



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DE ACCIONES DEL VIENTO EN UNA
TORRE DE UNA INSTALACIÓN DE TRANSPORTE
POR CABLE MEDIANTE HERRAMIENTAS CFD

STUDY OF WIND ACTIONS ON A TOWER OF A
CABLEWAY INSTALLATION USING CFD TOOLS

Autor

Juan Rodrigo Navarro Crespo

Director

Mario Morales Hernández

RESUMEN

En este trabajo se ha definido un modelo de simulación computacional de fluidos con el objetivo de estudiar las fuerzas de viento transversal sobre una torre convencional de instalaciones de transporte por cable. El modelo se basa en el modelo 3D de la geometría real de la torre proporcionada por el fabricante LEITNER, sobre el que se han realizado una serie de procesos para poder simular las fuerzas de viento con unas condiciones de contorno provenientes de las solicitaciones máximas exigidas en normativa, así como las condiciones de mallado y cálculo adecuadas para que la simulación obtenga un alto nivel de precisión sin incurrir en tiempos de cálculo excesivos. El análisis de convergencia de malla ha contribuido a la validación del modelo. Por otro lado, se ha realizado una simulación con el modelo subdividido en 3 partes principales como segunda aproximación al problema y finalmente se han comparado todos los resultados con la metodología simplificada de áreas aparentes empleada para proyectos y el diseño de la implantación de las torres. También se ha calculado la incidencia de cambios en la velocidad del viento sobre los resultados de las fuerzas y analizado la relación entre los distintos valores. Los resultados indican que el modelo de áreas aparentes sobredimensiona en gran medida los esfuerzos aplicados en la estructura y un modelo computacional resulta más preciso y permite al diseñador de la implantación de sistemas de transporte por cable definir las fuerzas en la base de las torres y por tanto dimensionar las cimentaciones en función de unos coeficientes de seguridad sobre un modelo realista.

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	5
2. METODOLOGÍA	6
2.1. LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	8
3. NORMATIVA VIGENTE.....	8
4. METODO DE ÁREAS APARENTES.....	11
5. CÁLCULO DEL MODELO.....	13
5.1. DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS DE CÁLCULO.....	13
5.2. PREPROCESO.....	14
5.3. MODELO CFD COMPLETO.....	16
5.4. CONVERGENCIA DE MALLA	18
5.5. MODELO CFD EN 3 PARTES	19
5.5.1. CABALLETE.....	19
5.5.2. FUSTE.....	20
5.5.3. MÉNSULA.....	21
5.6. COMPARACIÓN MODELOS CFD.....	21
6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RESULTADOS	23
6.1. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA.....	23
6.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS	25
7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	26
8. BIBLIOGRAFÍA	28

Índice de Figuras

Figura 1 - Torre de telecabina Cueto Negro.....	5
Figura 2 - Partes de la torre	7
Figura 3 - Plano acotado de torre	12
Figura 4 - Imagen completa de la geometría obtenida.	14
Figura 5 - Proceso de simplificación: original (Izda.) y simplificada (Dcha.)	15
Figura 6 - Proceso Shrinkwrap para el modelo completo.	16
Figura 7 - Envoltente de modelo completo	17
Figura 8 – Presión en plano ZY en Modelo Completo.....	17
Figura 9 - Gráfico de convergencia de Malla.....	18
Figura 10 – Presión en plano YZ de caballete.....	20
Figura 11 – Presión en el entorno del fuste, plano XY a 10 m de altura en Z.	20
Figura 12 - Presión en el plano XY en Ménsula	21
Figura 13 - Comparación resultados CFD en 3 partes (arriba) y completo (abajo)	22
Figura 14 - Gráfico de Fuerzas de presión respecto a velocidad en modelo completo	24
Figura 15 - Gráfico de Fuerzas viscosas respecto a velocidad en modelo completo	25
Figura 16 - Contorno de presión para 35,41 m/s (izquierda), 44,26 m/s (centro) y 53,12 m/s (derecha).....	25

Índice de Tablas

Tabla 1 - Parámetros para cálculo de áreas aparentes	13
Tabla 2 - Fuerzas Método Áreas aparentes	13
Tabla 3 - Velocidades de viento consideradas	14
Tabla 4 - Fuerzas Modelo Completo.....	17
Tabla 5 - Datos de convergencia de malla	18
Tabla 6 - Fuerzas Caballete Modelo en 3 partes	20
Tabla 7 - Fuerzas Fuste Modelo en 3 Partes	21
Tabla 8 - Fuerzas Ménsula Modelo en 3 Partes	21
Tabla 9 - Resultados para los 3 Métodos	22
Tabla 10 - Resultados variación de velocidad modelo 3 partes	23
Tabla 11 - Resultados variación de velocidad modelo completo	24
Tabla 12 - Resultados de cálculo.....	26

1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

En la práctica habitual de los proyectos de implantación de instalaciones de transporte por cable se calculan los esfuerzos del viento sobre las estructuras con una metodología de aproximación de acciones considerando unos valores determinados de presión dinámica descrita en la normativa que producen una serie de fuerzas en la geometría de los elementos considerados. Esta metodología se ha demostrado suficiente a la vista de la escasa accidentalidad de este medio de transporte, menos aún por causas de fallos estructurales por viento. Si bien se trata de una aproximación sobre áreas poco precisas, es voluntad del redactor del presente trabajo, haciendo uso de las herramientas y técnicas aprendidas en el master de ingeniería mecánica, comprobar hasta qué punto los datos arrojados por un método clásico son coherentes con los obtenidos en una simulación computacional de dinámica de fluidos, en inglés: Computational Fluid Dynamics (CFD).

La CFD es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza análisis numérico y estructuras de datos para analizar y resolver problemas que involucran flujos de fluidos. Se utilizan ordenadores que realizan los cálculos necesarios para simular el flujo libre del fluido y la interacción del mismo con las superficies a estudio asumiendo unas condiciones de contorno y unas características de flujo definidas.

EL TRANSPORTE POR CABLE

Los sistemas de transporte por cable se componen de uno o varios bucles de cable que se mueven entre dos o más estaciones para trasladar vehículos a lo largo del recorrido. Existen múltiples tipologías de estos transportes que van desde los funiculares, telesillas, telecabinas y telesquíes.

Para el presente análisis se ha seleccionado la torre de un telesilla o telecabina desembragable, con una altura de 15 metros y 6 poleas por ramal. Se trata de una de las tipologías más comunes encontradas en este tipo de instalaciones como ejemplo, en la figura 1 se muestra una torre de dimensiones similares perteneciente al telecabina de Cueto Negro de la estación invernal de Valgrande-Pajares.



Figura 1 - Torre de telecabina Cueto Negro

La normativa actual, analizada en el capítulo 3 del presente trabajo, y la práctica empleada por ingenieros para el cálculo de los esfuerzos de viento en los proyectos [1] y [2], así como los artículos y publicaciones encontradas son la base que se ha empleado para plantear el presente estudio.

Tras realizar una revisión bibliográfica no se han encontrado publicaciones relacionadas con el análisis CFD de torres de transporte por cable con objeto de estudiar su implantación. Sí se han encontrado diversas publicaciones científicas sobre temas relacionados, por ejemplo artículos sobre modelizaciones matemáticas de viento cruzado en un telesilla monocable [3], donde se modeliza sillas y cable con el objeto de comprender las fuerzas de viento que generan balanceo y así poder optimizar el diseño. De manera similar, el artículo de Jan Gustincic que versa sobre las oscilaciones por viento en instalaciones de transporte por cable [4], se ha utilizado en este trabajo para analizar los coeficientes de forma o arrastre. Por otra parte, en un artículo [5], los autores analizan computacionalmente las fuerzas y el flujo de viento en una cabina de un telesilla haciendo uso de herramientas CFD. Como resultado obtienen un mapa de los vórtices del viento con presión negativa, la distribución de presiones, el coeficiente de presión y en sus conclusiones recomendaban reforzar el cierre de la puerta por el peligro detectado de que se abriese en determinadas circunstancias.

En cuanto a estructuras similares, existe una extensa bibliografía relativa a la simulación computacional de viento a su paso por generadores eólicos [6] o edificios de alta esbeltez [7], donde se realiza una comparación similar a la realizada en el presente trabajo. En su caso se comparan los resultados obtenidos en el túnel de viento y la simulación computacional, concluyendo que los resultados obtenidos entre ambas técnicas son semejantes y por lo tanto puede utilizarse para identificar las distintas zonas de presión en el entorno de los edificios, independientemente de su forma.

El objetivo de este trabajo es comprobar el grado de certeza que el método de áreas aparentes supone en comparación con un modelo computacional actualizado, y de paso validar un modelo CFD para torres de transporte por cable. Este trabajo se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se define la metodología donde se proponen los pasos principales del trabajo. Una vez definida la metodología, se expone la normativa vigente en la que se basa este trabajo y el método de las áreas aparentes, así como las hipótesis del cálculo del modelo CFD. Después se detalla el procedimiento para construir el modelo y se presentan los resultados, incluyendo un análisis de convergencia de malla y un análisis de sensibilidad a la velocidad del viento. Por último, se presentan las conclusiones finales y el trabajo futuro.

2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de estudiar el flujo de aire en la estructura y componentes de una torre de transporte por cable, se ha introducido el modelo de la geometría en una simulación CFD realizada con el programa ANSYS-FLUENT donde se han establecido unas condiciones de contorno y un flujo de viento a velocidad constante. El programa aporta valores de fuerza en cada eje de las estructuras fácilmente comparables con los obtenidos por métodos clásicos.

Las fases del trabajo son las siguientes:

- Revisión de la normativa de aplicación: Se comprueba la vigencia de la normativa actual de transporte por cable y se analiza lo indicado respecto a las acciones de viento en los elementos estructurales.
- Método áreas aparentes: En este apartado se analizará la estructura según el método de cálculo clásico atendiendo a sus parámetros y simplificaciones.
- Calculo analítico de las fuerzas en la estructura: Método de las áreas aparentes: Establece unas áreas aparentes para cada elemento y calcula la fuerza resultante con la presión dinámica y un coeficiente de forma.
- Posteriormente se simulan los siguientes modelos computacionales y se sigue el siguiente proceso:
 - Definición de hipótesis: Se define la hipótesis conjunta velocidades del viento consideradas según normativa y con un 20% de variación.
 - Validación del modelo: En esta fase se examina el modelo recibido para comprobar que no tiene elementos ajenos ni especiales, se realiza una simplificación del modelo eliminando para la simulación aquellas piezas no expuestas o no relevantes para la simulación.
 - Pre proceso: La pieza o conjunto se somete a un proceso de preparación en la herramienta SpaceClaim de ANSYS para permitir las fases de generación de volumen de control, mallado y simulación.
 - Modelo CFD completo: Primero se ha realizado la simulación completa de la torre. Dentro del modelo completo se han definido tres zonas para facilitar su comparación entre los modelos. De la simulación CFD se obtienen las fuerzas de viento en cada parte y en su conjunto. Las partes de la torre se definen en la figura 2.

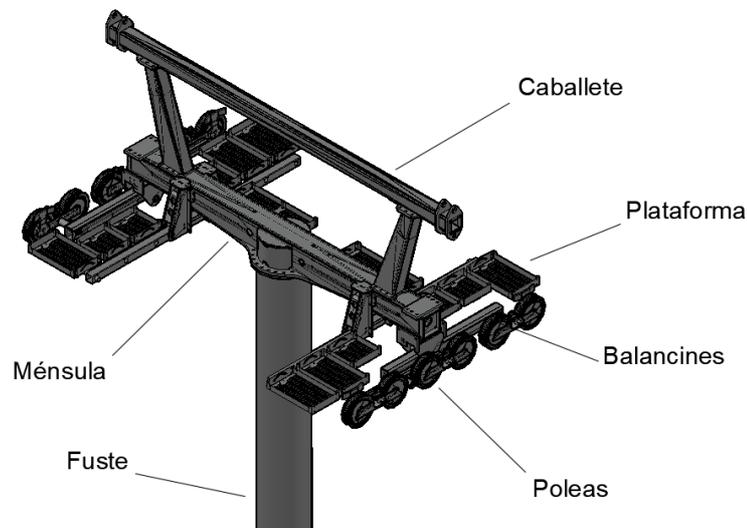


Figura 2 - Partes de la torre

- Posteriormente se lleva a cabo un análisis de convergencia de malla, que contribuye a la validación del modelo completo.
 - Modelo CFD en 3 partes: Finalmente, se procede a la simulación del modelo dividiendo la estructura completa de la torre en tres partes diferenciadas (caballete, ménsula y fuste) La ménsula contiene los elementos correspondientes a poleas, crucero de ménsula y plataformas. De esta simulación CFD se obtienen las fuerzas de viento en cada parte para su posterior evaluación.
 - Comparación de resultados de los modelos CFD.
- **Análisis de sensibilidad:** en esta etapa se evalúa la incidencia de los cambios de velocidad en las fuerzas resultantes.
 - **Análisis de resultados:** En esta parte del trabajo se someterán a una comparación los resultados obtenidos mediante los tres métodos.
 - **Conclusiones:** Del análisis de los resultados y como resumen del proceso se indicarán las conclusiones pertinentes, así como las implicaciones en el futuro de este tipo de procesos.

2.1. LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

La simulación CFD resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento para los ejes “x”, “y” y “z” mediante la discretización del volumen de control en una malla de volúmenes finitos con un esquema de segundo orden en el espacio.

Para los cálculos CFD se ha seleccionado un modelo de turbulencia k-épsilon. Este modelo se basa en el cálculo de dos ecuaciones de transporte en derivadas parciales que definen la turbulencia La primera variable transportada determina la energía cinética turbulenta (k) y la segunda variable transportada es la disipación turbulenta (ϵ), la cual determina la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.

De las diferentes variantes de este modelo se ha optado por la variante estándar (Launder y Spalding [8]) que minimiza las incógnitas y presenta un conjunto de ecuaciones que pueden ser aplicadas a un gran número de casos de flujo turbulento. Su robustez, su economía de cálculo y su precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos explican su popularidad en simulaciones industriales de flujo y transferencia de calor.

3. NORMATIVA VIGENTE

La normativa relativa al transporte por cable se establece por el comité CTN 58/SC 3 - TRANSPORTE DE PERSONAS POR CABLE [9] que ha elaborado un conjunto de 33 normas que regulan los distintos ámbitos de la tecnología, sus medidas de seguridad, su implantación y su mantenimiento. Dentro de las normas de este comité podemos encontrar las siguientes (actualizado agosto 2023):

UNE-EN 13796-3:2017+A1:2023 UNE

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Vehículos. Parte 3: Ensayos de fatiga.

UNE-EN 12929-2:2015+A1:2023 UNE

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Requisitos generales. Parte 2: Requisitos adicionales para teleféricos bicable de vaivén sin freno de carro.

UNE-EN 12930:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Cálculos.

UNE-EN 13243:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Dispositivos eléctricos distintos de los accionamientos.

UNE-EN 12929-1:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Requisitos generales. Parte 1: Requisitos aplicables a todas las instalaciones.

UNE-EN 12929-2:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Requisitos generales. Parte 2: Requisitos adicionales para teleféricos bicable de vaivén sin freno de carro.

UNE-EN 12927:2020

Requisitos de seguridad para instalaciones para el transporte de personas por cable. Cables.

UNE-EN 1709:2020

Requisitos de seguridad para las instalaciones de transporte de personas por cable. Examen previo a la puesta en servicio, instrucciones para el mantenimiento, la inspección y los controles en explotación.

UNE-EN 17064:2020

Requisitos de seguridad para las instalaciones de transporte de personas por cable. Prevención y lucha contra el fuego.

UNE-EN 12408:2006

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Aseguramiento de la calidad.

UNE-EN 1907:2018

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte de personas por cable. Terminología.

UNE-EN 12397:2017

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte de personas por cable. Explotación.

UNE-EN 13796-1:2017

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte de personas por cable. Vehículos. Parte 1: Pinzas, carros, frenos de a bordo, cabinas, sillas, coches, vehículos de mantenimiento, dispositivos de arrastre.

UNE-EN 1909:2017

Requisitos de seguridad para las instalaciones de transporte de personas por cable. Recuperación y evacuación.

UNE-EN 13796-2:2017

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Vehículos. Parte 2: Ensayo de resistencia al deslizamiento de las pinzas

UNE-EN 13796-3:2017

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Vehículos. Parte 3: Ensayos de fatiga.

UNE-EN 13107:2015/AC:2016

Requisitos de seguridad para las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Obras de ingeniería civil.

UNE-EN 1908:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Dispositivos de puesta en tensión.

UNE-EN 13223:2015

Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Sistemas de accionamiento y otros equipos mecánicos.

UNE-EN 13107:2015

Requisitos de seguridad para las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas. Obras de ingeniería civil.

La norma que se analiza en el presente trabajo es la **UNE-EN 13107:2006/2015/AC**, que establece las condiciones de la obra civil en el proyecto de implantación de instalaciones de transporte por cable. En la misma, las acciones sobre las estructuras se calculan en base a una serie de combinación de acciones de un modo similar al Eurocódigo o código estructural. Se establecen una serie de coeficientes parciales de seguridad y coeficientes de combinación. Para el cálculo de las acciones de viento se establecen dos situaciones bien determinadas:

- Acciones “En Explotación”
- Acciones “Fuera de explotación”

que se deben aplicar a los soportes de línea y sus equipos, así como los cables y vehículos. Es importante indicar que las condiciones de viento son determinantes para la explotación o el cese de explotación en una instalación de transporte por cable. En el momento de su construcción se establecen una serie de valores límite a partir de los cuales la instalación deberá permanecer cerrada al público con objeto de evitar riesgos de descarrilamiento del cable, balanceos excesivos en vehículos y choques de los mismos entre sí o con las estructuras.

Aparte del valor límite de explotación, que será el necesario para calcular las acciones en las estructuras combinando las acciones dinámicas de la instalación, aceleraciones, frenadas, estados de cargas, fuerzas de viento y carga de hielo, etc., se establece un valor límite de viento para el cálculo de la resistencia mecánica de las estructuras y sus cimentaciones. Este valor no es compatible con la explotación de la instalación por lo que no se considerará para combinación con las acciones dinámicas, solo con las estáticas, peso propio, nieve, hielo, etc.

Por todo ello, conforme a la norma EN 12930:2015 el valor característico de esta fuerza de viento se calcula mediante la siguiente expresión del apartado 6.5.4:

[...]

6.5.4 La acción del viento se debe definir como la fuerza resultante F_w de acuerdo con las siguientes disposiciones:

Generalmente se debe calcular la fuerza del viento resultante de acuerdo con la Norma EN 1991-1-

4 a partir de la fórmula (1):

$$F_w = q \cdot c_f \cdot A_{ref}$$

Donde:

q es la presión dinámica
 c_f es el coeficiente de fuerza
 A_{ref} es el área de referencia del c_f

Los valores especificados en la Norma EN 1991-1-4 y en las normas de construcción nacionales pueden diferir de acuerdo con las circunstancias de ciertas instalaciones de transporte por cable.

A condición de que ninguna otra regulación esté especificada en las Normas EN 1709, EN 1908, EN 1909, EN 12397, EN 12408, EN 12927 (todas sus partes), EN 12929 (todas sus partes), EN 13107, EN 13223, EN 13243, y EN 13796 (todas sus partes), se deben aplicar los siguientes valores de presión dinámica:

- en explotación, el valor mínimo de presión dinámica debe ser de $q = 0,25 \text{ kN/m}^2$. Para instalaciones de transportes por cable específicas puede ser necesario un valor mayor.
- fuera de explotación, el valor mínimo de presión dinámica es de $q = 1,20 \text{ kN/m}^2$, a condición de que las particulares circunstancias de ciertas instalaciones de transporte por cable o disposiciones nacionales específicas para instalaciones por cable o directivas no estipulen otro valor.
- la presión dinámica actúa como una carga uniformemente distribuida a lo largo de la longitud l^* del vano. Fuera de explotación, la presión dinámica se puede reducir de acuerdo con la ecuación (2).

[...]

4. METODO DE ÁREAS APARENTES.

El proyectista de instalaciones de transporte por cable emplea en el cálculo de la fuerza de viento en las estructuras y el cable una serie de áreas aparentes para cada elemento o grupo de elementos, así como la presión dinámica y un coeficiente de forma que varía entre unos cálculos y otros. En el caso de los proyectos revisados [1], [2]. se evita disponer de coeficientes de forma inferiores a la unidad y llega a valores de 1,6 en los elementos más complejos de la torre y las estaciones. En el caso del cable, el coeficiente se calcula en función de la longitud del vano a estudio. Como ejemplo de estos coeficientes encontramos:

Coeficientes de mayoración/forma:

- Fuste: (1,0 - 1,3)
- Ménsula: (1,1 - 1,3)
- Caballete: (1,0 - 1,3)
- Plataformas: (1,1 - 1,6)
- Balancines: (1,1 - 1,6)
- Poleas: (1,1 - 1,3)
- Estaciones: (1,1 - 1,3)

A diferencia de las estructuras convencionales, compuestas por superficies regladas, fachadas, perfiles metálicos o elementos prefabricados, los elementos de una torre en las instalaciones de transporte por cable, sobre todo en lo relativo a la ménsula, se disponen

de un modo “apiñado” por lo que considerar las acciones individuales de cada elemento o conjunto de elementos se ha considerado suficiente del lado de la seguridad, si bien este trabajo pretende analizar el grado de confianza de este método.

A continuación, en la figura 3 se muestra un esquema acotado de la torre, a partir del cual se definirán las áreas aparentes de cada parte.

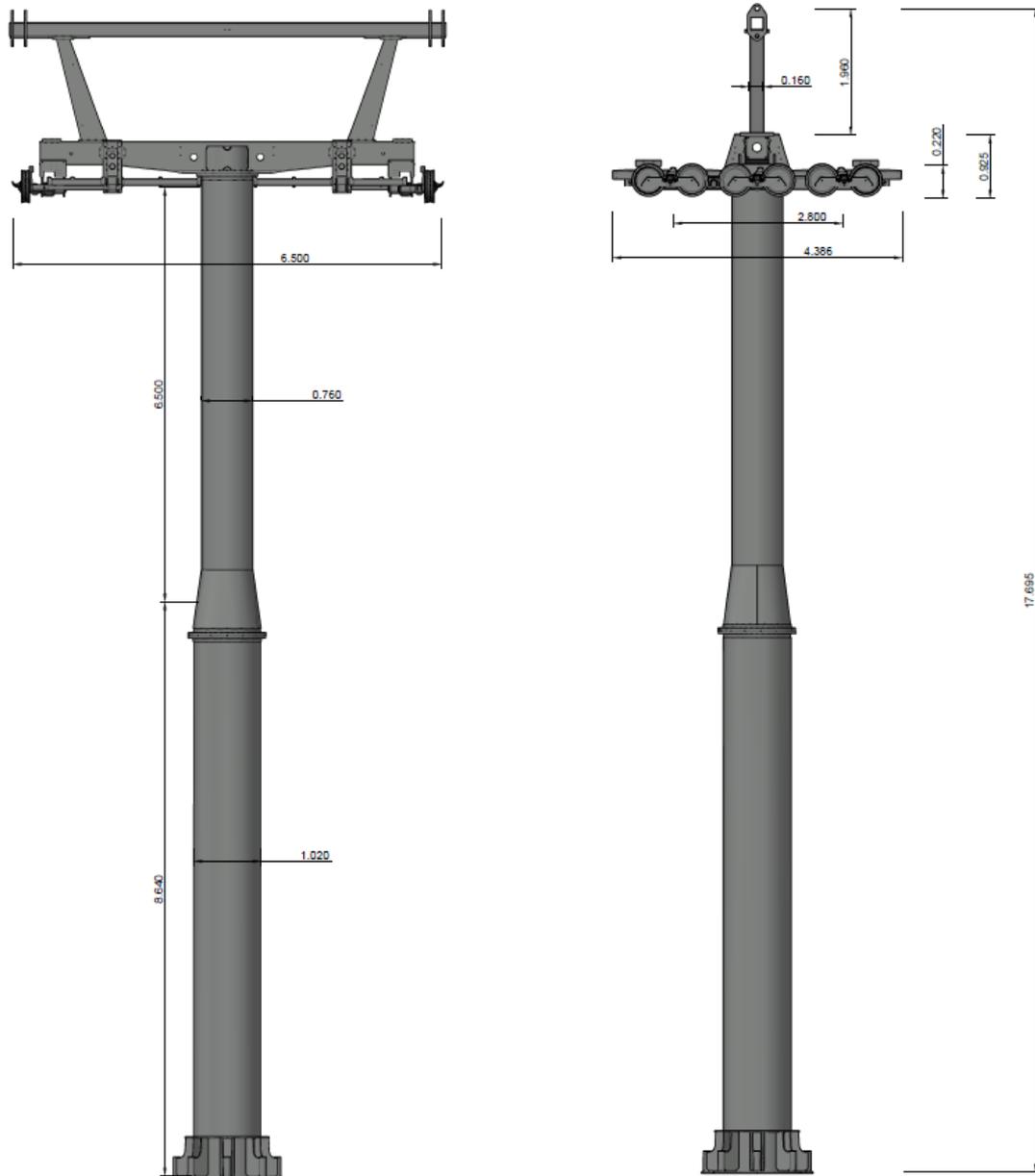


Figura 3 - Plano acotado de torre

Para el cálculo se ha empleado la formula indicada en normativa. Como datos de partida se han empleado los parámetros descritos en la tabla 1 y los resultados obtenidos con este método se resumen en la tabla 2.

Parámetros para cálculo de áreas aparentes			Unidades
Presión dinámica del viento	$q =$	1.200	N/m^2
Velocidad del viento	$V_v =$	44,26	m/s

Densidad del aire		1,225	kg/m ³
Número de Poleas por ramal	Npol =	6	
Área ficticia transversal balancines	Art =	0,62	m ²
Área ficticia transversal plataforma	Apt =	0,59	m ²
Área transversal caballete	Aft =	0,31	m ²
Área transversal poleas	Att =	1,09	m ²
Diámetro Ø 762	a	0,76	m
Longitud Ø 762	0,762	6,50	m
Área ficticia fuste superior	Affs =	4,95	m ²
Diámetro Ø 1.016	b	1,02	m
Longitud Ø 1.016	1,016	8,50	m
Área ficticia fuste inferior	Affi =	8,64	m ²

Tabla 1 - Parámetros para cálculo de áreas aparentes

Fuerzas - Viento transversal				
Cf			Áreas Aparentes	Unidades
1,3	Fuerza sobre el caballete	Vc =	489,22	N
1,6	Fuerza sobre balancines	Vbal =	2.365,44	N
1,6	Fuerza sobre la plataforma	Vp =	2.280,96	N
1,3	Fuerza sobre poleas	Vpol =	1.692,89	N
	Fuerza sobre la ménsula		6.339,29	N
1,3	Fuerza sobre fuste superior	Vf-a =	7.726,68	N
1,3	Fuerza sobre fuste inferior	Vf-b =	13.472,16	N
	Fuerza sobre el fuste	Total	21.198,84	N
	TOTAL		28.027,34	N

Tabla 2 - Fuerzas Método Áreas aparentes

5. CÁLCULO DEL MODELO

5.1. DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS DE CÁLCULO

Según la norma anteriormente citada, se establece una presión dinámica del viento de 1,2 kN/m² para la instalación fuera de explotación. Este valor máximo será el empleado para la comparativa entre los diferentes métodos.

Este valor corresponde con una velocidad de 44,26 m/s o 159,34 km/h según la relación descrita en la siguiente formula:

$$P_{dinámica} = \frac{1}{2} \cdot \delta_{aire} \cdot v^2$$

Con motivo de realizar una prueba de sensibilidad a la velocidad de entrada de la simulación, cada una de las simulaciones se realiza con el valor nominal de velocidad

mencionado y otros dos valores, el primero un 20% inferior al valor nominal y el segundo un 20% superior como se muestra en la tabla 3.

Los valores de viento calculados son:

-20%	Velocidad nominal	+20%
35,41 m/s	44,26 m/s	53,12 m/s

Tabla 3 - Velocidades de viento consideradas

Las condiciones de contorno para la simulación definen un volumen de control en forma de prisma con la entrada de viento y sus distintas velocidades por la cara cuya normal es +Y denominada “inlet” y la salida por la cara posterior con la condición de no permitir el flowback. Todas las demás superficies tienen la consideración de paredes “wall” y la condición de residuales se establece con un límite de 10^{-3} .

5.2. PREPROCESO

La geometría empleada en el presente trabajo, suministrada por el fabricante LEITNER según puede verse en la figura 4, es la correspondiente a una torre convencional de 6 poleas de soporte por balancín y 15 metros de altura, no obstante, el análisis podría realizarse con cualquier otra geometría. El objetivo de las torres de soporte es el de mantener el cable separado del suelo a una altura suficiente de modo que los vehículos puedan salvar los obstáculos del terreno; El número de poleas está en estrecha relación con la longitud de los vanos adyacentes, la tensión del cable, el cambio de ángulo sobre la horizontal que se produce en la línea al paso del eje de la torre, el número de vehículos y, en definitiva, la carga que soportan los balancines.



Figura 4 - Imagen completa de la geometría obtenida.

El dimensionamiento de los balancines está ligado a la fuerza que deberá soportar según las distintas combinaciones de carga y la tipología dependerá de si estas cargas son positivas o negativas.

Para la preparación del modelo primero se ha modificado la posición del mismo en Autocad Mechanical de modo que el centro de la base de la torre quede en el centro de

coordenadas con los ejes x en la dirección longitudinal a la línea, el eje y en la dirección transversal a la línea y el eje z en la vertical.

En segundo lugar, se ha procedido a eliminar todos los elementos no considerados en el método de las áreas aparentes. Estos son, principalmente: perfiles huecos de escasa entidad como barandillas, escaleras del fuste, soportes de escalera, etc.

Posteriormente se han eliminado todas aquellas piezas que no son necesarias para la simulación. Al inicio se partió de un modelo con 1.700 piezas distintas, la mayoría de las cuales corresponden con tornillos, tuercas, arandelas, engrasadores, casquillos, pasadores, así como piezas internas del ensamblaje como refuerzos internos de las estructuras, centradores y anclajes de ejes principales de balancines. Todas esas piezas han sido eliminadas del ensamblaje conjunto de modo que el modelo y el archivo ha sido muy aligerado, permitiendo una mejor respuesta para las acciones y procesos posteriores. Un ejemplo de este proceso se ilustra en la figura 5, donde se han eliminado los pernos de la base de la torre, que no son relevantes para el cálculo de la resistencia al viento.

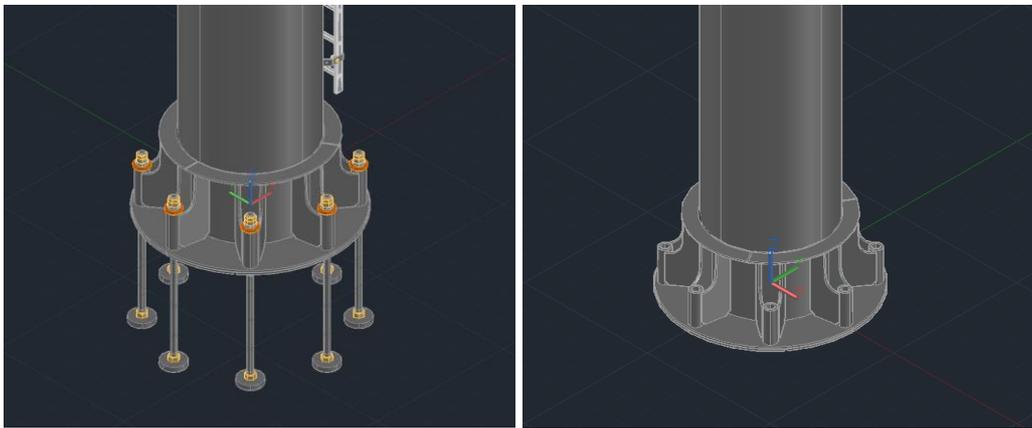


Figura 5 - Proceso de simplificación: original (Izda.) y simplificada (Dcha.)

Para introducir la geometría optimizada en ANSYS-FLUENT se han realizado las siguientes operaciones:

- Para el método de modelización en 3 partes se ha procedido a la división del modelo en 3 partes principales de simulación:
 - Fuste
 - Conjunto Ménsula, que contiene los elementos de ménsula, plataformas, balancines y poleas (todos situados en la misma zona)
 - Caballete
- Preparación del modelo completo para la simulación CFD.
- Se han exportado las 3 geometrías por separado y el modelo completo en formato .STEP al ser un formato de intercambio adecuado para ANSYS-FLUENT.
- Se han importado las geometrías comprobando la correcta disposición de los ejes seleccionados y las dimensiones del modelo.

A continuación, se han seguidos dos estrategias básicas para la preparación de las geometrías en SpaceClaim para preparar el mallado.

1. La generación de una nueva superficie con la herramienta Shrinkwrap sobre todo el modelo genera una superficie sobre todo el sólido eliminando algunos de los problemas principales de la geometría que impiden el mallado. En la figura 6 se muestra la transformación de la geometría.

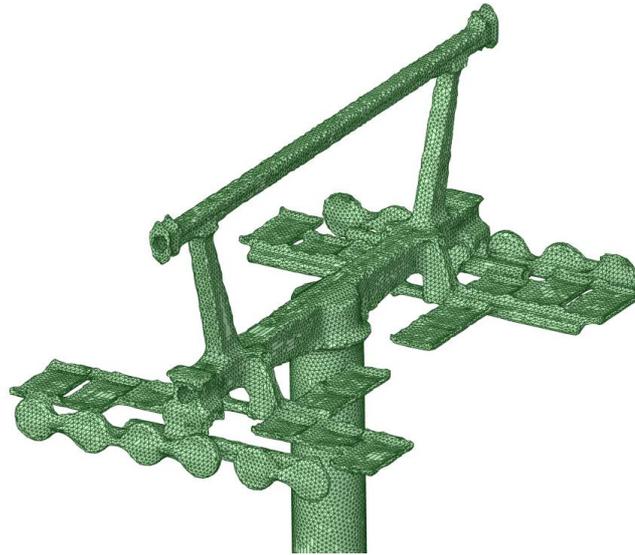


Figura 6 - Proceso Shrinkwrap para el modelo completo.

2. La identificación de elementos problemáticos y la supresión o modificación de los mismos para la simulación física de modo que el mallado se pudiese realizar.

Estos flujos de viento se introducen en FLUENT asignando una velocidad de entrada de viento en el eje “-y” (0 1 0) en la cara denominada “inlet” y que corresponde con la cara expuesta al viento transversal de la instalación a estudio.

5.3. MODELO CFD COMPLETO

En primer lugar, se ha realizado el modelo computacional de toda la geometría de la torre al completo. Para ello se ha generado una envolvente con sobremedidas de 2 metros en ambas direcciones del eje x, 2 metros sobre la parte superior del modelo, 5 metros desde la superficie de entrada de viento hasta el modelo, 10 metros hasta la zona de salida del flujo de aire y 0 metros en la cara inferior como se indican en la figura 7. La compleja geometría de la torre, unido a la alta variación en el tamaño de sus componentes donde algunos se miden por decenas de metros y otros por unos pocos milímetros ha dificultado obtener una malla válida. Finalmente se logró con una malla compuesta de 1.994.179 elementos tetraédricos.

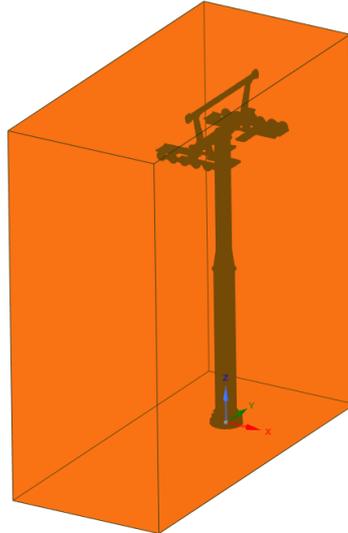


Figura 7 - Envoltente de modelo completo

Los resultados obtenidos para la velocidad nominal son los indicados en la tabla 4:

MODELO CFD COMPLETO			
	Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
Caballete	680,63	34,38	715,01
Ménsula	4541,66	69,13	4610,79
Fuste	5596,15	279,16	5875,31
Total			11201,11

Tabla 4 - Fuerzas Modelo Completo

Como resultado adicional de la simulación del modelo completo se incluye la figura 8, donde se muestran las distribuciones de presión en el plano YZ centrado en X=0.



Figura 8 – Presión en plano ZY en Modelo Completo

5.4. CONVERGENCIA DE MALLA

Para validar la simulación y otorgar suficiente confianza a los resultados encontrados, se ha realizado un análisis de convergencia de malla. Este, consiste en realizar una serie de mallas sobre el mismo volumen de control de modo que se aumenta progresivamente el número de elementos. Si la diferencia de resultados tiende a una asíntota horizontal en un diagrama Fuerza – N° de elementos, entonces se puede concluir que los resultados son confiables, en caso contrario el modelo y las ecuaciones no convergen y por tanto algo está distorsionando los resultados.

El análisis de convergencia se ha realizado para el modelo completo y con los siguientes números de elementos en 3 mallados distintos, los resultados se muestran en el gráfico de la figura 9 y la tabla 5.

- Malla 1 - 1.994.179 elementos
- Malla 2 - 3.011.599 elementos
- Malla 3 - 5.661.633 elementos

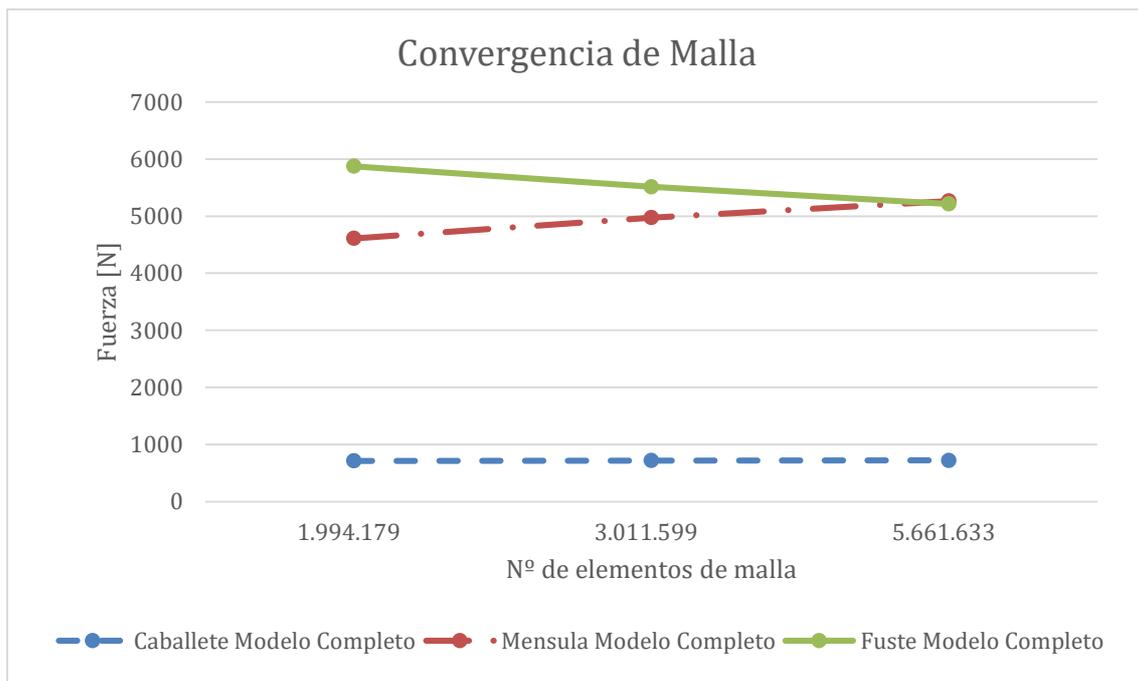


Figura 9 - Gráfico de convergencia de Malla

Análisis convergencia de malla Modelo Completo

	Nº elementos	Caballete	Ménsula	Fuste	Total
Malla 1	1.994.179	715,03	4610,8	5875,32	11201,15
Malla 2	3.011.599	719,83	4972,66	5513,12	11205,61
Malla 3	5.661.633	721,82	5264,03	5215,45	11201,30
Diferencia 1-2		0,67%	7,85%	-6,16%	0,04%
Diferencia 2-3		0,28%	5,86%	-5,40%	-0,04%

Tabla 5 - Datos de convergencia de malla

La tabla de convergencia de malla proporciona una visión esclarecedora sobre la estabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos en el análisis. A medida que se incrementa la densidad de la malla, se observa una tendencia general hacia la convergencia de las fuerzas calculadas. Las diferencias porcentuales entre las distintas mallas son en su mayoría pequeñas, lo que sugiere que las fuerzas están convergiendo hacia valores consistentes a medida que se refina la malla. Este patrón coherente es particularmente evidente en las diferencias entre las Mallas 1 y 2, así como entre las Mallas 2 y 3.

El análisis de convergencia de malla subraya la importancia de ajustar cuidadosamente la densidad de la malla en las simulaciones numéricas. A medida que la malla se hace más refinada, se obtienen resultados más estables y precisos. Sin embargo, también es crucial considerar el equilibrio entre la precisión y la carga computacional, ya que un aumento significativo en la resolución de la malla podría requerir recursos computacionales más sustanciales. En este caso, los porcentajes de discrepancia relativamente bajos entre las mallas indican que, en términos generales, se ha logrado un nivel adecuado de convergencia. Estos resultados respaldan la validez y robustez de los cálculos de fuerza y ofrecen una base sólida para la interpretación precisa de los efectos de viento transversal en el sistema analizado.

Todos los cálculos de este apartado se han basado en la velocidad nominal y los resultados en las mismas fuerzas en el eje Y, al igual que el resto del trabajo. Como conclusión a este análisis podemos indicar que los resultados son válidos y se toma la malla 1 como referencia para el resto del trabajo.

5.5. MODELO CFD EN 3 PARTES

En este apartado se repiten las simulaciones de flujo de viento sobre la estructura, pero esta vez en las tres partes por separado con el fin de observar las diferencias con el modelo completo y comprender mejor los resultados finales. Merece la pena destacar que, para el mallado de cada una de las partes del modelo, se han utilizado las mismas especificaciones de tamaño de elementos que se han utilizado para el modelo completo con la malla 1, de manera que podamos comparar simulaciones semejantes.

5.5.1. CABALLETE

Para el caballete se ha optado por la estrategia de Shrinkwrap. Dicha estrategia ha permitido el correcto mallado y simulación del modelo con la velocidad de viento asignada en la cara cuya normal es el eje (y) y la cara contraria como salida libre de presión, el resto de caras consideradas como muros, una vez realizado el mallado del volumen de control compuesto por 701.701 elementos se procede a la simulación del flujo de viento, de la que obtenemos la figura 10 correspondiente a la presión en el plano YZ sobre la superficie del caballete.

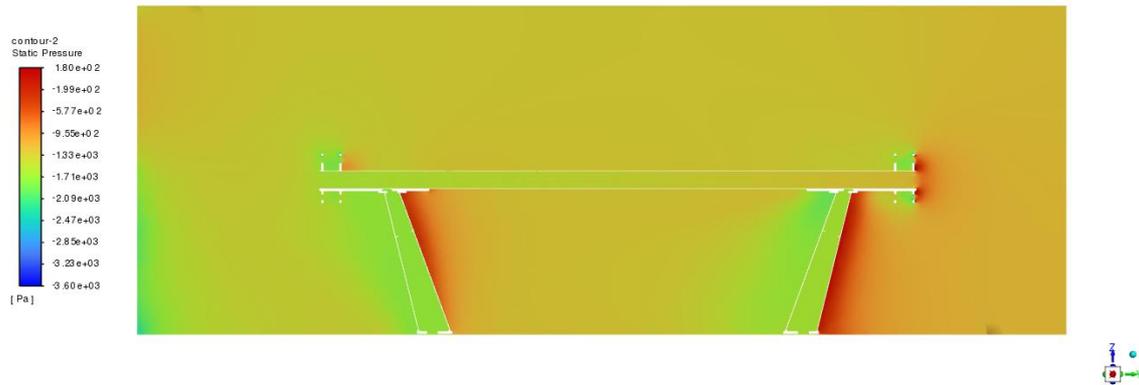


Figura 10 – Presión en plano YZ de caballete.

Una vez completado el cálculo con 80 iteraciones se ha obtenido una convergencia en el mismo y mediante la herramienta de reports/forces se han obtenido los valores para la dirección (0 1 0) que se muestran en la tabla 6.

Caballete Modelo 3 Partes

		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
Velocidad	44,26	1033,79	25,97	1059,76

Tabla 6 - Fuerzas Caballete Modelo en 3 partes

5.5.2. FUSTE

Para el fuste se ha optado por la estrategia de localizar y resolver los problemas de mallado de la geometría aprovechando la mayor sencillez de la misma. Dicha estrategia ha permitido el correcto mallado compuesto por 457.041 elementos. Se ha realizado la simulación del modelo con la velocidad de viento asignada en la cara cuya normal es el eje y la cara contraria como salida libre de presión y el resto de caras consideradas como muros. Una captura de la distribución de presiones se muestra en la figura 11 y los resultados de la misma en la tabla 5, donde se detallan los valores de fuerzas para la velocidad nominal.

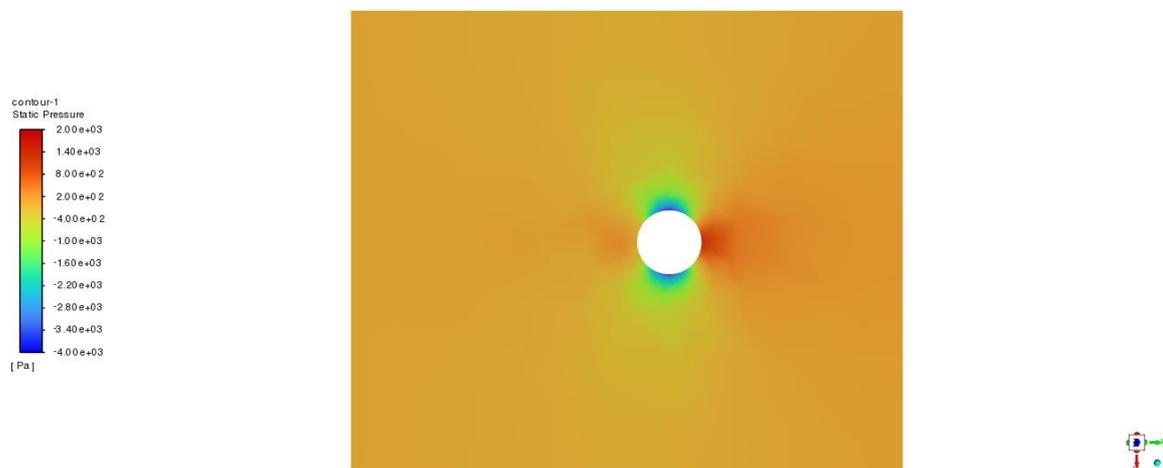


Figura 11 – Presión en el entorno del fuste, plano XY a 10 m de altura en Z.

Fuste Modelo 3 Partes

		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
Velocidad	44,26	5786,80	148,46	5935,26

Tabla 7 - Fuerzas Fuste Modelo en 3 Partes

5.5.3. MÉNSULA

Para la ménsula se ha optado, al igual que en caballete, por la estrategia de Shrinkwrap. Dicha estrategia ha permitido el correcto mallado con 738.023 elementos y se ha realizado la simulación con la velocidad de viento asignada en la cara cuya normal es el eje (y) y la cara contraria como salida libre de presión, el resto de caras consideradas como muros.

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 12, donde se reflejan los cambios de presión en el entorno de la superficie de estudio y los resultados de fuerzas de presión y viscosas se reflejan en la tabla 8.

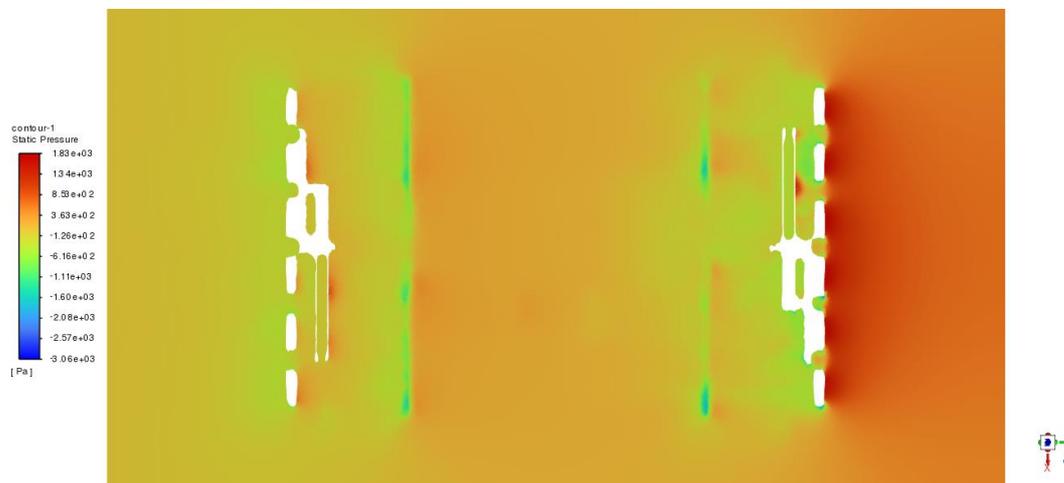


Figura 12 - Presión en el plano XY en Ménsula

Ménsula Modelo 3 Partes

		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
Velocidad	44,26	4059,89	54,32	4114,21

Tabla 8 - Fuerzas Ménsula Modelo en 3 Partes

5.6. COMPARACIÓN MODELOS CFD

A continuación, se comparan los resultados de ambos modelos. Para facilitar el análisis de los resultados se muestra la tabla 9 donde pueden comprobarse los diferentes valores de cálculo con los métodos CFD empleados para la misma fuerza en la dirección -Y.

Fuerzas – Modelos CFD			Unidades
	Modelo CFD 3 partes	Modelo CFD Completo	
Fuerza sobre el caballete	1.059,76	715,01	N

Fuerza sobre balancines			
Fuerza sobre la plataforma			
Fuerza sobre poleas			
Fuerza sobre la ménsula	4.114,21	4.610,79	N
Fuerza sobre fuste superior			
Fuerza sobre fuste inferior			
Fuerza sobre el fuste	5.935,26	5.875,31	N
TOTAL	11.109,23	11.201,11	N

Tabla 9 - Resultados para los 3 Métodos

Los valores obtenidos por los métodos CFD guardan una relación bastante cercana entre sí. En la tabla 9 y la figura 13 puede observarse que los valores de ambos modelos CFD guardan una relación muy cercana tanto visual como cuantitativamente con una variación inferior al 12% en la ménsula y de solo el 1% en el fuste. La fuerza sobre el caballete difiere un 33% con respecto al modelo completo. Analizando la simulación se ha llegado a la conclusión de que las fuerzas en dicho objeto están fuertemente apantalladas cuando se considera el modelo completo a diferencia del modelo en 3 partes. En cualquier caso, si nos fijamos en la fuerza total, vemos que la diferencia es mínima, de menos del 1%.

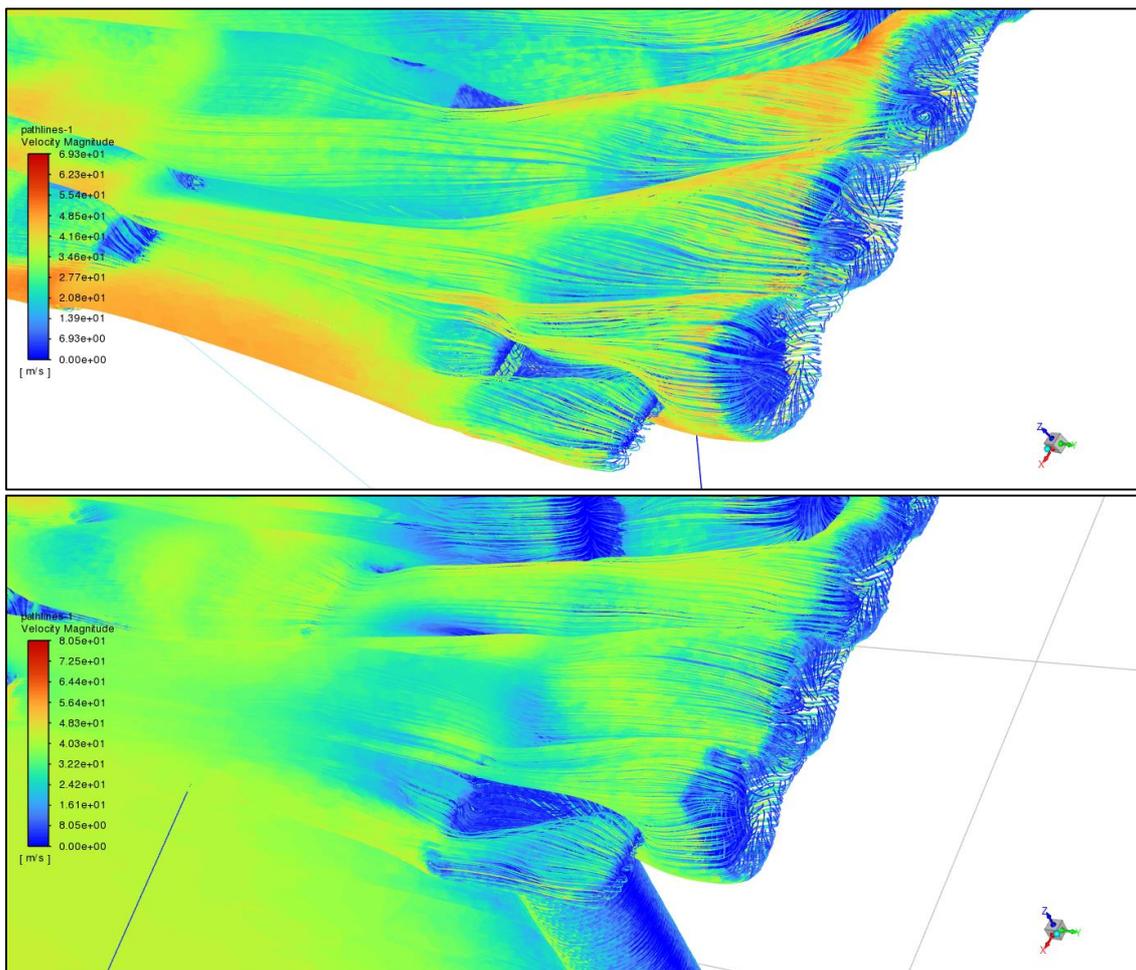


Figura 13 - Comparación resultados CFD en 3 partes (arriba) y completo (abajo)

Una vez analizados los resultados visuales y cuantitativos de ambos modelos y comprobar la escasa diferencia entre ellos optamos por elegir el modelo completo como el modelo que representa más fielmente la dinámica del viento en la torre, debido a la interacción integrada de todos sus elementos.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RESULTADOS

Se ha realizado un análisis de sensibilidad a la velocidad de entrada con el objetivo de comprobar cómo afecta la velocidad de entrada a los diferentes elementos de la torre. Se comprobarán que los resultados obtenidos son coherentes con lo esperado. Se han elegido el valor nominal, además un de un valor positivo y negativo del 20% para dicho análisis.

6.1. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA

Las tablas 10 y 11 condensa los resultados del análisis se sensibilidad para el modelo en tres partes y el modelo completo, respectivamente.

Caballote Modelo 3 Partes				
		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
-20%	35,41	661,91	17,12	679,03
V	44,26	1033,79	25,97	1059,76
+20%	53,12	1489,53	36,5	1526,03

Fuste Modelo 3 Partes				
		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
-20%	35,41	3751,17	98,65	3849,82
V	44,26	5786,80	148,46	5935,26
+20%	53,12	8358,20	204,23	8562,43

Ménsula Modelo 3 Partes				
		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
-20%	35,41	2597,26	36,51	2633,77
V	44,26	4059,89	54,32	4114,21
+20%	53,12	5605,18	71,39	5676,57

TOTAL MODELO 3 PARTES				
		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
-20%	35,41	7010,34	152,28	7162,62
V	44,26	10880,48	228,75	11109,23
+20%	53,12	15452,91	312,12	15765,03

Tabla 10 - Resultados variación de velocidad modelo 3 partes

Caballote Modelo Completo				
		Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total
-20%	35,41	438,31	22,90	461,21

V	44,26	680,63	34,38	715,01
+20%	53,12	976,19	48,00	1024,19

Mensula Modelo Completo

	Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total	
-20%	35,41	2920,08	45,76	2965,84
V	44,26	4541,66	69,13	4610,79
+20%	53,12	6517,45	97,06	6614,51

Fuste Modelo Completo

	Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total	
-20%	35,41	3677,03	185,21	3862,24
V	44,26	5596,15	279,16	5875,31
+20%	53,12	7904,57	390,84	8295,41

TOTAL MODELO CFD COMPLETO

	Fuerzas de presión	Fuerzas viscosas	total	
-20%	35,41	7035,42	253,87	7289,29
V	44,26	10818,44	382,67	11201,11
+20%	53,12	15398,21	535,90	15934,11

Tabla 11 - Resultados variación de velocidad modelo completo

Sobre las diferencias encontradas en los valores de fuerza según las 3 velocidades de viento consideradas se observa que las fuerzas de presión tienen una mayor variación mientras que las fuerzas viscosas no se ven tan afectadas. No obstante, para el régimen de velocidades considerado, la variación es según una proporción cuadrática como puede verse en los gráficos de las figuras 14 y 15, lo cual es lo esperable ya que la presión depende del cuadrado de la velocidad.

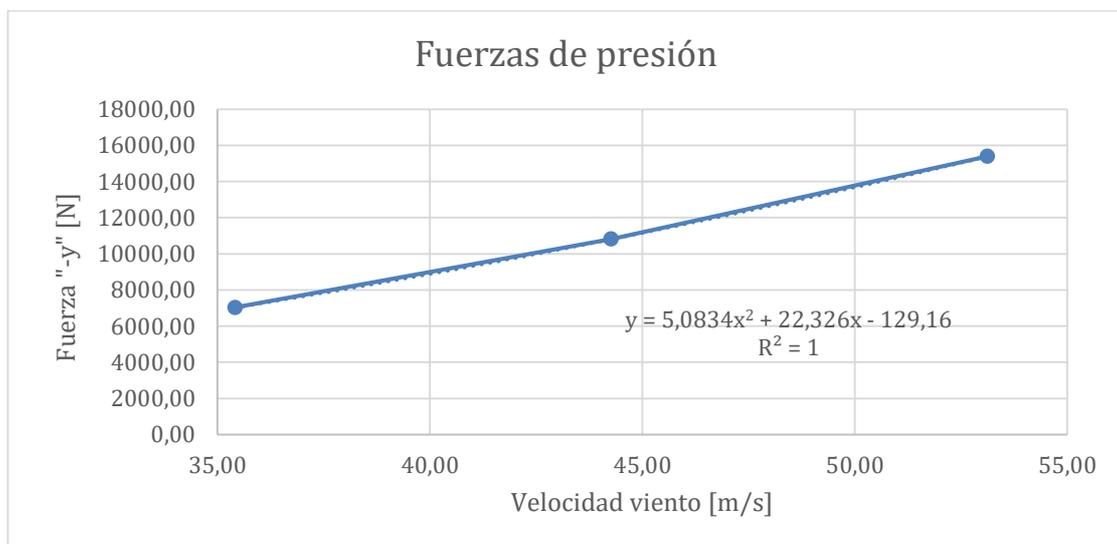


Figura 14 - Gráfico de Fuerzas de presión respecto a velocidad en modelo completo

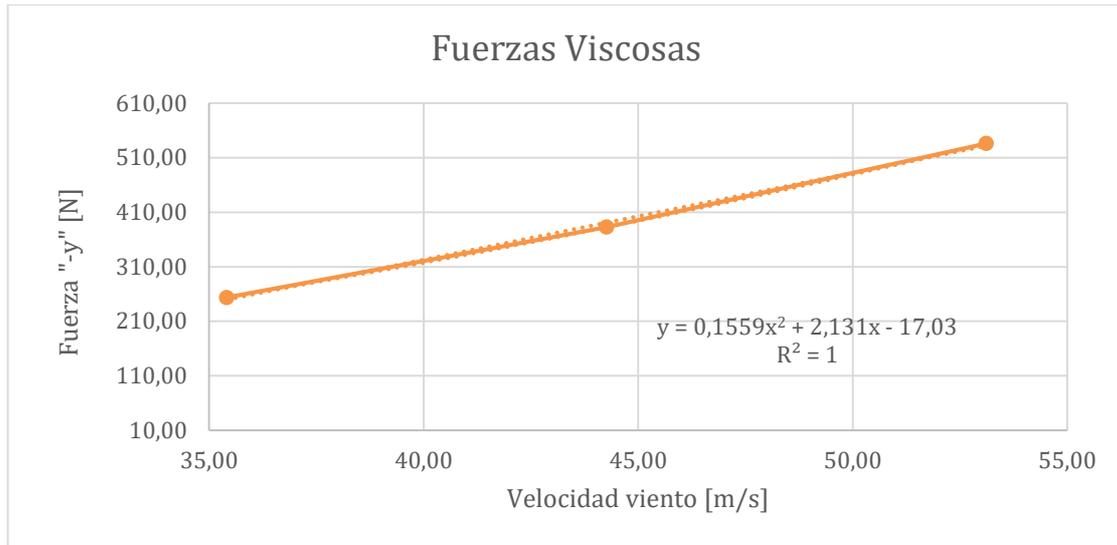


Figura 15 - Gráfico de Fuerzas viscosas respecto a velocidad en modelo completo

En la figura 16 se representa la diferencia de presión en el plano YZ entre las tres velocidades consideradas.

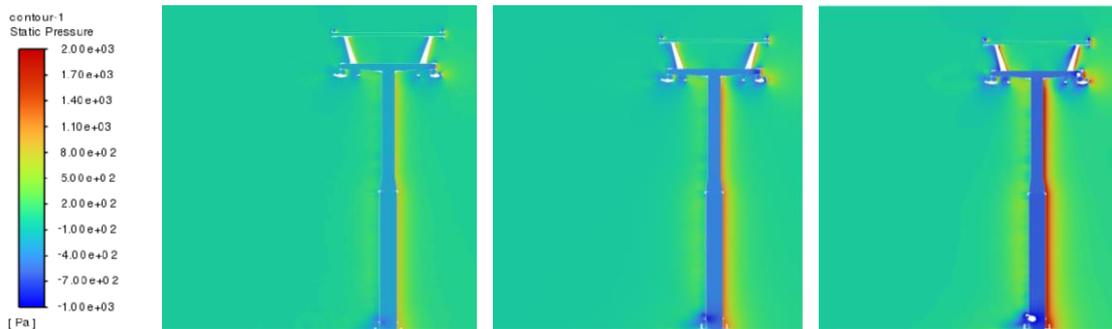


Figura 16 - Contorno de presión para 35,41 m/s (izquierda), 44,26 m/s (centro) y 53,12 m/s (derecha)

6.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS

Finalizado el cálculo y las simulaciones se analizan los resultados en conjunto. En la tabla 12 se recogen en una sola tabla los resultados del cálculo donde puede comprobarse la diferencia notable entre el método de las áreas aparentes y los modelos computacionales. El sumatorio final de esfuerzos con el método numérico excede el doble del valor de los modelos CFD debido a los coeficientes tomados y a la suposición de unas áreas mucho más extensas que la realidad de las geometrías.

Fuerzas - Viento transversal				Unidades
	Áreas Aparentes	Modelo CFD 3 partes	Modelo CFD Completo	
Fuerza sobre el caballete	489,22	1.059,76	715,01	N
Fuerza sobre balancines	2.365,44			N

Fuerza sobre la plataforma	2.280,96			N
Fuerza sobre poleas	1.692,89			N
Fuerza sobre la ménsula	6.339,29	4.114,21	4.610,79	N
Fuerza sobre fuste superior	7.726,68			N
Fuerza sobre fuste inferior	13.472,16			N
Fuerza sobre el fuste	21.198,84	5.935,26	5.875,31	N
TOTAL	28.027,34	11.109,23	11.201,11	N

Tabla 12 - Resultados de cálculo

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

Este trabajo ha definido un modelo CFD completo y otro dividido en 3 partes de la geometría de modo que las soluciones computacionales del flujo de viento y las fuerzas que producen sobre la estructura han permitido comparar los resultados con un método simplificado basado en las áreas aparentes.

El análisis de sensibilidad según las velocidades indica que no hay cambio de régimen en una variación de velocidades del 20% en torno a la velocidad nominal considerada y las variaciones son cuadráticas según lo esperable por la relación entre presión dinámica y velocidad de viento. Por otro lado, son importantes las diferencias encontradas entre los métodos CFD ya que evidencian las interferencias que unos elementos pueden tener sobre otros al someterlos a un flujo de viento. Este tipo de efectos distorsiona los resultados y se estima que en caso de ser posible siempre se deberá simular la geometría completa.

A modo de resumen, se puede afirmar que el modelo de las áreas aparentes está sobredimensionado y la simulación CFD obtiene en las simulaciones aquí planteadas alrededor de un 59% de reducción de los valores de fuerzas. Al ser la fuerza en el eje Y una relación lineal con la magnitud de los momentos considerados en la base de la torre para el cálculo de cimentaciones se puede concluir que las acciones consideradas en el método de las áreas aparentes con frecuencia tienen un valor de 2,5 veces la magnitud calculada. No obstante, a este valor habrá que restarle la influencia del viento en escaleras, barandillas, nieve y otras circunstancias. Es importante indicar que el método planteado como CFD completo permite al analista recabar una información de calidad sobre los esfuerzos de viento en la geometría completa. Además, el software empleado también extrae datos como puntos de aplicación de dichas fuerzas, en varios ejes, etc., pudiendo utilizarse como una herramienta apropiada para mejorar los análisis estructurales de estos elementos de cara a su implantación definitiva.

Durante el desarrollo de este trabajo se han establecido las bases para el estudio de estructuras de transporte por cable de un modo novedoso en la industria que sin duda podrá mejorar los diseños de los elementos, facilitar la construcción de los mismos, así como disminuir los costes asociados a la implantación sin empeorar las condiciones de seguridad de las instalaciones.

Con la vista puesta en futuro, el abaratamiento de los procesadores y el aumento significativo de la potencia de cálculo puede que resulten en una situación donde los

calculistas tengan este tipo de simulaciones comúnmente implantadas en su flujo de trabajo, pudiendo simular reacciones de viento en toda la estructura e incluso teniendo en cuenta elementos del entorno como árboles, orografía u otros obstáculos para modelizar la implantación completa de un sistema de transporte por cable.

Los trabajos futuros que amplíen el contenido de este trabajo pasan por establecer este tipo de análisis computacionales en función también de la variación en las condiciones de implantación, como son la variación en la densidad del aire según la altura, la respuesta a diferentes velocidades de viento, (vientos racheados, vientos en 2 componentes) y la influencia de acumulación de nieve y/o hielo, en combinación con la influencia de la altura de fuste y número de poleas por balancín, parámetros principales para el diseño de cada torre. Con toda esta información podría generarse tablas que caractericen las torres con los valores de fuerzas de viento, que sirvan a modo de guía para el diseño de la implantación de instalaciones de transporte por cable de un modo mucho más preciso que los métodos actuales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Llop Halli, «Proyecto Telesilla Valdezcaray I – Estación Invernal VALDEZCARAY».
- [2] M. J. Mora París, «Proyecto de construcción Telesilla 4CLF “B21” – Estación de esquí de Formigal».
- [3] S. K. S. D. a. P. P. R. Petrova, «Mathematical Simulation of Cross-Wind Vibrations in a Mono-Cable Chair Ropeway,» *Procedia Engineering*, 2011.
- [4] L. M. G. R. Jan Gustincic, «Analysis of Oscillations in a Cableway: Wind Load Effects,» *Modelling in Science Education and Learning*, 2013.
- [5] H. Z. a. D. X. Zhe Ma, «Numerical Simulation of the flow Past a Passenger Cable Car,» *6th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering*, 2020 .
- [6] G. G. a. T. L. Patrick Letzgun, «Computational fluid dynamics studies on wind turbine interactions with the turbulent local flow field influenced by complex topography and thermal stratification,» *Wind Energ. Sci*, 2022.
- [7] L. L. C. L. Chunming Liu, «Analysis of wind resistance of high-rise building structures based on computational fluid dynamics,» *International Journal of Heat and Technology*, 2018.
- [8] B. Launder y D. Spalding, «The numerical computation of turbulent flows,» *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*, 1974.
- [9] C. 5. 3. 28, «Conjunto de normas para la construcción y explotación de sistemas de transporte por cable,» *AENOR*, 2009-2022.
- [10] A. P. Iguaran, «Modelización mediante CFD de un campo eólico de aerogeneradores sin palas usando Vortex Induced Vibration (VIV),» *TFM Universidad de Zaragoza - Máster Universitario en Ingeniería Mecánica*, 2022.
- [11] A. N. Lafuente, «Análisis de una estructura plana sometida a acción,» *TFM Universidad de Zaragoza - Máster Universitario en Ingeniería Mecánica*, 2017.
- [12] H. K. V. -. W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*, Prentice Hall, Harlow, 1995.