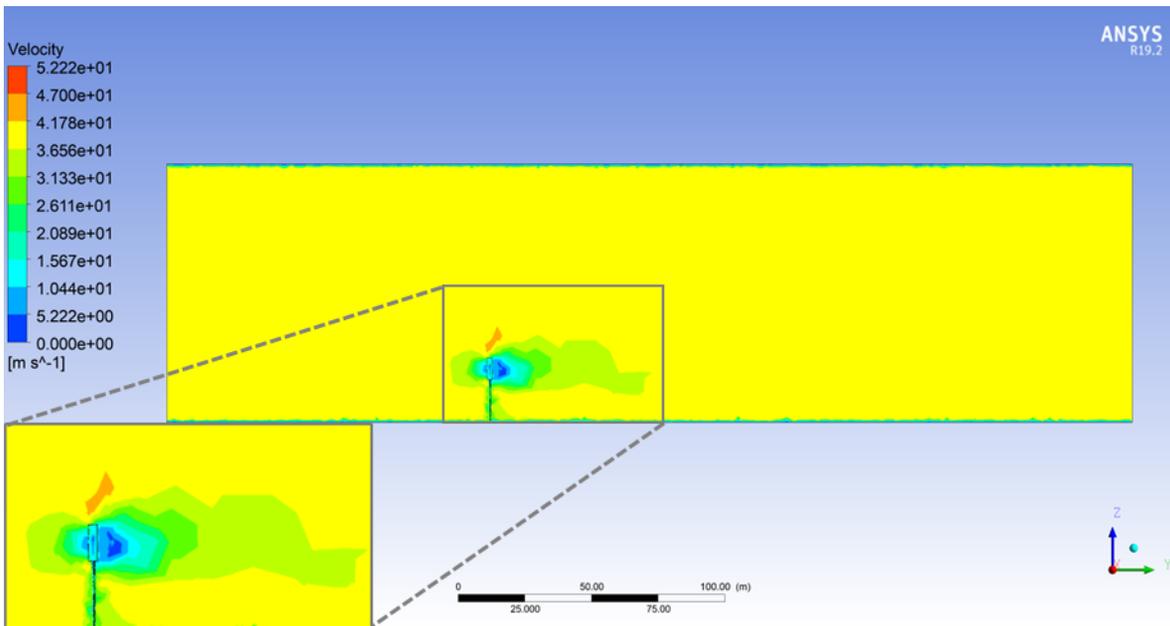


Figura 5.9. Velocidad de viento en dirección al flujo en m/s (visto en sección longitudinal).

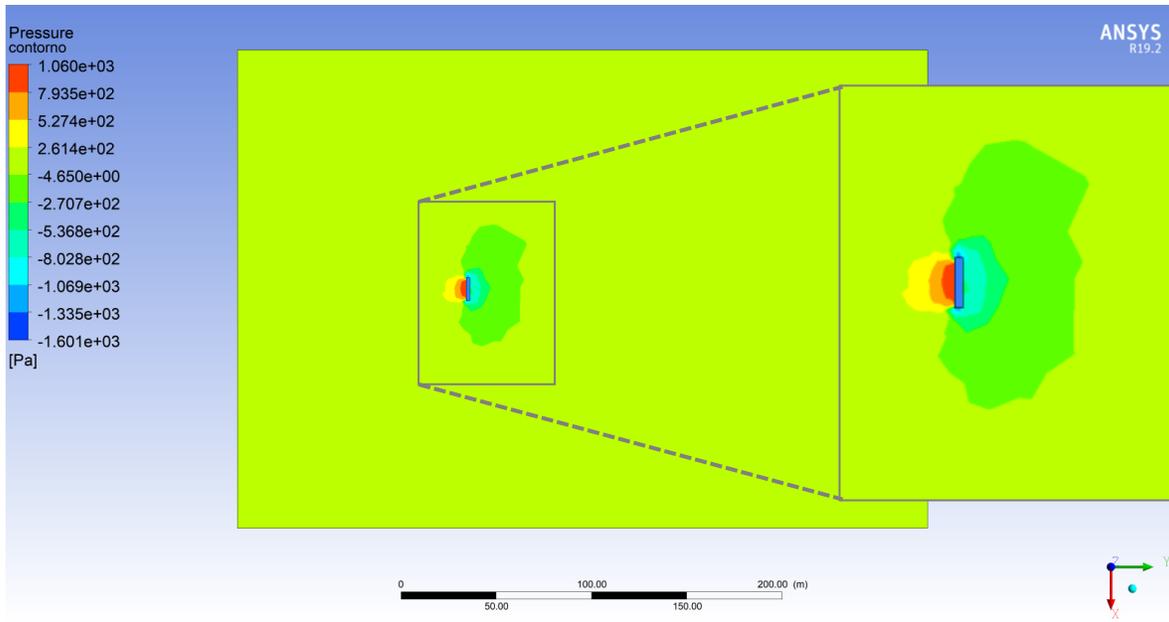


Figura 5.11. Presión ejercida por el viento en dirección al flujo, en Pa (visto en planta).

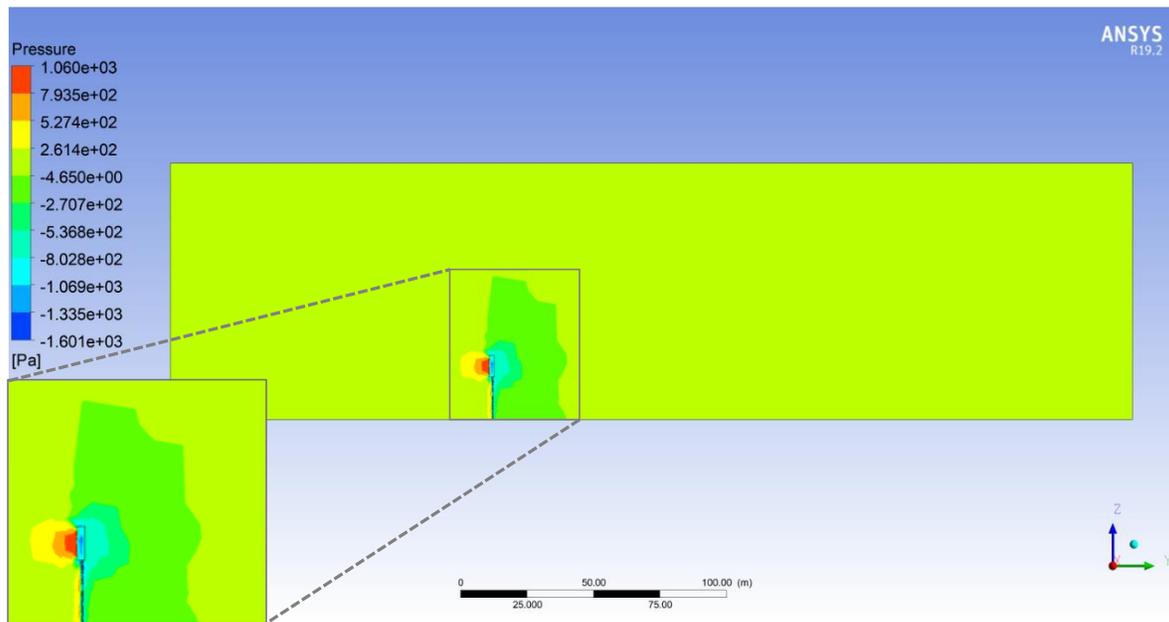


Figura 5.10. Presión ejercida por el viento en dirección al flujo, en Pa (visto en sección longitudinal).

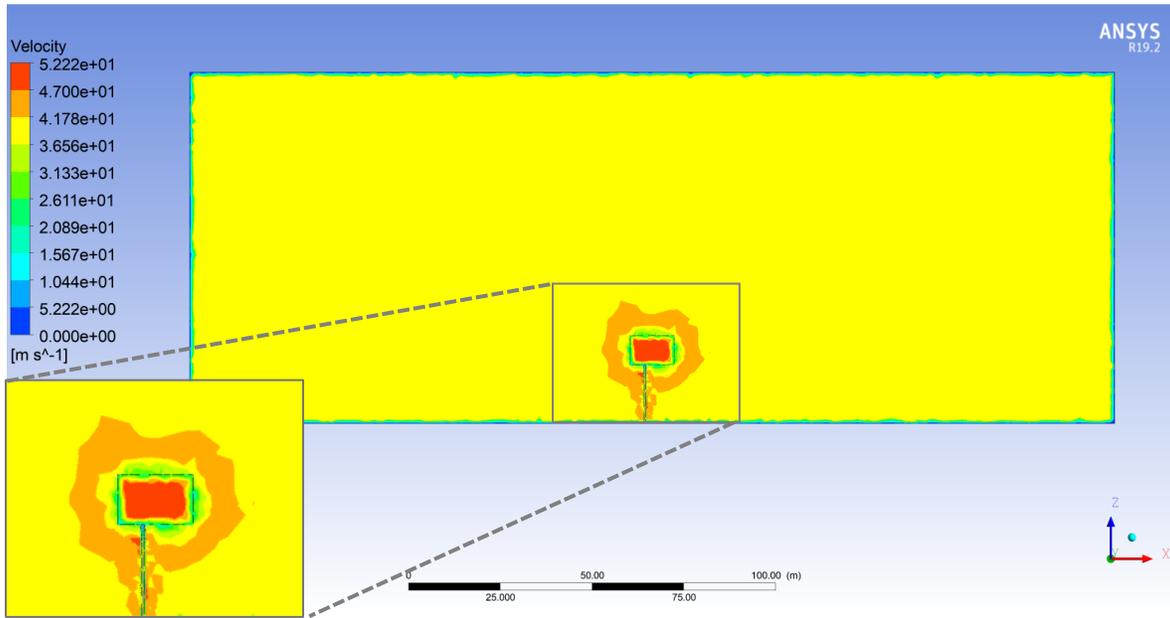


Figura 5.13. Velocidad de viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal).

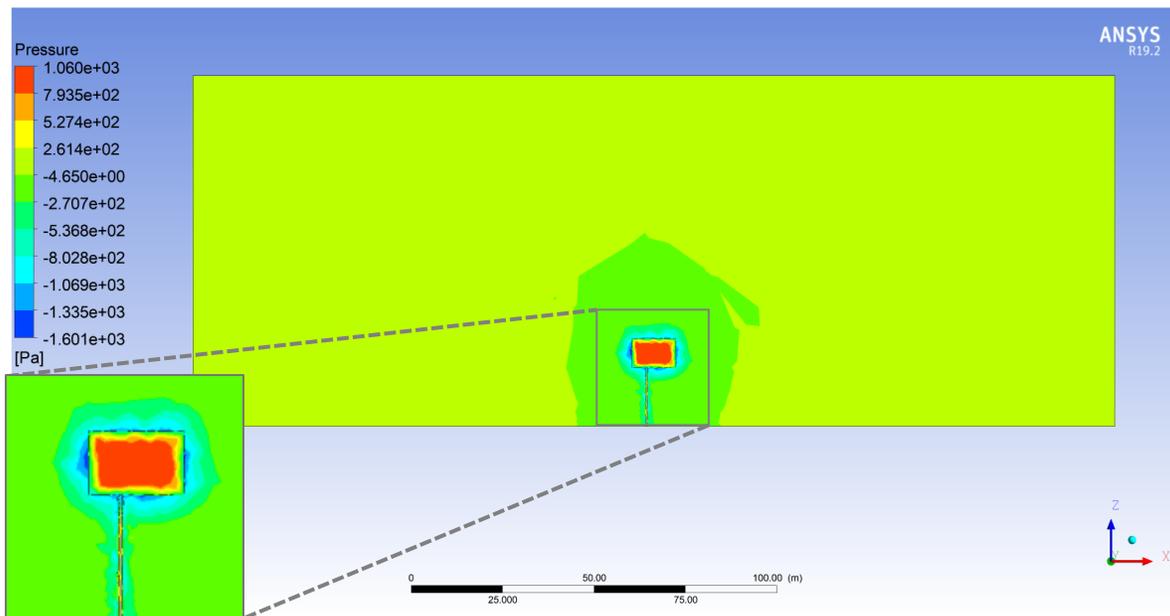


Figura 5.12. Presión ejercida por el viento en dirección perpendicular al flujo (visto en sección transversal).

Al haber comprobado que los resultados son confiables, fue posible extraerlos, siendo el más importante la presión aplicada sobre la mampara. La presión actuante debido al efecto

de viento en la cara de barlovento (empuje) se observa en la Figura 5.15, mientras que la presión actuante en la cara de sotavento (succión) se observa en la Figura 5.14.

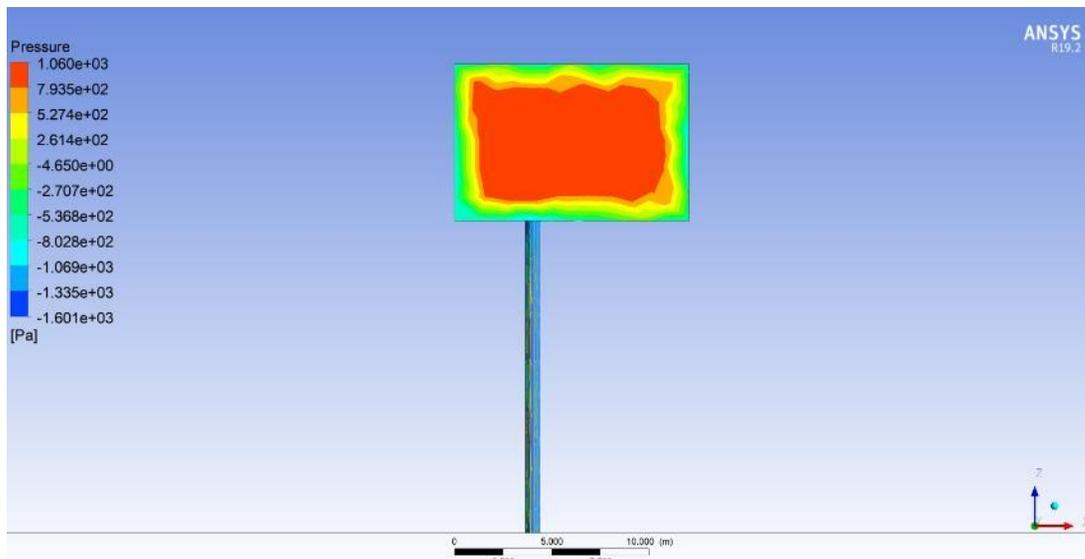


Figura 5.15. Presiones de viento aplicadas en la cara de barlovento, en Pa (empuje).

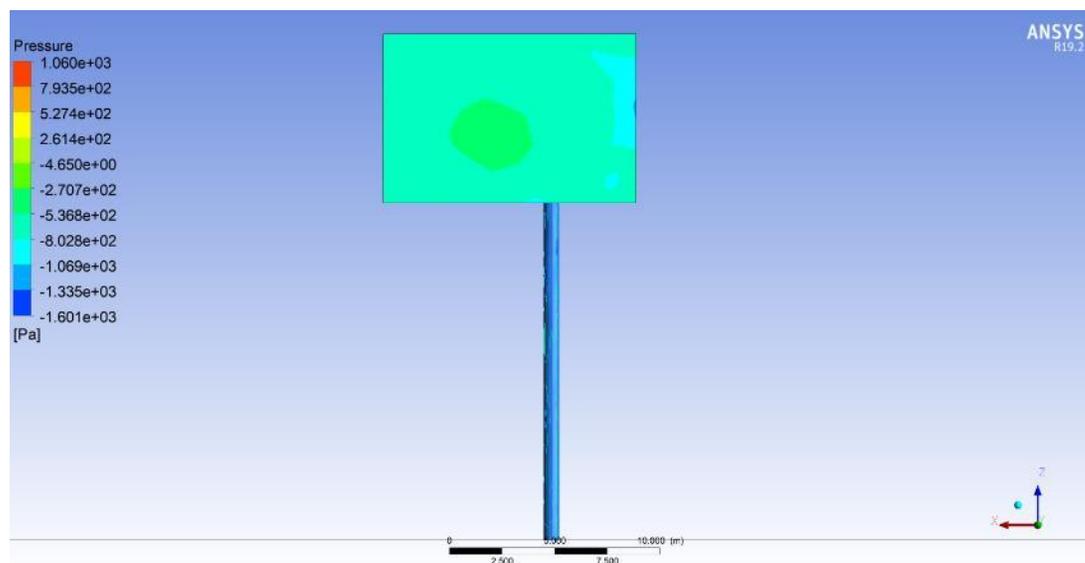


Figura 5.14. Presiones de viento aplicadas en la cara de sotavento en Pa (succión).

Aun cuando los resultados mostrados en las dos Figuras anteriores no son constantes como los obtenidos por el método estático y dinámico, al calcular un promedio ponderado se obtiene que la presión actuante en la cara de barlovento es igual a 100 kg/m^2 , mientras que la presión actuante en la cara de sotavento es igual a los 80 kg/m^2 .

Debido a que tanto el empuje como la succión ejercida sobre la cartelera suceden en la misma dirección (en dirección al flujo de viento) es posible sumarlos para obtener una presión actuante total obteniendo un valor igual a 180 kg/m^2 .

Los resultados obtenidos en este apartado fueron presentados en un artículo publicado en el Congreso Internacional de Ingeniería, en su vigésimo primera edición (Gallo et al., 2025).

5.4. Comparación de los resultados obtenidos.

Con las presiones conocidas mediante ambas metodologías, lo subsecuente era compararlas propiamente, así como los efectos que generan dichas presiones sobre la estructura.

Estos resultados son contrastados tanto con el método estático, como con el método dinámico observando que mediante CFD se encuentran presiones 55% y 13% más desfavorables, respectivamente .

5.4.1. Obtener los elementos mecánicos mediante ambas metodologías.

Se utilizó el programa generado en Mechanical APDL utilizando la configuración geométrica definida, variando únicamente la carga distribuida aplicada sobre la cartelera, utilizando los tres resultados obtenidos con anterioridad:

1. Método estático, con una presión igual a 119.43 kg/m^2 .
2. Método dinámico, con una presión igual a 159.48 kg/m^2 .
3. Simulación de fluidos computacional, con una presión igual a 180 kg/m^2 .

Al colocar la carga, el programa automáticamente realiza el análisis estructural. En la Figura 5.16 y Figura 5.17 se observan la configuración deformada y el vector de desplazamiento, respectivamente mientras que en la Figura 5.18 y Figura 5.19 se observan los momentos actuantes en el tubo columna y en el tubo mástil correspondientemente. Todo ello de acuerdo con cada uno de los tres métodos realizados en esta investigación.

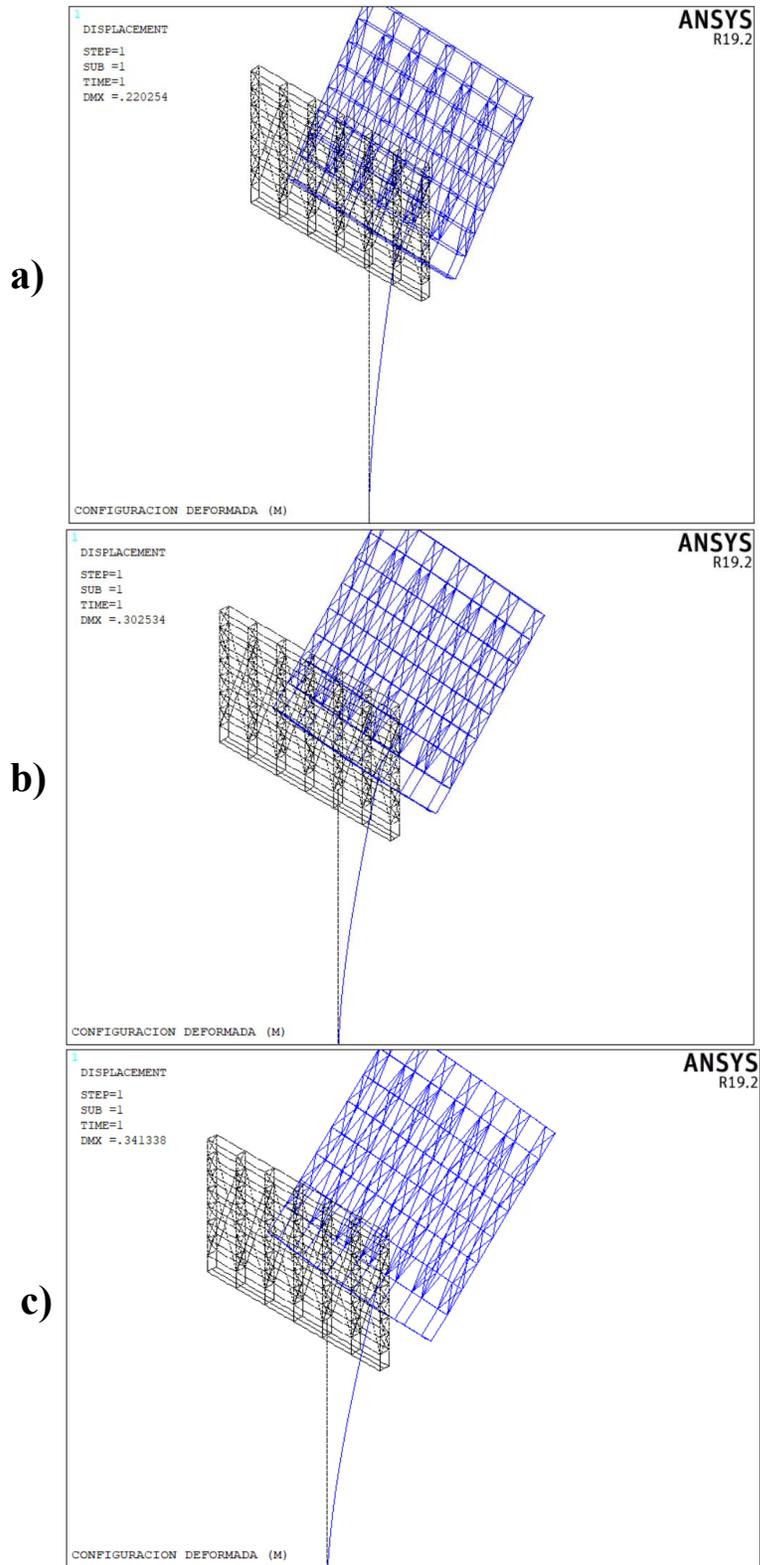


Figura 5.16. Configuración deformada, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.

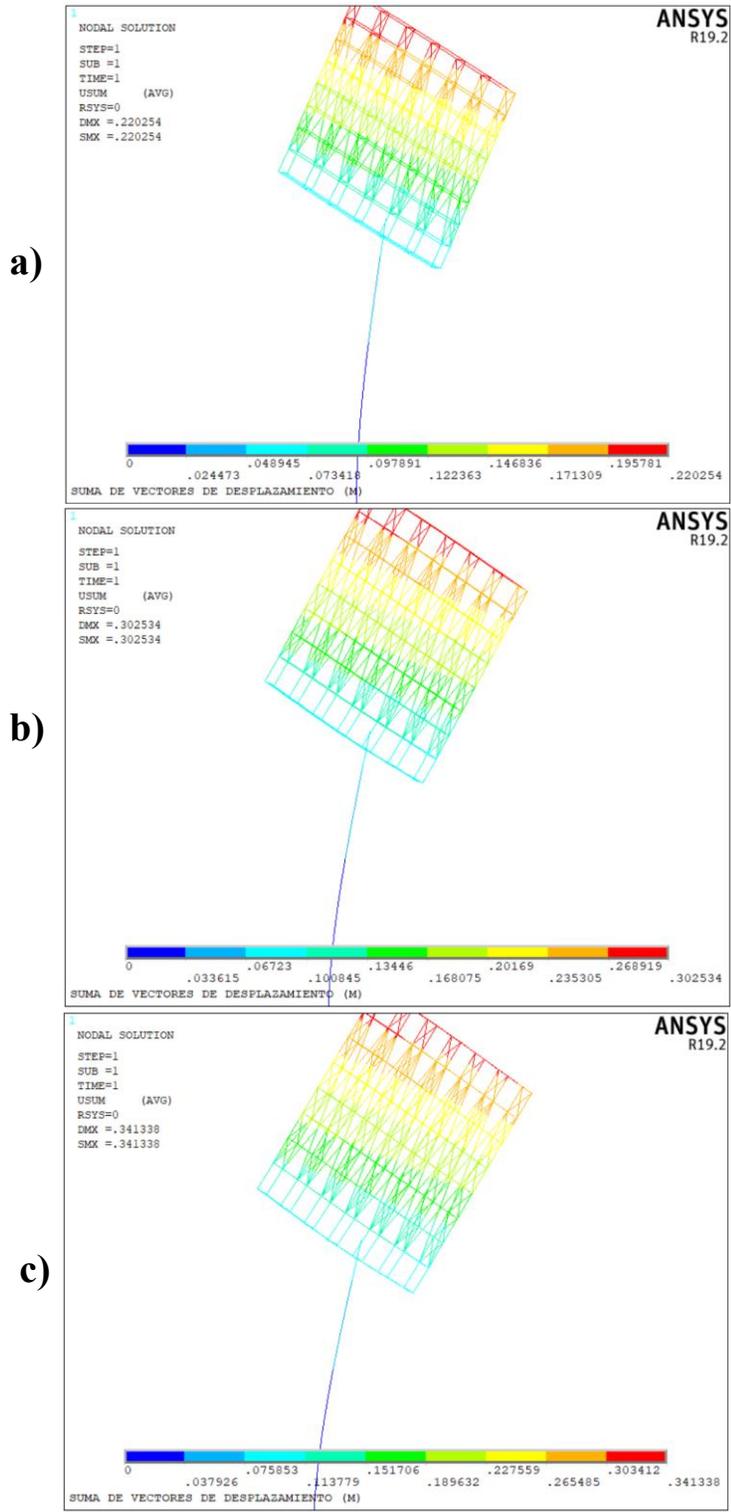


Figura 5.17. Suma de vectores de desplazamiento, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.

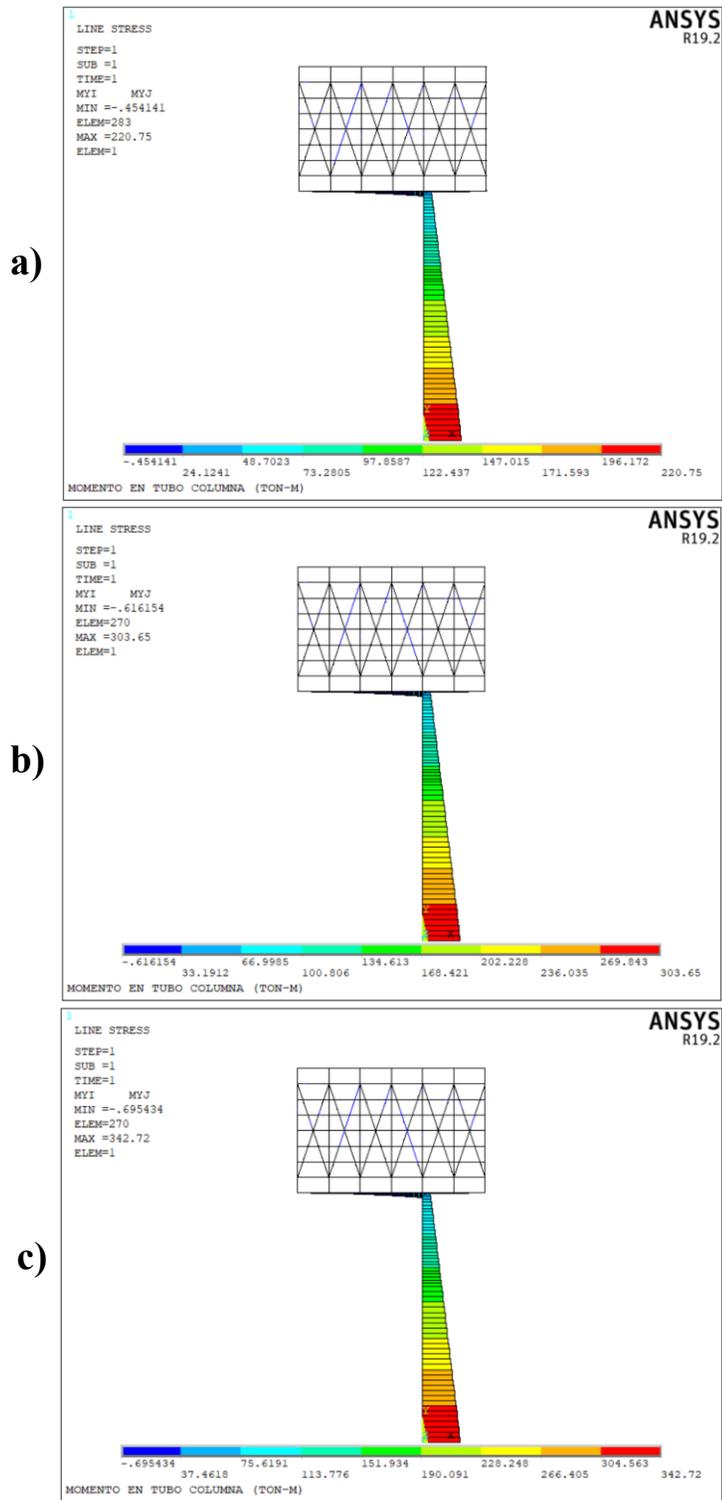


Figura 5.18. Momento en el tubo columna, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.

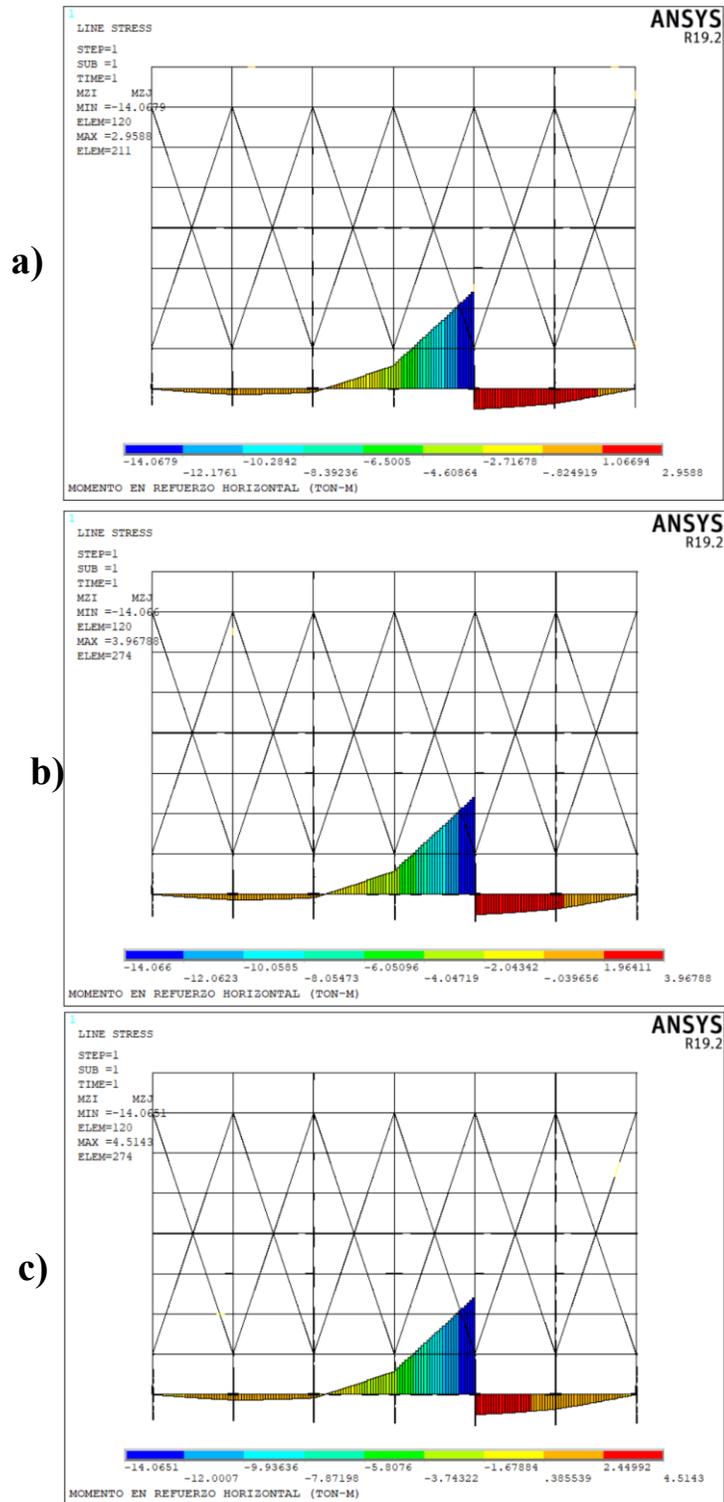


Figura 5.19. Momento en el tubo mástil, a) método estático, b) método dinámico y c) simulación de fluidos computacional.

5.4.2. Revisión de diferencias en los resultados entre los obtenidos con la normativa vigente y la modelación de fluidos computacional

Tanto el método estático como el método dinámico son métodos numéricos que dependen de las condiciones locales, así como factores propios de la geometría del anuncio. Por otro lado, la simulación de fluidos computacional es un método experimental en el que mediante un túnel de viento virtual se obtienen presiones actuantes al emular las condiciones del sitio y la estructura expuesta al flujo de viento.

En la Tabla 5.1 se observan los diferentes resultados obtenidos con cada metodología.

Tabla 5.1. Efectos actuantes en el AEU de acuerdo con diferentes metodologías.

Metodología	Presión (kg/m ²)	Desplazamiento (cm)	Momento en tubo columna (Ton-m)	Momento en tubo mástil (Ton-m)
Método estático	119.43	22.03	220.75	-14.07
Método dinámico	159.48	30.25	303.65	-14.07
CFD	180.00	34.13	342.72	-14.07

5.4.3. Proponer recomendaciones para el análisis y diseño.

Para el análisis y diseño estructural de AEU se recomienda considerar con especial cuidado en la selección de todos los factores que afectan las ecuaciones incluidas en los métodos numéricos empleados con anterioridad. Estos tienen una gran sensibilidad en los resultados obtenidos, por lo que sí no se conoce adecuadamente el sitio de construcción, así como su entorno urbano, podría ocasionar diseño que no consideren de manera precisa los efectos que podrían presentarse en realidad.

Aunado a ello, se recomienda encarecidamente hacer uso de cualquier túnel de viento virtual, ya sea ANSYS Workbench o cualquier otro presente en los programas de análisis y diseño estructural y contrastar dichos resultados con los obtenidos mediante la normativa y utilizar aquellos que resulten más desfavorables.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió obtener las presiones de viento ejercidas sobre un anuncio espectacular unipolar (AEU) mediante una simulación de fluidos computacional y compararlo con el método estático y dinámico presente en la normativa actual, denotando el hecho de que ambos métodos podrían estar subestimando el efecto de viento.

Los resultados obtenidos confirman que la hipótesis se cumple debido a que se obtuvo una presión de viento mayor en un 55% que mediante el método estático equivalente. Por otra parte, al comparar mediante simulación de fluidos computacional (CFD) con el método dinámico se observa que los resultados de la simulación son un 13% superiores.

Esto se logró mediante una configuración de CFD que replicó adecuadamente las condiciones de sitio, así como la velocidad que podría presentarse en la zona estudiada.

Los resultados obtenidos denotan la falta de sensibilidad en la metodología presente en la normativa, lo cual puede deberse en gran medida a la generalidad de estas, por el hecho de que las ecuaciones empleadas para todo tipo de edificación son prácticamente iguales siendo el coeficiente de forma y algunos otros factores los únicos que se ven modificados. Los resultados coinciden con lo reportado previamente en el estado de arte, lo cual coincide debido a que es consistente con el estado de arte reportado con anterioridad.

Por otra parte, mediante la aplicación de una simulación de fluidos computacional se considera de manera precisa la geometría del anuncio, la rugosidad del material a emplear, así como la distribución del fluido a través del recinto, lo que conlleva a resultados con un mayor grado de aproximación.

El hecho de que mediante CFD, se encuentre una presión de viento mayor que mediante una metodología tradicional, indica que existen AEU que han sido construidos con presiones de viento no del todo adecuadas que en determinado momento podrían verse rebasados y llegar a la falla aun sin presentarse la velocidad de diseño. Aunado a ello, este análisis permite conocer en cualquier punto la presión exacta, así como su sentido por lo que permitirá diseños más precisos y confiables.

Para futuras investigaciones, se recomienda contrastar los resultados obtenidos con túnel de viento experimental. Adicionalmente, es recomendable realizar una simulación CFD considerando obstáculos alrededor del AEU tales como edificios y contrastar los resultados generados con los factores de corrección por topografía presentes en la normativa.

7. REFERENCIAS

- Abu-Zidan, Y., Mendis, P., & Gunawardena, T. (2021). Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings. *Heliyon*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06723>
- Arroyo, M. (n.d.). Efecto De Viento En Estructuras. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4050.5049>
- Ayuntamiento de Querétaro. (2017). Reglamento de Imagen Urbana del Municipio de Querétaro.
- Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- Castelán, A., & Hernández, L. (2013). TESIS: Análisis de los anuncios espectaculares conforme al marco regulatorio de la Ciudad de México.
- Catarino, G. (2024). Captan momento en que espectacular metálico es derribado por el viento. <https://www.record.com.mx/contra/captan-momento-en-que-espectacular-metalico-es-derribado-por-el-viento>
- CFE. (2020). Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento.
- Cruz S, J. J., Grajales M, J. F., Samayoa A, I. A., & Hernandez C, M. G. (2018). Análisis Paramétrico De Anuncios Espectaculares Sujetos A La Acción Del Viento Parametric Analysis Of Unipole Advertising Board Subject To Wind Action. In Núm (Vol. 43).
- Dowell, E. H., & Hall, K. C. (2000). Modeling Of Fluid-Structure Interaction. www.annualreviews.org
- Escobar, S. (2023, February 20). Advierten retraso en el retiro de espectaculares en la Ciudad de México. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/econohabitat/Advierten-retraso-en-el-retiro-de-espectaculares-en-la-Ciudad-de-Mexico-20230220-0023.html>
- Espinoza, J. (2013). Efectos Dinámicos De Viento En Una Torre De Líneas De Transmisión Eléctrica Mediante Dinámica De Fluidos Computacional. Revisión Normatividad CFE. Universidad Autónoma de Querétaro.

- Gallo, L., Pérez, L., Horta, J., & Arjona, I. (2025). Comparison of wind pressure on a single pole billboard: static equivalent vs CFD method. Congreso Internacional de Ingeniería.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA PARA DISEÑO POR VIENTO.
- Hidalgo, I. (2013). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por la acción del viento. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Kassimali, A. (2015). Análisis estructural (Quinta Edición). CENGAGE Learning.
- Kim, R. woo, Lee, I. bok, & Kwon, K. seok. (2017). Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164, 235–256. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008>
- Lange, T. (2023). Towards an Efficient Multigrid Algorithm for Solving Pressure-Robust Discontinuous Galerkin Formulations of the Stokes Problem. <http://essay.utwente.nl/97483/>
- Li, Z., Wang, D., Chen, X., Liang, S., & Li, J. (2018). Wind load effect of single-column-supported two-plate billboard structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.013>
- Lorenzon, A., Antonello, M., & Berto, F. (2017). Megastructures: Use of CFD turbulence models for the evaluation of wind-induced fatigue loads. *Procedia Structural Integrity*, 3, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.038>
- Malacara, N. (2023, November 10). La inversión publicitaria en México no crece al ritmo que en otros países. *Expansión*. <https://expansion.mx/mercadotecnia/2023/11/10/crecimiento-inversion-publicitaria-mexico>
- Meli, R. (2011). *Diseño Estructural (Segunda Edición)*.
- Meng, F. Q., He, B. J., Zhu, J., Zhao, D. X., Darko, A., & Zhao, Z. Q. (2018). Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on CAARC standard tall buildings in CFD simulations. *Journal of Building Engineering*, 16, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.004>

- Navarro, C. (2022, June 8). Espectaculares en CDMX: El 80% de los anuncios son ilegales. El Herald de México. <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2022/8/6/espectaculares-en-cdmx-el-80-de-los-anuncios-son-ilegales-428386.html>
- Obinna, U. (2020). Effects of Wind on Billboard Structures - Structville. <https://structville.com/2020/08/effects-of-wind-on-billboard-structures.html>
- Paulotto, C., Ciampoli, M., & Augusti, G. (2006). Wind tunnel evaluation of mean wind pressure on a frame-type signboard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(5), 397–413. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.01.006>
- Radu, D., Sedmak, A., & Băncilă, R. (2018). Determining the crack acceptability in the welded joints of a wind loaded cylindrical steel shell structure. *Engineering Failure Analysis*, 91, 341–353. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.032>
- Rodríguez, J. (2024, February 15). 59% de la inversión en marketing en México se destinó a medios online en 2023. *Marketing 4 Ecommerce*. <https://marketing4ecommerce.mx/inversion-publicitaria-en-mexico-iab/>
- Rojek, M. (2021). AI for CFD: Intro (part 1) - Becoming Human: Artificial Intelligence Magazine. <https://becominghuman.ai/ai-for-cfd-intro-part-1-d1184936fc47>
- Salgado-Estrada, R., Galván, A., Moreno-Martínez, J. Y., Elvira-Hernández, E. A., Carpio, F., Herrera-May, A. L., Zamora Castro, S. A., & Herrera-Díaz, I. E. (2023a). Wind Vulnerability of Flexible Outdoor Single-Post Billboards. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/app13106197>
- Salgado-Estrada, R., Galván, A., Moreno-Martínez, J. Y., Elvira-Hernández, E. A., Carpio, F., Herrera-May, A. L., Zamora Castro, S. A., & Herrera-Díaz, I. E. (2023b). Wind Vulnerability of Flexible Outdoor Single-Post Billboards. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/app13106197>
- Serna, J. (2024). Cayó espectacular por debilitamiento de estructura y fuertes vientos: Protección Civil. <https://diario.mx/juarez/2024/oct/01/cayo-espectacular-por-debilitamiento-de-estructura-y-fuertes-vientos-proteccion-civil-1034545.html>

- Smith, D. A., Zuo, D., & Mehta, K. C. (2014). Characteristics of wind induced net force and torque on a rectangular sign measured in the field. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 133, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.07.010>
- Wang, D., Chen, X., Li, J., & Cheng, H. (2016). Wind load characteristics of large billboard structures with two-plate and three-plate configurations. *Wind and Structures, An International Journal*, 22(6), 703–721. <https://doi.org/10.12989/was.2016.22.6.703>
- Wang, D., Guo, H., Shen, Q., Feng, C., & Li, Z. (2022). Experimental Investigation and Estimation of Wind Load and Wind-Induced Responses of Monopole Three-Sided Billboard. *Journal of Structural Engineering*, 148(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003337](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003337)
- Warnitchai, P., Sinthuwong, S., & Poemsantitham, K. (2009). Wind Tunnel Model Tests of Large Billboards. <https://doi.org/10.12989/was.2016.22.6.000>
- Wen, J., & Xie, Q. (2020). Field investigation and structural analysis of wind-induced collapse of outdoor single-post billboards. *Engineering Failure Analysis*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104810>
- Zuo, D., Smith, D. A., & Mehta, K. C. (2014). Experimental study of wind loading of rectangular sign structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 130, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.04.005>

8. APÉNDICE

Código APDL paramétrico para el análisis estructural del AEU.

```
*CREATE, INICIO
```

```
/NOPR
```

```
KEYW,PR_SET,1
```

```
KEYW,PR_STRUC,1
```

```
/GO
```

```
FINISH
```

```
/PREP7
```

```
*MSG,UI,
```

```
PROGRAMA DE ANALISIS ANUNCIO&
```

```
ESPECTACULAR&
```

```
EL ANALISIS MODAL SIRVE PARA&
```

```
CONOCER EL EMPUJE DE VIENTO&
```

```
A TRAVES DEL SISTEMA DE VIENTO V2&
```

```
MULTIPRO,'START',9
```

```
*CSET,1,3,Z1,'ALTURA 1 (M)',10
```

```
*CSET,4,6,Z2,'ALTURA 2 (M)',6
```

```
*CSET,7,9,H,'ALTURA ANUNCIO (M)',8
```

*CSET,10,12,B,'ANCHO ANUNCIO (M)',12
*CSET,13,15,ESPA,'ESPESOR ANUNCIO (M)',0.6
*CSET,16,18,NRVI,'NUMERO DE REFUERZOS V IZQ',4
*CSET,19,21,NRVD,'NUMERO DE REFUERZO V DER',2
*CSET,22,24,NRH,'NUMERO DE REFUERZOS H ',6
*CSET,25,27,MH,'DIMENSION MASTIL HORIZONTAL(M)',1
*CSET,61,62,'DIMENSIONES GENERALES DEL'
*CSET,63,64,'ANUNCIO ESPECTACULAR'
MULTIPRO,'END'

MULTIPRO,'START',9

*CSET,1,3,DIAM1,'DIAMETRO 1 (M)',0.762
*CSET,4,6,ESP1,'ESPESOR DIAM1(M)',0.0127
*CSET,7,9,DIAM2,'DIAMETRO 2 (M)',0.762
*CSET,10,12,ESP2,'ESPESOR DIAM2(M)',0.0127
*CSET,13,15,W1,'LADO/ANCHO PTR (M)',0.1
*CSET,16,18,T1,'ESPESOR PTR (M)',0.00317
*CSET,19,21,DIAM3,'DIAMETRO MASTIL HORIZONTAL',0.508
*CSET,22,24,ESP3,'ESPESOR DIAM3(M)',0.00635
*CSET,25,27,ESPP,'ESPESOR PLACA',0.0005
*CSET,61,62,'DIMENSIONES DE LAS'

*CSET,63,64,'SECCIONES'

MULTIPRO,'END'

*MSG,UI

PERIODO FUNDAMENTAL %/&

(1) SI %/&

(0) NO

/WAIT,0.1

*ASK,OPS,¿DESEA CONOCER EL PERIODO FUND?,1

*IF,OPS,EQ,0,THEN

MULTIPRO,'START',1

*CSET,1,3,CDist,'Carga dist anuncio',0.08294

*CSET,61,62,'CARGA SOBRE EL ANUNCIO'

MULTIPRO,'END'

*ENDIF

*END

*CREATE,GEOMETRIA

/COM, GEOMETRIA DEL ANUNCIO*****

/COM,COLOCACION KEYPOINTS*****

NRV=(NRVI+NRVD)

PAR1=(H-(2*MH))/NRH

PAR2=B/NRV

K,1,

K,2,,Z1,

ALTT=Z1+Z2

K,3,,ALTT,0

K,4,-DIFX,ALTT,(ESPA)*(0.5)

K,5,-DIFX,ALTT,ESPA*(-1*0.5)

K,6,-DIFX,ALTT+H,(ESPA)*(0.5)

K,7,-DIFX,ALTT+H,ESPA*(-1*0.5)

K,8,-DIFX,ALTT+MH,(ESPA)*(0.5)

K,9,-DIFX,ALTT+MH,ESPA*(-1*0.5)

K,10,-DIFX,ALTT+H-MH,(ESPA)*(0.5)

K,11,-DIFX,ALTT+H-MH,ESPA*(-1*0.5)

/COM,LINEA DEL TUBO MASTIL

L,1,2

L,2,3

L,5,3

L,3,4

L,4,8

L,5,9

L,8,9

L,6,7

KGEN,NRH+1,8,9,1,,PAR1,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

L,10,6

L,11,7

*GET,PUNTO0,KP,0,COUNT

*GET,LINE0,LINE,0,COUNT

L,8,12

L,9,13

L,12,13

*GET,LINE1,LINE,0,COUNT

LGEN,NRH,LINE0+1,LINE1,1,,PAR1,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

L,10,6

L,11,7

/COM, GENERAR ARRIOSTRAMIENTOS EN SECCION TRANSVERSAL

!GENERAR KEYPOINT

KGEN,2,3,3,1,,0.5*MH,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,PUNTO1,KP,0,COUNT

KGEN,2,punto1,punto1,1,,0.5*MH+0.5*PAR1,,

*GET,PUNTO2,KP,0,COUNT

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

KGEN,NRH,PUNTO2,PUNTO2,1,,PAR1,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP
*GET,PUNTO3,KP,0,COUNT
KGEN,2,PUNTO3,PUNTO3,1,,0.5*PAR1+0.5*MH,,
NUMMRG,KP
NUMCMP,KP
*GET,PUNTO4,KP,0,COUNT

!GENERAR LINEAS
NUMMRG,KP
NUMCMP,KP
NUMMRG,KP
NUMCMP,KP

*GET,LINE2,LINE,0,COUNT
L,PUNTO1+1,8
L,PUNTO1+1,9
L,PUNTO1+1,12
L,PUNTO1+1,13

*GET,LINE3,LINE,0,COUNT
LGEN,NRH,LINE2+1,LINE3,1,,PAR1,,
NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

L,10,PUNTO4

L,6,PUNTO4

L,PUNTO4,7

L,PUNTO4,11

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

!COPIAR SECCION TRANSVERSAL EN TODA LA LONGITUD

*GET,PUNTO5,KP,0,COUNT

KGEN,NRVI+1,4,PUNTO5,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

KGEN,NRVD+1,4,PUNTO5,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,LINE4,LINE,0,COUNT

LGEN,NRVI+1,3,LINE4,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

LGEN,NRVD+1,3,LINE4,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

/COM, GENERAR REFUERZOS VERTICALES

K,1004,-PAR2,ALTT,(ESPA)*(0.5)

K,1005,-PAR2,ALTT,ESPA*(-1*0.5)

K,1006,-PAR2,ALTT+MH,(ESPA)*(0.5)

K,1007,-PAR2,ALTT+MH,ESPA*(-1*0.5)

*GET,LINE5,LINE,0,COUNT

L,4,1004

L,5,1005

*GET,LINE6,LINE,0,COUNT

L,8,1006

L,9,1007

LGEN,NRH+1,LINE6+1,LINE6+2,1,,PAR1,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,LINE7,LINE,0,COUNT

LGEN,2,LINE7-1,LINE7,1,,MH,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,LINE8,LINE,0,COUNT

LGEN,NRVI,LINE5+1,LINE8,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

LGEN,NRVD+1,LINE5+1,LINE8,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

!GENERAR ARRIOSTRAMIENTOS EN SECCION LONGITUDINAL

K,2001,-PAR2,ALTT+H-MH,(ESPA)*(0.5)

K,2002,-PAR2,ALTT+H-MH,ESPA*(-1*0.5)

K,2003,-PAR2,ALTT+MH,(ESPA)*(0.5)

*GET,LINE9,LINE,0,COUNT

L,8,2001

L,10,2003

LGEN,2,LINE9+1,LINE9+2,1,,,-ESPA,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,LINE10,LINE,0,COUNT

LGEN,NRVI,LINE9+1,LINE10,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

LGEN,NRVD+1,LINE9+1,LINE10,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

/COM ,GENERAR MASTIL HORIZONTAL

KGEN,2,3,3,1,-PAR2,,,

*GET,PUNTO6,KP,0,COUNT

L,PUNTO6,3

*GET,LINE11,LINE,0,COUNT

LGEN,NRVI,LINE11,LINE11,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

LGEN,NRVD+1,LINE11,LINE11,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

K,2000,,MH+ALTT,0

L,3,2000

*GET,LINE12,LINE,0,COUNT

!CREACION DE ÁREAS PLACAS

K,4000,-DIFX-PAR2,ALTT,(ESPA)*(0.5)

K,4001,-DIFX-PAR2,ALTT+MH,(ESPA)*(0.5)

A,4,8,4001,4000,4

*GET,AREA1,AREA,0,COUNT

AGEN,NRVI,AREA1,AREA1,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

AGEN,NRVD+1,AREA1,AREA1,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,AREA2,AREA,0,COUNT

AGEN,2,AREA1,AREA2,1,,H-MH,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

K,4001,-DIFX-PAR2,ALTT+MH,(ESPA)*(0.5)

K,4002,-DIFX,ALTT+MH+PAR1,(ESPA)*(0.5)

K,4003,-DIFX-PAR2,ALTT+MH+PAR1,(ESPA)*(0.5)

A,8,4002,4003,4001,8

*GET,AREA3,AREA,0,COUNT

AGEN,NRVI,AREA3,AREA3,1,-PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

AGEN,NRVD+1,AREA3,AREA3,1,PAR2,,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,AREA4,AREA,0,COUNT

AGEN,NRH,AREA3,AREA4,1,,PAR1,,

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*GET,AREA5,AREA,0,COUNT

AGEN,2,AREA1,AREA5,1,,,-ESPA

NUMMRG,KP

NUMCMP,KP

*END

*CREATE,CARGAS

*DO,I,AREA1,AREA5,1

SFA,I,1,PRES,-Cdist

*ENDDO

*END

*CREATE,SECCION

/COM, DECLARAR ELEMENTO FINITO

ET,1,BEAM188

et,2,shell63

R,1,ESPP

ET,3,LINK180

R,2,0.005

/COM, DECLARAR PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

MODEL=22475049.35455

MP,EX,1,22475049.35455

MP,PRXY,1,0.3

MODG=22475049.35455/(2*(1+0.3))

MP,GXY,1,MODG

MP,DENS,1,7.75/9.81

/COM,DECLARAR SECCIONES

!PRIMER MASTIL

SECNUM,1

SECTYPE,1,BEAM,CTUBE

SECDATA,DIAM1-ESP1,DIAM1

!SEGUNDO MASTIL*****

SECNUM,2

SECTYPE,2,BEAM,CTUBE

SECDATA,DIAM2-ESP2,DIAM2

!SECCION MASTIL HORIZONTAL

SECTYPE,3,BEAM,CTUBE

SECDATA,DIAM3-ESP3,DIAM3

!PERFIL ARMADURA DEL ANUNCIO

SECTYPE,4,BEAM,HREC

SECDATA,W1,W1,T1,T1,T1,T1

!PLACA DE ACERO

!SECNUM,5

SECTYPE,5,SHELL

SECDATA,ESPP,1

/COM, APLICAR MALLADO A SECCIONES

/COM, APLICAR SECCION 1

LSEL,S,LINE,,1

LATT,1,,1,,,1

LESIZE,ALL,,,30

LMESH,ALL

LSEL,ALL

/COM, APLICAR SECCION 2

LSEL,S,LINE,,2

LSEL,A,LINE,,LINE12

LATT,1,,1,,,2

LESIZE,ALL,,,30

LMESH,ALL

LSEL,ALL

/COM, APLICAR SECCION 3

LSEL,S,LINE,,LINE11

*DO,i,1,NRVI+NRVD-1,1

LSEL,A,LINE,,LINE11+i

*ENDDO

LATT,1,,1,,,3

LESIZE,ALL,,,30

LMESH,ALL

/COM, APLICAR SECCION 4

LSEL,ALL

LSEL,U,LINE,,1

LSEL,U,LINE,,LINE12

LSEL,U,LINE,,2

LSEL,U,LINE,,LINE11

*DO,i,1,NRVI+NRVD-1,1

LSEL,U,LINE,,LINE11+i

*ENDDO

!LESIZE,ALL,,1 !SE APAGO EL MALLADO EN LINK180 Y SE ACTIVA
ASIGNARLE ELEMENTO TIPO BEAM188 CON LATT

!REAL,2

!TYPE,3

!MAT,1

LATT,1,,1,,,4

LMESH,ALL

LSEL,ALL

/COM, APLICAR SECCION A AREAS

ASEL,ALL

TYPE,1

REAL,1

MAT,1

AMESH,ALL

!RESTRINGIR NODO

NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0

!*D RESTRIGIR LOS DESPLAZAMIENTOS-----

D,ALL,ALL

NSEL,ALL

*END

*CREATE,MODAL

/SOLU

ANTYPE,MODAL

MODOPT,LANB,10

EQSLV,SPARSE

MXPAND,10

MODOPT,LANB,10,0,100, ,OFF

SOLVE

FINISH

SAVE,MODAL1

*END

*CREATE,VISUA

/POST1

SET,FIRST

*GET,FREQ,MODE,1,FREQ

PERIODF=1/FREQ

/TITLE,PERIODO FUNDAMENTAL DEL ANUNCIO = %PERIODF% S

PLDISP,1

/DSCALE,1,40

SAVE,MODSEL

*MSG,UI

SE CONTINUA CON EL&

ANALISIS ESTATICO&

CALCULAR CDist&

CON SISTEMA VIENTO 2018&

MULTIPRO,'START',1

*CSET,1,3,CDist,'Carga dist anuncio',0.08294

*CSET,61,62,'CARGA SOBRE EL ANUNCIO'

MULTIPRO,'END'

!FINSH

/PREP7

*USE,CARGAS

*USE,SOLUCION

*USE,PLOTEO

*END

*CREATE,SOLUCION

/VIEW,1,1,1,1 !cambio de vista para observar mejor el anuncio

/ANG,1

/REP,FAST

/PSF,PRES,NORM,2,0,1 !mostrar cargas como flechas

/TITLE, ELEMENTOS FINITOS

EPLOT

/WAIT,2

/TITLE,CARGAS SOBRE EL ANUNCIO

GPLOT

/WAIT,2

ALLSEL,ALL

FINISH

/SOLU

ANTYPE,0

!*ADICIONAR EL PESO PROPIO-----

ACEL,,9.81,

SOLVE

FINISH

/POST1

SET,LAST

```
*END

*CREATE, PLOTEO

ESEL, ALL

ESEL, U, TYPE, , 2

EPLLOT

PLDISP, 1

/DSCALE, 1, 40

/title, CONFIGURACION DEFORMADA (M)

/DIST, 1, 0.924021, 1

/REP, FAST

/VIEW, 1, 1, 1, 1

/ANG, 1

/REP, FAST

/WAIT, 5

/TITLE, SUMA DE VECTORES DE DESPLAZAMIENTO (M)

PLNSOL, U, SUM, 0, 1, 0

/WAIT, 5

/SHRINK, 0
```

```
/ESHAPE,0.5

/EFACET,1

/RATIO,1,1,1

/CFORMAT,32,0

/REPLOT

/TITLE,ESFUERZO VON MISES EQV (TON/M2)

PLESOL, S,EQV, 0,1.0

/WAIT,5

/VIEW,1,,1

/ANG,1

/REP,FAST

/AUTO,1

/REP,FAST

ETABLE,MYI,SMISC, 2

ETABLE,MYJ,SMISC, 15

ETABLE,MZI,SMISC, 3

ETABLE,MZJ,SMISC, 16

ESEL,S,SEC,,1

ESEL,A,SEC,,2
```

ESEL,U,TYPE,,2

ESEL,ALL

/TITLE,MOMENTO EN TUBO COLUMNA (TON-M)

PLLS,MYI,MYJ,-1,0,0

/WAIT,15

ESEL,S,SEC,,3

ESEL,A,SEC,,4

/AUTO,1

/REP,FAST

/TITLE,MOMENTO EN REFUERZO HORIZONTAL (TON-M)

PLLS,MZI,MZJ,-1,0,0

/DIST,1,0.38742,1

/REP,FAST

/FOC,1,,1.2,,1

/REP,FAST

*END

```
*USE,INICIO  
  
*USE,GEOMETRIA  
  
!*USE,SECCION  
  
!*USE,MODAL  
  
!*USE,VISUA  
  
!*USE,SOLUCION  
  
  
*IF,OPS,EQ,1,THEN  
  
*USE,SECCION  
  
*USE,MODAL  
  
*USE,VISUA  
  
  
*ELSE  
  
*USE,CARGAS  
  
*USE,SECCION  
  
*USE,SOLUCION  
  
*USE,PLOTEO  
  
*ENDIF
```