



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Estudio de la interacción fluido-estructura en una placa plana en condiciones de acoplamiento unidireccional

*Trabajo de Fin de Máster - Máster en Ingeniería
Aeronáutica*

Autor: Francisco Sánchez Moreno
Tutor: Dr. DJorge García Tíscar

Junio 2019

Resumen

En el presente estudio se lleva a cabo un análisis de Interacción Fluido-Estructura (FSI) sobre una placa plana rectangular que está adherida por uno de sus lados a una barra de sección cuadrada encargada de generar turbulencia. Se asume como hipótesis que el acoplamiento es monodirección, también llamado *One Way*, lo que implica que se realiza el cálculo fluido-dinámico y el estructural separadamente. Se emplean StarCCM+ y Ansys Workbench respectivamente como software de cálculo.

La metodología seguida comienza por resolver el campo fluido de la geometría ya mencionada, para lo que es indispensable haber alcanzado previamente la independencia de dominio e independencia de malla en el cálculo CFD. Entre otros, el resultado fundamental a obtener del campo fluido es la evolución temporal del campo de presiones sobre la placa. A continuación se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para disponer de dichos campos de presiones en el dominio de la frecuencia y, tras esto, son importados al software de elementos finitos para hallar la respuesta armónica de la placa. Cabe decir que previo a esto también ha debido ser alcanzada la independencia de malla en este cálculo estructural. Finalmente, disponiendo de los resultados armónicos en el campo de la frecuencia y comparando con un estudio modal de la placa, que permite determinar las frecuencias naturales de la misma, es posible discutir la validez de la hipótesis asumida de acoplamiento *One Way*.

Tras el desarrollo del proyecto se ha llegado a conclusiones adicionales, como cuales son los parámetros fundamentales que gobiernan el problema y su influencia cuantitativa en el mismo, la importancia del trabajo con número adimensionales que permite generalizar la solución o el funcionamiento del fenómeno llamado *Vortex Shedding* y su importancia a la hora del diseño estructural del componente.

Palabras clave: interacción fluido-estructura, acoplamiento unidireccional, *One Way*, *Vortex Shedding*, dominio fluido, dominio estructural, placa plana, Reynolds, Strouhal, independencia de malla, independencia de dominio, frecuencia, LES, FFT.

Abstract

In the present study an analysis about Fluid-Structure Interaction (FSI) is carried out. The geometry is a rectangular flat plate which is attached by one of its sides to a square cross section bar. This bar is in charge of generating turbulence in the fluid. It is proposed as hypothesis that the coupling is just monodirectional, which is called as *One Way*. This implies the fluid-dynamics and structural calculations to be done separately. StarCCM and Ansys Workbench respectively are used for those calculations.

The followed methodology begins by solving the fluid field. To do that it is indispensable to have done previously a domain and mesh independence study for the CFD calculation. Among others, the main result from the fluid field is the temporal evolution of the pressure field over the plate.

After that, in order to have the data in the frequency field, the Fast Fourier Transform (FFT) is applied to that pressure field evolution obtained previously and then it is imported in the finite element software to compute the harmonic response of the flat plate. It is worth mentioning that before this structural calculation a mesh independence study must have been done here too.

Finally, comparing the harmonic response with the results from a modal calculation of the plate, which provides its natural frequencies, it is possible to discuss the validity of the *One Way* hypothesis proposed previously.

After the development of the present project some additional conclusions have been drawn, such as, the main parameters that govern the problem and their quantitative influence on it, the importance of working with dimensionless numbers which allow to generalize the solution or last but not least the functioning of the so-called *Vortex Shedding* phenomenon and its crucial importance on the structural design of the component.

Resum

Al present estudi es duu a terme un anàlisi d'Interacció Fluid-Estructura (FSI) sobre una placa plana rectangular que està adherida per un dels seus costats a una barra de secció quadrada encarregada de generar turbulència. S'assumeix com a hipòtesi que l'acoblament és mono direcció, també conegut com a *One Way*, fet que implica que es realitzen el càlcul fluid-dinàmic i l'estructural separatament. S'empren Star CCM+ i Ansys Workbench respectivament com a software de càlcul.

La metodologia seguida comença resolent el camp fluid de la geometria ja mencionada, per al que és indispensable haver assolit prèviament la independència de domini i la independència de malla al càlcul CFD. Entre d'altres, el resultat fonamental a obtenir del camp fluid és l'evolució temporal del camp de pressions sobre la placa.

A continuació s'aplica la transformada ràpida de Fourier (FFT) per a disposar dels anomenats camps de pressions en el domini de la freqüència i, després d'això, són importats al software d'element finits per a trobar la resposta harmònica de la placa. S'ha de destacar que previ a açò també s'ha hagut d'assolir la independència de malla en aquest càlcul estructural.

Finalment, disposant dels resultats harmònics al camp de la freqüència i comparant amb un estudi modal de la placa, que permet determinar les freqüències naturals de la mateixa, és possible discutir la validesa de la hipòtesi assumida d'acoblament *One Way*.

Després del desenvolupament del projecte s'ha arribat a conclusions addicionals, com quins són els paràmetres fonamentals que governen el problema i la seua influència quantitativa al mateix, la importància del treball amb nombres adimensionals que permet generalitzar la solució o el funcionament del fenomen anomenat *Vortex Shedding* i la seua importància a l'hora del disseny estructural del component.

*A mi familia, pareja, amigos,
y a mi profesor del colegio
D. Luis Armand Moya.*

Agradecimientos

No siendo tan sencillo como lo pueda parecer, me dispongo a agradecer a todas aquellas personas que han contribuido a que hoy por hoy pueda darme por satisfecho. Consciente de que me dejaré a alguien en el tintero, pido disculpas por ello, doy comienzo a esta labor.

En primer lugar, dar las gracias a mi tutor del trabajo, el profesor Jorge García, quien hizo posible esto allá por noviembre del pasado año confiando en mí para la realización de este proyecto. Y como no, mi agradecimiento también para Pedro Quintero, compañero de batallas diarias sin el cual no hubiera sido capaz de contar lo que ahora sigue, y al que le deseo el mejor de los éxitos en su cercana lectura de tesis. Tampoco puedo olvidarme de Ferran Roig quien, en todo momento, no ha dudado ni un segundo en prestarme apoyo y ayuda en cualquiera de las preguntas y favores de los que he precisado, deseándole también lo mejor en el final de sus estudios doctorales. Agradezco igualmente al personal de secretaría de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y del departamento CMT - Motores Térmicos por su asesoramiento y ayuda en todos los trámites burocráticos que esto conlleva.

Gracias a mi familia, pero especialmente gracias a mis padres y gracias a mis hermanos, con los que empiezo y acabo el día a pesar de no tenerlos cerca, pero aún así vosotros sabéis como hacer que vuestra ausencia no se haga un sacrificio. Gracias por vuestra paciencia, vuestra comprensión, por estar siempre ahí al pie del cañón y por hacer de mí lo que soy hoy. Por estos mismos motivos, también gracias a mi pareja, que sin ser consciente de ello eres partícipe de que este momento haya llegado. Tu optimismo y tu apoyo en todo momento han sido ingredientes esenciales para poder llegar hasta el final. Tampoco olvidaré a todos mis amigos, pandilla de pueblo y compañeros de clase y piso, porque siempre que habéis podido habéis aportado vuestro granito de arena de la mejor manera posible.

Y para acabar me gustaría mostrar mi gratitud hacia don Luis Armand, profesor del colegio ya retirado de la pedanía ceheginera de la que soy natal. Gracias por los valores académicos que me has transmitido desde que me cogiste con tres años de edad y me soltaste para entrar al instituto, valores que tienen mucha culpa de que yo este hoy aquí sentado escribiendo esto. Siempre te estaré agradecido.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Nomenclatura	XV
I MEMORIA TÉCNICA	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Caso de estudio y objetivos	4
1.4. Viabilidad del estudio	6
2. Marco teórico	7
2.1. Interacción fluido-estructura	7
2.1.1. Clasificación	8
2.1.1.1. Según el fluido	8
2.1.1.2. Según la estructura	9
2.1.1.3. Según el enfoque de resolución	9
2.1.2. Modelo matemático	10
2.1.2.1. Ecuaciones del fluido	10
2.1.2.2. Ecuaciones del sólido deformable	11
2.1.2.3. Acoplamiento del dominio fluido y sólido	12
2.2. Bases del análisis CFD	13
2.2.1. Introducción	13

2.2.2. Fases del análisis CFD	14
2.2.2.1. Geometría y dominio	16
2.2.2.2. Mallado	17
2.2.2.3. Modelos físicos básicos	23
2.2.2.4. Modelos numéricos	27
2.2.2.5. Condiciones de contorno	29
2.2.2.6. Convergencia de la solución	32
3. Metodología y herramientas	35
3.1. Cálculo fluido-dinámico	37
3.1.1. Independencia de malla	37
3.1.2. Independencia de dominio	40
3.1.3. Estimación del paso temporal para LES	42
3.1.4. Influencia del número de Reynolds	43
3.2. Cálculo estructural	47
3.2.1. Simplificación del dominio	47
3.2.2. Independencia de malla	48
4. Discusión de resultados	51
4.1. Estudio fluido-dinámico	51
4.2. Estudio mecánico	56
4.3. Estudio del acoplamiento	58
5. Conclusiones y trabajos futuros	67
5.1. Conclusiones del trabajo	67
5.2. Trabajos futuros	68
Bibliografía	68
II PLIEGO DE CONDICIONES	71
1. Pliego de condiciones	73
1.1. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	73
1.2. Disposiciones generales	73
1.3. Protección en los centros de trabajo	74

III	PRESUPUESTO	87
1.	Presupuesto	89
1.1.	Costes del proyecto	89
1.1.1.	Personal analista	89
1.1.2.	Hardware	90
1.1.3.	Software	90
1.2.	Presupuesto total	91

Índice de figuras

1.1. Geometría del caso a estudiar: (1) barra de sección rectangular y (2) placa plana de pequeño espesor.	5
1.2. Dominio para el cálculo fluido-dinámico.	5
2.1. Esquema de las disciplinas que componen la Interacción Fluido-Estructura.	8
2.2. Esquema de un problema general de FSI, identificando ambos dominios fluido y solido y las fronteras de cada uno donde se aplican las diferentes condiciones de contorno.	12
2.3. Diferentes tipos de elementos para mallas bidimensionales.	17
2.4. Esquema de relación de aspecto para elementos 2D triangulares y rectangulares.	20
2.5. Esquema de asimetría para un elemento triangular 2D.	21
2.6. Capa límite creada sobre una placa plana.	22
2.7. Producción de energía (E) en función de las escalas de la turbulencia, representadas por el número de onda (k).	25
3.1. Esquema de la metodología seguida en este proyecto.	36
3.2. Localización de la primera burbuja de recirculación.	37
3.3. Malla final del dominio fluido resultante del estudio de independencia de malla.	38
3.4. Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente al número de celdas.	39
3.5. Histograma representativo de la relación de aspecto (AR) y del coeficiente Y^+ de las celdas en contacto con las paredes de la barra y de la placa.	40
3.6. Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente a la longitud del dominio aguas arriba.	41
3.7. Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente a la longitud del dominio aguas abajo.	42
3.8. Histograma representativo del número de Courant en las distintas celdas del dominio.	43

3.9. Evolución temporal del C_l y del C_d para el Reynolds del problema real ($Re = 22596$).	45
3.10. Contenido en frecuencia del C_l y del C_d para el Reynolds del problema real ($Re = 22596$).	45
3.11. Evolución temporal del C_l y del C_d para el Reynolds del problema escalado ($\frac{Re}{2} = 11298$).	46
3.12. Contenido en frecuencia del C_l y del C_d para el Reynolds del problema escalado ($\frac{Re}{2} = 11298$).	46
3.13. Deformación tanto en la barra como en la placa obtenida con Ansys para un calculo estructural estático, habiendo importado una distribución de presiones obtenida mediante el cálculo CFD previo.	47
3.14. Variación de las 10 primeras frecuencias naturales con el número de celdas al cambiar el tamaño del elemento de la malla de superficie. Se toman 5 capas de elementos en el espesor de 2 mm.	49
3.15. Variación de las 10 primeras frecuencias naturales con el número de celdas al cambiar el número de capas de elementos en el espesor de 2 mm. Se toma el tamaño de elemento en la malla de superficie de 2.5 mm obtenido previamente.	49
3.16. Esquema de la malla final utilizada.	50
4.1. Efecto del <i>Vortex Shedding</i> sobre la magnitud de la velocidad en un plano medio donde no hay placa.	52
4.2. Efecto del <i>Vortex Shedding</i> sobre la magnitud de la velocidad en un plano medio donde sí hay placa.	52
4.3. Distribución de energía cinética turbulenta calculada, modelada y total en un plano medio de la placa.	54
4.4. Isosuperficie de vorticidad de $500 s^{-1}$ coloreada según la magnitud de la velocidad en el dominio. Permite extraer una idea de las estructuras vorticales en el dominio para dicho valor de vorticidad.	55
4.5. Presión media sobre la placa y velocidad en un plano superior y paralelo a la misma donde se pueden ver las burbujas de recirculación.	56
4.6. Modos de vibración de la placa para el rango de frecuencias de trabajo (0-2000 Hz).	57
4.7. Modos dominantes a distintas frecuencias. Puede verse que los siete modos son excitados.	59
4.8. Evolución de la deformación máxima de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia).	60
4.9. Evolución de la deformación media de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia).	61

4.10. Evolución de la deformación máxima de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia) aumentando la rigidez de la placa en 2.5 veces.	62
4.11. Solución de la deformación máxima de la placa ante un cambio en la velocidad del fluido de 22 m/s a 44 m/s.	64
4.12. Solución de la deformación máxima de la placa ante un cambio en la velocidad del fluido de 22 m/s a 44 m/s.	65

Índice de tablas

3.1. Influencia del número de Reynolds en el coeficiente de Lift (C_l).	44
3.2. Influencia del número de Reynolds en el coeficiente de Drag (C_d).	44
4.1. Frecuencias naturales de los 7 modos de vibración de la placa para el rango de frecuencias de trabajo (0-2000 Hz).	58
4.2. Valores numéricos de las deformaciones máximas a las frecuencias naturales de cada modo.	60
4.3. Comparación entre las frecuencias del C_l y del nuevo primer modo tras aumentar la rigidez de la placa en 2.5 veces.	62
1.1. Niveles mínimos de iluminación según el área de trabajo.	83
1.1. Coste del personal implicado en el procesado de datos y análisis realizados del proyecto.	90
1.2. Coste de los equipos informáticos empleados en el proyecto.	90
1.3. Coste de los software empleados en el proyecto.	91
1.4. Presupuesto total del proyecto.	91

Nomenclatura

Siglas y acrónimos

<i>AR</i>	Aspect Ratio
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CFL</i>	Courant-Friedrichs-Levy
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform
<i>FSI</i>	Fluid Structure Interaction
<i>ISA</i>	International Standard Atmosphere
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation
<i>RANS</i>	Reynolds averaged Navier-Stokes

Símbolos latinos

C_d	Coefficiente de resistencia
C_l	Coefficiente de sustentación
K_{calc}	Energía cinética turbulenta calculada
K_{mod}	Energía cinética turbulenta modelada
K_{total}	Energía cinética turbulenta total

L_{ref}	Longitud de referencia
u_i	Desplazamiento en la dirección i
U_∞	Velocidad incidente de flujo libre
v_i	Velocidad en la dirección i
a	Velocidad del sonido
E	Módulo de Young
e	Energía interna
f	Frecuencia
Ma	Número de Mach
N	Número de modos de vibración
p	Presión total
Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal
T	Temperatura
t	Tiempo
x,y,z	Coordenadas cartesianas de posicionamiento
Y_+	Distancia de pared adimensional

Símbolos griegos

Δt	Paso temporal
Δx	Tamaño de discretización espacial
ϵ	Deformación normal
η_i	Participación modal del modo i a un estado vibratorio
η_K	Cociente entre energía cinética turbulenta calculada y total
μ	Viscosidad dinámica
ϕ_i	Autovector del modo i
ρ	Densidad
σ	Tensión normal
τ	Tensión tangencial

Parte I

MEMORIA TÉCNICA

Capítulo 1

Introducción

Índice

1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Caso de estudio y objetivos	4
1.4. Viabilidad del estudio	6

1.1. Motivación

En muchas aplicaciones de ingeniería se dan situaciones en las que el flujo de un fluido, en la mayoría de los casos aire, genera vibraciones en un cuerpo sólido que está inmerso en dicho flujo. Pero además, eso no es todo, sino que la vibración de cuerpo sólido influye sobre el flujo inicial, alterándolo. Esta alteración en el flujo tendrá a su vez una nueva consecuencia sobre la vibración del cuerpo, y así sucesivamente. Se trata por tanto de un fenómeno de acoplamiento entre ambos comúnmente llamado *Interacción Fluido-Estructura* o *FSI* por su siglas en inglés.

En las últimas décadas, debido al incremento en la utilización de materiales ligeros para la construcción de componentes en contacto con un fluido en movimiento, la predicción precisa de la interacción fluido-estructura se ha convertido en un tema de investigación de interés primordial. La industria aeroespacial ha sido tradicionalmente uno de los mayores promotores de la investigación en el campo de la FSI por su indudable influencia en el sector, donde la utilización de estructuras livianas es fundamental para la reducción de peso. Por ejemplo, es bien conocido que si un ala se ve sujeta a un flujo a una determinada velocidad esta puede experimentar deformaciones estáticas inadmisibles (fenómeno de la divergencia) o oscilaciones periódicas de continua amplificación, llamado flameo.

Por otro lado, también la industria del automóvil juega un importante papel aquí. Si es cierto que en este tipo de aplicaciones, puesto que la velocidad de trabajo es mucho menor que en el caso de la industria aeronáutica, los desplazamientos y deformaciones generados por la FSI serán mucho menos cruciales. Sin embargo, el tópic conocido como NVH, por su siglas en inglés *Noise, Vibrations and Harshness*, entre los fabricantes de automóviles está cobrando cada vez más fuerza. Como consecuencia de la creciente exigencia de las regulaciones y de las expectativas de los consumidores, el ruido en la cabina

del automóvil es objeto de investigación continua en el sector, que como puede intuirse está muy relacionado con la interacción fluido-estructura. Este hecho, combinado con el desarrollo de motores cada vez más silenciosos, explica el creciente interés en FSI también en la industria del motor.

El interés de la interacción fluido-estructura se sitúa, en la mayoría de los casos, en las estructuras flexibles, cuyo caso más genérico y que aquí se estudia es una placa plana. Una explicación más científica al fenómeno de la anteriormente proporcionada viene expresada como sigue. Estas estructuras, como consecuencia del movimiento de flujo turbulento a su alrededor se ven sometidas a fluctuaciones de presión que acaban desencadenando un fenómeno vibratorio. La importancia del estudio de este fenómeno radica en el conocimiento de las frecuencias de vibración y su contenido espectral, ya que de coincidir estas con las frecuencias de resonancia la integridad de la estructura se vería comprometida, pues aparecería el ampliamente conocido fenómeno de resonancia donde la amplitud de las vibraciones es amplificadas de manera indefinida. Pero además, como consecuencia del amplio rango de frecuencias audibles por el ser humano, pueden aparecer problemas de ruido asociados a la interacción fluido-estructura, como anteriormente ya se ha mencionado.

1.2. Antecedentes

Como anteriormente se ha comentado, la Interacción Fluido-Estructura es una tecnología en crecimiento en la que cada vez se están invirtiendo más recursos de investigación para su desarrollo. El Instituto Universitario de Investigación CMT - Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, centro donde se lleva a cabo el presente estudio, hace lo propio y lleva ya algunos años investigando en este campo.

Entre otros, se toman como antecedentes a este proyecto los trabajos realizados por Pedro Quintero, miembro de este centro de investigación. Entre ellos, un artículo desarrollado en colaboración con la Universidad de KU Leuven (Bélgica) [1], donde se estudia la posibilidad de predecir vibraciones inducidas por un flujo de fluido sobre una geometría parecida a la que se analiza aquí. También ha servido de ayuda y de base la tesis doctoral del anteriormente mencionado investigador, en la cual se realiza una caracterización de los mecanismos de Interacción Fluido-Estructura y su aplicación al fenómeno vibroacústico.

1.3. Caso de estudio y objetivos

La Figura 1.1 representa la geometría que se estudia en este proyecto. Si bien es cierto que se trata de una configuración bastante simplificada, dicha geometría es muy representativa de casi todos los fenómenos físicos que aparecen en la realidad.

Consiste en una barra de sección cuadrada de lado $L_{ref} = 1.5$ cm y longitud 40 cm, que es la anchura de la sección del túnel de viento donde se pretende validar el estudio. La presencia de esta barra se justifica mediante la generación de flujo turbulento aguas abajo. En la parte posterior de la barra, como muestra la figura, se encuentra anclada una placa plana rectangular de pequeño espesor. El espesor es seleccionado en función del material con el objetivo de poder obtener unas deformaciones que sean apreciables con vistas a poder observarlas y medirlas con facilidad experimentalmente en el túnel de viento, pero dicho espesor tampoco debe ser demasiado pequeño por motivos de fabricación y de cálcu-

lo numérico. La anchura y profundidad de la placa, vistas según el flujo incidente, son de $10 \cdot L_{ref}$ y $\frac{13.3}{2} \cdot L_{ref}$ respectivamente.

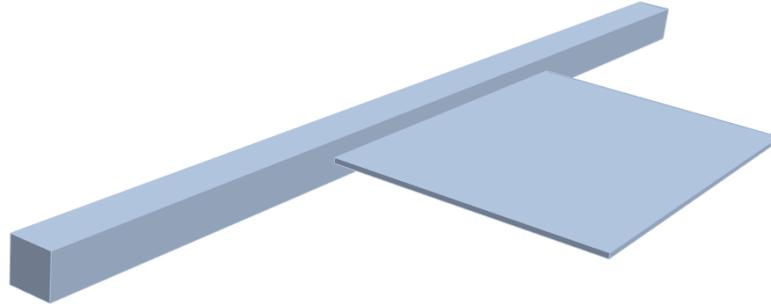


Figura 1.1: Geometría del caso a estudiar: (1) barra de sección rectangular y (2) placa plana de pequeño espesor.

Por otro lado, la Figura 1.2 muestra el dominio fluido utilizado para el cálculo fluido-dinámico. Como se puede observar, se trata de un conducto de sección cuadrada de 40x40 cm, que es precisamente la dimensión del área de medida en el túnel de viento. En cuanto a la longitud aguas arriba y aguas abajo, esta se determinará posteriormente mediante un estudio de independencia de dominio.

Para dicho estudio fluido-dinámico se utiliza aire en condiciones normales y a una altitud de nivel del mar. Por tanto, siguiendo el modelo de atmósfera ISA [2]:

- $T = 288.15 \text{ K}$
- $P = 101325 \text{ Pa}$
- $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 1.789 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- $a = 340.294 \text{ m/s}$

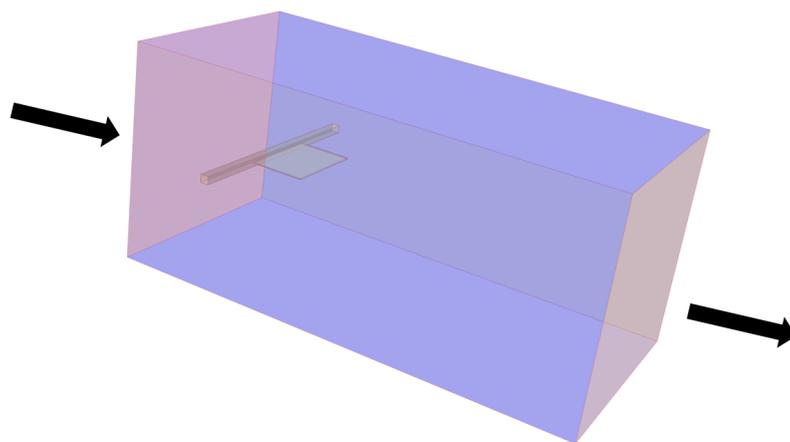


Figura 1.2: Dominio para el cálculo fluido-dinámico.

Además, se utiliza una velocidad del aire a la entrada de $V_\infty = 22$ m/s, lo que se corresponde con un número de Reynolds de en torno a 22600, que indica la presencia de turbulencia, y un número de Mach de 0.064 lo que indica que el flujo se puede asumir como incompresible (comúnmente se utiliza 0.3 como valor límite).

Tras realizar el estudio fluido-dinámico se obtendrá un campo de presiones alrededor de la placa, el cual variará con el tiempo. Este campo de presiones será importado en un software de elementos finitos para llevar a cabo el cálculo estructural vibratorio de la estructura. Tras esto se analizará la validez de la hipótesis asumida de acoplamiento *One Way* en la metodología de cálculo, donde los análisis fluido-dinámicos y estructurales se han realizado separadamente y con software diferentes.

Cabe mencionar en este punto que para abordar el cálculo estructural solamente se importa la geometría de la placa al software de elementos finitos. Esta simplificación, que como se verá es bastante realista y permite reducir el coste computacional, se validará en el capítulo 3 mediante una simulación simple.

En lo referente a los objetivos perseguidos en este proyecto con el caso de estudio que se acaba de presentar se encuentran:

- Ahondar en la creciente investigación de la Interacción Fluido-Estructura y justificar la validez de la hipótesis asumida de acoplamiento monodireccional *One Way*.
- Comprender los mecanismos de vibración que tienen lugar en la placa de la Figura 1.1, analizando en detalle los modos de vibración de la misma.
- Estudiar los parámetros de los que depende el problema y su relación con el acoplamiento monodireccional.
- Analizar en concreto la influencia del número de Reynolds. Una independencia de este número adimensional supondría la posibilidad de utilizar los resultados CFD ya obtenidos para problemas similares con otros fluidos, otras dimensiones y otras condiciones termo y fluido-dinámicas. Esto simplificaría y agilizaría mucho la resolución del problema.
- Por último, pero no por ello menos importante, es un objetivo también la familiarización con el manejo de software tanto para cálculos CFD como para cálculos estructurales por elementos finitos.

1.4. Viabilidad del estudio

El presente estudio se ha realizado en el Instituto Universitario de Investigación CMT - Motores Térmicos, el cual pertenece a la Universidad Politécnica de Valencia. Este centro de investigación dispone de todos los recursos requeridos para llevar a cabo el proyecto en su totalidad, tanto recursos informáticos como instalaciones y personal profesional. Todos los costes económicos asociados a la investigación corren a cuenta de CMT - Motores Térmicos. De este modo, la viabilidad del proyecto que pues garantizada.

Capítulo 2

Marco teórico

Índice

2.1. Interacción fluido-estructura	7
2.1.1. Clasificación	8
2.1.2. Modelo matemático	10
2.2. Bases del análisis CFD	13
2.2.1. Introducción	13
2.2.2. Fases del análisis CFD	14

2.1. Interacción fluido-estructura

Un fluido que pasa sobre una estructura genera un campo de presiones y de tensiones tangenciales sobre dicha estructura que en caso de que esta sea suficientemente flexible puede dar lugar a desplazamientos considerables. Como consecuencia, estos desplazamientos podrían afectar al propio flujo de fluido originando así un sistema acoplado.

La interacción fluido-estructura (FSI) es una materia muy interdisciplinar y de mucho interés para la gran mayoría de los investigadores en el campo de la dinámica de fluidos. Es importante notar que existe interacción fluido-estructura de dos modos diferentes, tanto en sistemas naturales como en sistemas artificiales. Aunque la naturaleza de la interacción entre el sólido y el fluido sea diferente se enmarcan ambas bajo el paraguas de FSI. Como ejemplos de FSI en un sistema natural se pueden mencionar la interacción entre un árbol y el viento o la interacción entre el suelo y las aguas subterráneas. Referente a los sistemas artificiales, pueden encontrarse por ejemplo el campo de desplazamientos de una presa de un embalse o la capacidad de vuelo de un avión.

Tradicionalmente, la industria aeronáutica ha sido una de las promotoras liderando la investigación en FSI. El motivo principal reside en la gran utilización de materiales ligeros en este campo, con el objetivo de reducir el peso. De este modo, una predicción correcta de la deformación elástica permite predecir las condiciones de vuelo que ponen en peligro al avión [3].

Como anteriormente se ha comentado, la interacción fluido-estructura es un campo muy interdisciplinar que puede ser descompuesto en tres grandes disciplinas:

- **Dinámica del sólido:** estudia el movimiento inercial de cuerpos y estructuras complejas bajo una combinación de cargas aplicadas.
- **Mecánica del sólido:** estudia la deformación de una estructura bajo una combinación de cargas aplicadas.
- **Dinámica de fluidos:** permite caracterizar el campo de presiones y de tensiones tangenciales creado sobre un cuerpo sólido causado por el fluido que lo rodea.

De un modo más gráfico, la Figura 2.1 muestra la naturaleza interdisciplinar de la FSI. En ella se puede observar el tradicionalmente llamado Triángulo de Collar que fue propuesto en la década de los 40s por el profesor A.R. Collar [4].



Figura 2.1: Esquema de las disciplinas que componen la Interacción Fluido-Estructura.

2.1.1. Clasificación

La interacción fluido-estructura se puede clasificar atendiendo a diferentes aspectos.

2.1.1.1. Según el fluido

El fluido que interacciona con el sólido puede ser tanto un gas como un líquido. Esto tiene una influencia directa sobre la compresibilidad: para interacciones líquido-sólido siempre se asume flujo incompresible mientras que para interacciones gas-sólido se puede considerar tanto flujo compresible como incompresible. Cuando el número de Mach sea inferior a 0.3 se asumirá flujo incompresible para la interacción gas-sólido.

La principal aplicación de la interacción gas-sólido es la obtención de las fuerzas aerodinámicas en estructuras, como pueden ser las alas de un avión, lo que también es llamado aeroelasticidad. Se puede diferenciar entre aeroelasticidad estática y dinámica: la primera

de ellas trata del estudio de las fuerzas aerodinámicas y elásticas mientras que la segunda incluye al conjunto de fuerzas anterior las fuerzas inerciales.

2.1.1.2. Según la estructura

De igual modo, la estructura que interacciona con el fluido puede estar formada tanto por cuerpos rígidos como deformables, lo que atiende a esta segunda clasificación. Los materiales de ambos cuerpos pueden ser tanto compresibles como casi incompresibles.

Tanto la interacción de cuerpo rígido como deformable con un fluido esta en la mayoría de los casos fuertemente acoplada, lo que genera un fuerte influencia sobre las fuerzas del sólido y del fluido. Dentro de la interacción fluido-cuerpo deformable la naturaleza de dicho cuerpo deformable puede variar desde modelos elásticos lineales muy simples hasta modelos no lineales muy complejas de materiales no elásticos. Por otro lado, cabe notar también que aunque el problema de la interacción fluido-cuerpo rígido es normalmente más simple, la dinámica del movimiento del cuerpo rígido requiere una solución que considere las fuerzas del fluido.

2.1.1.3. Según el enfoque de resolución

El último criterio de clasificación tiene que ver con la metodología de resolución del acoplamiento entre el dominio del fluido y del sólido.

- Método monolítico: en este método la interacción se resuelve utilizando un único solver que se encarga de llevar a cabo la resolución tanto de la parte del fluido como del sólido al mismo tiempo. Se trata de una metodología muy estable que permite usar grandes pasos temporales sin afectar a la estabilidad numérica. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran la necesidad de desarrollar un software *ad hoc* para el problema y los grandes requerimientos de recursos computacionales, como puede ser la memoria RAM.
- Método segregado: en este caso se resuelven por separado secuencialmente la parte del fluido y la parte del sólido utilizando para ello códigos comerciales ya creados, sin necesidad de desarrollar un software *ad hoc* como en el caso anterior era preciso. Esta metodología de cálculo se utiliza para resolver diferentes niveles de acoplamiento.
 - Acoplamiento *One Way*: es el caso más sencillo, se supone que un único dominio afecta al otro, es decir, no hay acoplamiento. A pesar de su simplicidad este modelo permite obtener soluciones razonablemente precisas para un amplio rango de aplicaciones ingenieriles, especialmente aquellas relacionadas con vibraciones inducidas por flujos y vibroacústica. Además, puesto que existe solamente acoplamiento en una dirección entre el flujo y la estructura, resolviendo el campo fluido solamente una vez permite obtener resultados estructurales para un amplio rango de materiales y geometrías, siempre y cuando la geometría de la interfaz fluido-estructura sea la misma.
 - Acoplamiento *Two Way*: en este caso existe una influencia tanto por parte del fluido sobre la estructura como por parte de la estructura sobre el fluido. Es un caso más complejo de resolver que el anterior. Sin embargo, según sea la intensidad del acoplamiento, se puede subdividir en:

- Acoplamiento explícito: tiene lugar cuando las deformaciones causadas sobre la estructura no son muy elevadas. El acoplamiento entre ambos dominios se resuelve en una única iteración interna por paso temporal. Como consecuencia pueden aparecer problemas de estabilidad puesto que los residuales en la interfaz entre ambos dominios adquieren valores considerablemente altos. En el caso en que la densidad de los materiales tanto del sólido como del fluido sean parecidas el paso temporal deberá ser muy bajo para poder hacer frente a dichos problemas de estabilidad numérica.
- Acoplamiento implícito: en esta situación la intensidad del acoplamiento es la más alta posible, por lo que la resolución se lleva a cabo utilizando un número determinado de iteraciones internas para un mismo paso temporal. Como consecuencia de esto los residuales en la interfaz entre los dominios se minimizarán y desaparecerán los anteriores problemas de estabilidad del caso explícito, por lo que se puede concluir que el acoplamiento implícito es más estable con grandes pasos temporales.

2.1.2. Modelo matemático

2.1.2.1. Ecuaciones del fluido

Para fluidos monofase, ya sean compresibles o incompresibles, las ecuaciones que definen su comportamiento son las mostradas en (2.1).

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + f_i \\ \frac{\partial}{\partial t} [\rho (e + \frac{1}{2} v_i v_i)] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho (e + \frac{1}{2} v_i v_i) v_j] = \frac{\partial}{\partial x_j} (-p v_j + \tau_{ji} v_i + k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \rho f_i v_i + Q \\ e = e(T, p) \quad \rho = \rho(T, p) \end{cases} \quad (2.1)$$

Estas ecuaciones comprenden: la ecuación de conservación de la masa, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento o de Navier-Stokes y la ecuación de conservación de la energía. Cabe decir que, a veces, generalizando, se le suele llamar a todas estas como ecuaciones de Navier-Stokes aunque propiamente sean solo las de momento. A estas ecuaciones se les añade una ecuación de estado para terminar de cerrar el problema. Las variables que, según estas ecuaciones, definen el comportamiento del fluido son: ρ es la densidad local del fluido; v_i es la componente i -ésima del vector velocidad, \vec{v} ; p es la presión local del fluido; τ_{ij} es la componente ij -ésima del tensor de esfuerzos cortantes τ ; f_i es la componente i -ésima del vector de fuerzas másicas, \vec{f} ; e se define como la energía interna local del fluido; k es la conductividad térmica del fluido; T es la temperatura y Q es el término fuente de la ecuación de la energía que permite modelar fenómenos como reacciones químicas y/o radiación de calor.

Cabe comentar además, que para el caso de fluidos Newtonianos, que es lo más habitual, τ_{ij} se puede expresar según la ecuación (2.2), donde μ es la viscosidad cinemática y δ_{ij} es la delta de Kronecker.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_\nu - \frac{2}{3}\mu \right) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.2)$$

Todas estas ecuaciones se pueden resolver haciendo uso de métodos numéricos como volúmenes finitos o elementos finitos, siendo el primero de ellos el más habitual cuando se trata de cálculo de fluidos. Otro modo de resolver este tipo de ecuaciones es mediante los Métodos de Lattice-Boltzmann, que no es más que un artificio matemático que emula la física de las ecuaciones de Navier-Stokes.

2.1.2.2. Ecuaciones del sólido deformable

A continuación se presentan las ecuaciones generales que se resuelven para la parte del sólido deformable. En primer lugar, combinando las ecuaciones de conservación masa y de cantidad de momento se obtiene la ecuación (2.3) para el campo de desplazamientos del sólido deformable.

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} + b_i \quad (2.3)$$

En la ecuación anterior, ρ representa la densidad del cuerpo sólido; u_i hace referencia al desplazamiento de dicho cuerpo en la dirección i ; b_i es la componente i -ésima de cualquier fuerza de volumen presenta y σ_{ij} son las componentes del tensor de tensiones normales, que se pueden relacionar con el tensor de deformaciones, $\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right)$, por medio de la ecuación (2.4).

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.4)$$

En la ecuación anterior c_{ijkl} son las constantes que permiten relacionar para cualquier combinación de cargas aplicadas la tensión y la deformación. Estas constantes, para el caso en el que el sólido es isotrópico y las tensiones son suficientemente pequeñas, se pueden asumir tal y como muestra la ecuación (2.5), donde E es el módulo de Young del sólido y ν es el coeficiente de Poisson.

$$\begin{cases} c_{iiii} = \alpha = E \cdot \frac{\nu-1}{2(\nu+1)(\nu-\frac{1}{2})} \\ c_{iijj} = c_{jjii} = \beta = -E \cdot \frac{\nu}{2(\nu+1)(\nu-\frac{1}{2})} \\ c_{ijij} = c_{jiji} = \chi = E \cdot \frac{1}{2(\nu+1)} \end{cases} \quad (2.5)$$

Por tanto, una vez que se han establecido estas relaciones, la ecuación (2.3) se puede expresar de forma vectorial como una función solamente del campo de desplazamientos, tal y como muestra la ecuación (2.6), donde Q es un operador diferencial que para el caso anteriormente comentado de sólido elástico, isotrópico y lineal se puede obtener mediante la ecuación (2.7).

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\chi}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) & (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \alpha \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\chi}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) & (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} & (\beta + \frac{\chi}{2}) \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} & \alpha \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\chi}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.1.2.3. Acoplamiento del dominio fluido y sólido

Tras haber introducido en los apartados anteriores las ecuaciones de ambos dominios fluido y sólido se procede a explicar el acoplamiento entre ambos para resolver el problema de Interacción Fluido-Estructura. La Figura 2.2 muestra un esquema arbitrario del problema FSI. En el se puede apreciar el dominio fluido, denotado por Ω_{fluido} , donde se aplican las ecuaciones (2.1), y también el dominio del sólido, $\Omega_{sólido}$, gobernado por la ecuación (2.3).

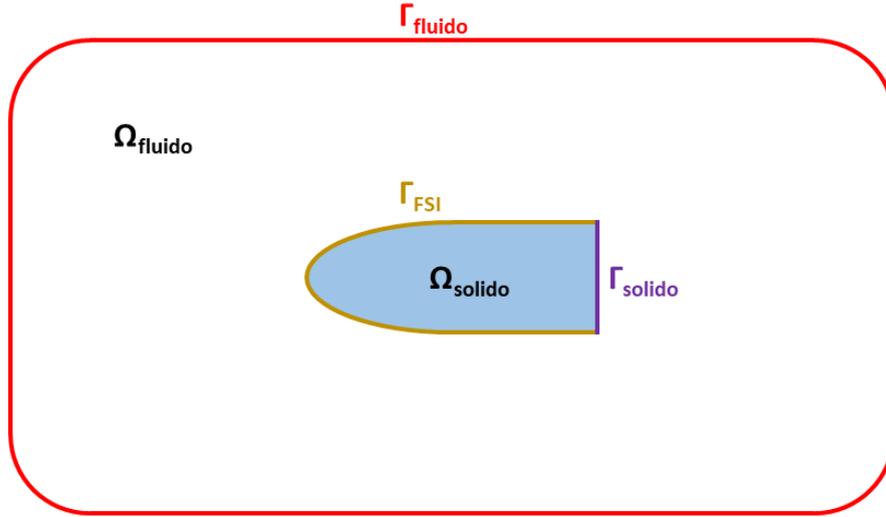


Figura 2.2: Esquema de un problema general de FSI, identificando ambos dominios fluido y sólido y las fronteras de cada uno donde se aplican las diferentes condiciones de contorno.

Como se puede apreciar en la figura anterior, se pueden distinguir tres tipos de fronteras, y por tanto tres tipos de condiciones de contorno, en el problema de interacción fluido-estructura.

Por un lado se encuentra la frontera Γ_{fluido} que representa la superficie en contacto únicamente con el fluido. Aquí se pueden aplicar las condiciones de contorno típicas de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Por otro lado $\Gamma_{sólido}$ denota la superficie donde se aplican las condiciones de contorno del sólido, puesto que ahí se conoce el campo de desplazamientos. Se trata de los apoyos o empotramientos de la estructura.

Por último, y lo que supone el *quid* de la cuestión, Γ_{FSI} representa la superficie donde el dominio fluido y el dominio sólido están en contacto y por tanto donde se da el acopla-

miento. En esta superficie se deben aplicar las condiciones de contorno tanto del fluido como del sólido.

En la superficie Γ_{FSI} aparece una velocidad de pared como consecuencia del movimiento del fluido relativo al sólido. Debido a esta velocidad, a menos que se haya simplificado el problema asumiendo fluido no viscoso, la condición de contorno en la pared se denomina condición de no deslizamiento. Esta condición establece que la velocidad de un punto de esta región perteneciente al sólido será igual que la de un punto perteneciente al fluido, tal y como se expresa en (2.8).

$$v_i^{sólido} = v_i^{fluido} \quad \text{en } \Gamma_{FSI} \quad (2.8)$$

Del mismo modo, también se debe asegurar la continuidad de tensiones en la interfaz Γ_{FSI} . Para ello, las tensiones normales y tangenciales en la parte sólida deben ser iguales a las de la parte fluida, lo cual viene representado en la ecuación (2.9). Para el caso particular en el que el dominio sólido se encontrase inmerso en el vacío o la velocidad del fluido fuese cero, puesto que no habría acoplamiento, las tensiones en dicha frontera serían obviamente nulas.

$$p\delta_{ij}n_j + \tau_{ij}n_j = c_{ijkl} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2.9)$$

Finalmente, cabe comentar como la presión y la tensión tangencial del fluido en la interfaz, representados por p y τ_{ij} en la ecuación (2.9), crean un campo de cargas aplicadas sobre el sistema sólido. Estas cargas aplicadas en el sólido dan lugar a un campo de desplazamientos en el mismo, el cual, a través de la condición de contorno de no deslizamiento de la ecuación (2.8), afectará al dominio fluido. Aquí se puede observar el fenómeno del acoplamiento.

2.2. Bases del análisis CFD

En este apartado se procede a exponer una base teórica del análisis mediante cálculo CFD, hablando sobre las grandes ventajas del mismo que lo hacen fundamental para llevar a cabo estudios de la índole del desarrollado en este documento. Además, también se explica detalladamente el proceso a seguir a la hora de crear y configurar un caso CFD completo.

2.2.1. Introducción

La gran mayoría de los problemas reales que existen en la naturaleza que involucran flujos y sus relaciones con el entorno no pueden ser resueltos de un modo analítico, excepto casos muy particulares. Una de las razones es básicamente la gran complejidad de todos los problemas que se dan en la realidad, donde existe un fuerte acoplamiento entre muchos fenómenos. Otro motivo muy contundente reside en la imposibilidad de resolver las ecuaciones que gobiernan la física de estos flujos, llamadas ecuaciones de Navier-Stokes,

de modo analítico, ya que sencillamente no presentan una solución general analítica¹.

De este modo, se hace imprescindible la utilización de técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics) para resolver problemas reales de esta índole. Las herramientas CFD utilizan métodos numéricos y algoritmos que permiten resolver las ecuaciones que modelan el comportamiento del fluido en la región que se desea estudiar, así se obtienen soluciones cuantitativas a los problemas que no serían posibles mediante métodos analíticos. Cabe notar que la solución obtenida será siempre una solución aproximada, puesto que todas las soluciones numéricas son siempre soluciones aproximadas, pero pese a esto se pueden obtener niveles de precisión considerablemente altos a costa de consumir más recursos informáticos, lo que implica un mayor coste computacional.

A grandes rasgos, el proceso seguido en un análisis CFD comienza generando la geometría y/o dominio a estudiar. Tras esto, dicho dominio de cálculo se discretiza mediante la generación de una malla. Todas las ecuaciones de conservación que modelan el comportamiento del fluido en el caso de estudio se resuelven en cada uno de los elementos infinitesimales resultantes del mallado. Una vez se ha obtenido ya la solución, se procede a estudiar la convergencia del cálculo y el sentido de los resultados obtenidos para lo que se pueden emplear técnicas experimentales o comparación con casos ya resueltos en la bibliografía.

2.2.2. Fases del análisis CFD

Un estudio CFD puede dividirse en tres grandes etapas principalmente, las cuales a su vez engloban otra serie de etapas fundamentales. La correcta realización de dichas etapas, en orden secuencial además, juega un papel muy importante en la obtención de la solución correcta al problema.

Estas tres etapas principales pasan a describirse a continuación.

1º Preproceso

Como anteriormente se ha comentado, este es el primer paso en un cálculo CFD. Es una etapa de suma importancia ya que en ella se definen una serie de especificaciones que permiten configurar el cálculo. Un mal preprocesado podrá acabar dando lugar a divergencia en el cálculo, a interrupción en el cálculo o incluso a la resolución de un problema que no tiene nada que ver con lo que se intentaba resolver.

- Modelado conceptual: este paso a realizar suele comenzar en la gran mayoría de las ocasiones mediante una revisión bibliográfica de estudios similares. Se trata de analizar ciertas simplificaciones que se puedan llevar a cabo con el objetivo de simplificar el cálculo y reducir el coste computacional pero sin modificar la física del problema.
- Geometría y dominio: se procede a crear la geometría y el dominio de cálculo, ya que en muchas ocasiones no es exactamente lo mismo. Depende mucho de si se trata de un cálculo de aerodinámica interna o aerodinámica externa.

¹En realidad, este es uno de los 7 problemas del milenio. La obtención de una solución analítica general para las ecuaciones de Navier-Stokes está premiada con una suma de 1 millón de dólares por el *Clay Mathematics Institute* estadounidense.

- **Mallado:** discretización de la geometría en pequeños elementos infinitesimales en los que se calculan las ecuaciones de conservación. Se pueden usar diferentes tipos de elementos en el mallado, los cuales también dependen de si la malla es bidimensional o tridimensional. Esta etapa es importancia capital ya que determina el coste computacional y la convergencia del cálculo y también la precisión.
- **Modelos y propiedades del fluido:** básicamente se trata de configurar el modelo que defina la física del problema y las características del fluido a resolver.
- **Condiciones de contorno:** es muy importante de cara a obtener una solución realista la selección de unas acertadas condiciones de contorno. Notar que no solo es importante el valor, sino también que tipo de condición de contorno existirá en cada una de las fronteras del dominio que se resuelve.
- **Condiciones iniciales:** se debe fijar un valor inicial para ciertas variables del cálculo que determinarán la convergencia de la solución y la velocidad con que dicha convergencia sea alcanzada.

2º Cálculo

Las ecuaciones que se han definido en el modelo de física en la parte de preproceso son resueltas ahora de un modo discreto, es decir, en cada uno de los elementos que componen la malla, también creada en el preproceso. Para esta discretización se usan normalmente en todos los software de CFD volúmenes finitos.

El proceso que se sigue en la resolución del cálculo es el siguiente:

1. En primer lugar se introducen en cada elemento de la malla las ecuaciones del modelo físico que se van a resolver.
2. Estas ecuaciones, como se ha dicho anteriormente, son discretizadas. El objetivo es pasar de un sistema de ecuaciones diferencial a un sistema algebraico.
3. Finalmente se aplica alguno de los disponibles métodos numéricos iterativos para resolver el sistema algebraico de ecuaciones.

Cabe mencionar que el coste computacional o tiempo de cálculo que se requiere en la resolución del problema depende del nivel de precisión que se desea obtener, lo cual está intrínsecamente relacionado con el tamaño de las celdas tras el mallado.

Para poder finalizar el cálculo, entendiendo obviamente que este ha convergido, se fijan diferentes tipos de criterios de convergencia o de parada. El criterio más adecuado en cada caso dependerá del problema que se está resolviendo.

3º Postproceso

La finalidad perseguida en el postprocesado de los resultados obtenidos en la etapa de cálculo no es más que presentar dichos resultados de un modo adecuado tal que permitan realizar los diferentes análisis perseguidos. Por ejemplo, algunas de las técnicas que se pueden llevar a cabo son las que se muestran a continuación.

- **Visualización de la malla:** esto es de gran interés pues permite observar donde esta presenta menor calidad, ya sea por su elevado tamaño de elemento o por la mayor deformación de las celdas, y así poder mejorarla y obtener una mejor convergencia y precisión.

- Visualización de magnitudes: estas magnitudes, las cuales pueden ser escalares o vectoriales, pueden ser representadas tanto en un gráfico XY como sobre una escena del dominio o geometría que se está analizando, permitiendo así ver su distribución espacial.
- Visualización de líneas de corriente: la gran utilidad que presenta esta opción es que permite al usuario determinar exactamente como se mueven las partículas de fluido en el dominio de cálculo.

Por medio de estas herramientas de extracción de resultados es posible llevar a cabo diferentes análisis de gran importancia para determinar si el cálculo CFD se ha realizado correctamente. Algunos de estos se muestran a continuación.

- Análisis de independencia de malla: aquí se pretende obtener un tamaño de celda de la malla, producto de la discretización del dominio, que no influya a penas en la solución obtenida. Este valor de tamaño de celda se selecciona además mediante un compromiso entre la precisión obtenida y el coste computacional del calculo, pues a menor tamaño mayor precisión pero también mayor coste computacional.
- Análisis de independencia de dominio: muchas veces la separación existente entre las fronteras del dominio no son lo suficientemente grandes, de modo que estas afectan a la solución obtenida. Por lo tanto, se lleva a cabo un análisis iterativo donde al final se determina un dominio, obviamente lo más pequeño posible, que ya no tenga ninguna influencia sobre la solución que se obtiene del cálculo.
- Validación del modelo: para llevar a cabo este análisis se recurre a ensayos experimentales o a problemas similares que ya estén resueltos en la bibliografía. El objetivo es determinar si la solución obtenida representa la realidad.
- Análisis de sensibilidad: se lleva a cabo cuando existe algún tipo de incertidumbre acerca de un dato concreto del cálculo.

2.2.2.1. Geometría y dominio

Se trata de uno de los primeros pasos al realizar un cálculo CFD y es de crucial importancia, ya que cuanto mayor represente la realidad la geometría creada computacionalmente mayor será la veracidad de los resultados. Esto es fundamental ya que excesivas simplificaciones en el modelado de la geometría pueden conducir a la resolución de un problema totalmente diferente al que se pretende resolver.

Pese a que en la vida real cualquier geometría es siempre tridimensional, según sea la finalidad del análisis se puede recurrir a geometrías unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. Como es obvio, a mayor dimensiones del problema mayor será el coste computacional del cálculo pero también mayor será el nivel de realismo. Si bien, muchas veces se aceptan dichas simplificaciones, sobretodo en las primeras etapas de un proyecto, ya que de este modo se pueden lanzar cálculos más rápidos y realizar las primeras variaciones.

Cabe notar que para el presente estudio se utiliza una geometría y dominio completamente tridimensional, sin posibilidad de reducción a bidimensional. El motivo se reduce básicamente a un de los objetivos del proyecto: puesto que se pretende realizar un cálculo LES (Large Eddy Simulation) para resolver las escalas grandes de la turbulencia pierde totalmente el sentido el usar una geometría 2D ya que la turbulencia es, en sí misma, un fenómeno completamente tridimensional.

2.2.2.2. Mallado

El mallado es de capital importancia en los análisis CFD. Una configuración perfecta del caso pero con un mallado incorrecto y desproporcionado resultará en una solución incorrecta para el problema. Por tanto, la fase de mallado es una de las más importantes del proceso y requiere además de una gran experiencia en cálculo CFD para poder llevarla a cabo de un modo directo y correcto, en cualquier otro caso es un proceso iterativo y lento por lo general.

Las ecuaciones que se seleccionan para modelar el flujo son resueltas en pequeños subdominios procedentes de la discretización del dominio, este es el objetivo del mallado. El mallado llevado a cabo debe ser capaz de captar todos los fenómenos y efectos fluido-dinámicos que ocurren en el problema si este se quiere resolver con éxito. Además, tras la discretización de la geometría anteriormente modelada el mallado debe ser capaz de representarla lo más fielmente posible, lo cual es más complejo y costoso para geometrías curvas, como es obvio. Es por esto que el coste computacional se relaciona fuertemente con el tamaño de malla o número de celdas y a su vez con la fiabilidad de los resultados. Aquí es donde entra en juego el análisis de independencia de malla anteriormente comentado, donde se llega a un compromiso entre tiempo de cálculo y precisión de resultados.

Por otro lado, al igual que la geometría puede ser creada en una, dos o tres dimensiones, con el mallado ocurre lo mismo, ya que este es meramente una discretización de dicha geometría. Sin embargo, según sea la dimensión del mallado los elementos utilizados en la malla serán diferentes², como se procede a explicar a continuación.

2.2.2.2.1. Malla bidimensional: elementos

Puesto que se trata de mallas de superficie los elementos en este caso no tendrán volumen, solo aristas y vértices. Las tres posibilidades, las cuales se van a explicar a continuación, pueden apreciarse en la Figura 2.3.

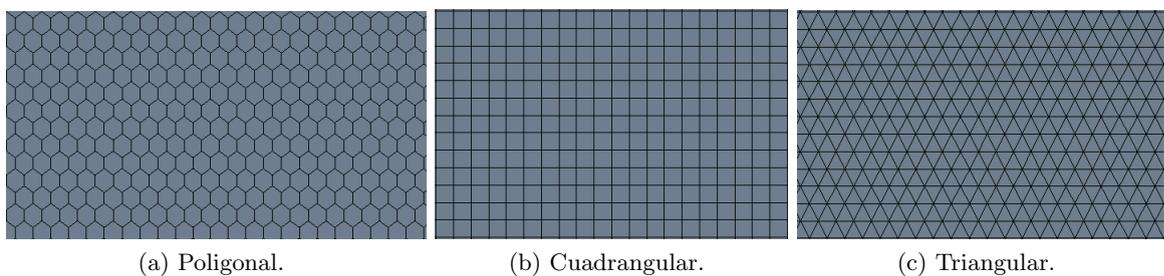


Figura 2.3: Diferentes tipos de elementos para mallas bidimensionales.

Elementos poligonales

Este tipo de elemento, que puede observarse en la Figura 2.3a, se puede utilizar para mallar cualquier tipo de geometría independientemente de su complejidad. Sin embargo, por contra, se emplean más elementos y la precisión obtenida es menor en comparación con mallas con elementos cuadrangulares. Además, este tipo de elementos son idóneos cuando no se conoce la dirección preferente del flujo.

²Es directo deducir que para mallas unidimensionales los elementos siempre serán iguales: segmentos.

Elementos cuadrangulares

Mostrados en la Figura 2.3b, permiten mallar superficies obteniendo una mayor precisión y utilizando un menor número de elementos y menor coste, puesto que facilita la discretización de las ecuaciones en el dominio. A pesar de esto, que los hace idóneos, son mucho más complejos de utilizar con geometrías que no sean cuadrangulares u ortogonales, tales como geometrías curvas, generando contornos irregulares y celdas puntiagudas de muy poca calidad. Esto hace que la disminución de coste computacional con este tipo de elementos quizá no salga a cuenta porque el tiempo invertido en realizar la malla para ciertas geometrías es mucho superior. Este tipo de elementos son muy aconsejables cuando se conoce la dirección preferente del flujo en el dominio.

Elementos triangulares

Este tipo de elementos de malla, que pueden visualizarse en la Figura 2.3c, son un tipo particular de elementos poligonales, por lo que todas las características expuestas en el respectivo apartado son válidas aquí también. Si bien, cabe comentar que, puesto que se tratan los triangulares de elementos más pequeños para un tamaño base dado, serán necesarios más elementos si la malla es triangular para poder captar la superficie con el suficiente detalle requerido.

2.2.2.2. Malla tridimensional: elementos

Los elementos que conforman este tipo de malla tridimensional si que tienen volumen, por lo que están compuestos por vértices, aristas y caras. Se distinguen tres tipologías.

Elementos poliédricos y prismáticos

Este tipo de elementos constituyen una extensión de los elementos poligonales en 2 dimensiones al caso tridimensional. Además, suelen ser los elementos más utilizados en el mallado de geometrías tridimensionales por su relativamente simple adaptabilidad a cualquier geometría, también las complejas.

Análogamente a sus pares en 2D, este tipo de elementos son interesantes cuando no se conoce la dirección preferente del flujo. Además, pese a ser más sencillos y rápidos de emplear en mallas tridimensionales para geometrías complejas, se requiere de más elementos y se obtiene menor precisión que en mallados mediante elementos prismáticos.

Elementos prismáticos de base rectangular

Como anteriormente se ha comentado, permiten un mallado con menos elementos y se puede obtener más precisión que con elementos poliédricos del mismo tamaño base. Sin embargo, son más complejos de utilizar en el mallado de geometrías complejas, como curvas, por lo que la reducción en el coste computacional por la utilización de menos elementos puede que no sea muy rentable ya que el gasto de tiempo para llevar a cabo un buen mallado se incrementa mucho, tal y como ocurría para los elementos cuadrangulares en 2D.

Este tipo de elementos son muy recomendables cuando se conoce la dirección preferente del fluido en el dominio.

Elementos tetraédricos

Estos elementos son una extensión de los elementos triangulares en 2D. No son más que pirámides de base triangular. Todas las características que se detallan en el anterior apartado de elementos triangulares son aplicables aquí.

2.2.2.2.3. Estructura y tipología de malla

Los tipos de malla también se pueden clasificar según su estructura.

Malla estructurada

Este tipo de malla es el que se realiza a partir de un conjunto de $n \times m$ de elementos que son regulares, es decir, para dos dimensiones se deben de utilizar rectángulos mientras que para tres dimensiones se utilizarán hexaedros de caras regulares (tendrá caras rectangulares o cuadradas).

Como en el caso de elementos cuadrangulares o prismáticos de base rectangular, que anteriormente han sido comentados, puesto que esta tipología de malla es creada a partir de dichos elementos, se pueden extrapolar sus características: se pueden emplear menor número de elementos para un tamaño base determinado, la discretización del dominio se hace más sencilla y la precisión en el cálculo es mayor, sobretodo si la dirección del flujo y la del mallado están alineadas, sin embargo el mallado se hace más difícil para geometrías complejas, tales como cuerpos curvos. Como consecuencia, el nivel de automatización en el mallado en este caso es mucho más bajo y requiere de mayor guiado por parte del usuario para obtener una malla de calidad aceptable.

Malla no estructurada

En esta tipología de mallas entran todas aquellas mallas que no presentan ninguna limitación en la creación de la misma y que pueden ser creadas a partir de cualquier tipo de elemento. Esto dota al software, por tanto, de mayor automatización en este proceso de creación de la malla. Si bien, pese a esta libertad de elementos también puede emplear elementos regulares. Cabe destacar además que se pueden obtener mallas de gran calidad mediante esta técnica en la que el usuario no presta tanta atención al mallado.

En lo que respecta a la precisión del cálculo empleando mallas no estructuradas, dicha precisión no cambia mucho aunque la dirección del flujo no esté alineada con la dirección de los elementos en el mallado. Esto hace a este tipo de mallas muy adecuadas para aquellos problemas en los que no se conoce la dirección preferente del flujo.

Malla híbrida

Como el propio nombre indica, este tipo de malla es una combinación entre malla estructurada y no estructurada. Por tanto, combina características de ambas. Puesto que una malla estructurada siempre que sea posible es preferible, se utiliza malla estructurada en todas aquellas zonas del dominio en las que sea fácil de crear, mientras que para las zonas complejas se utiliza una malla no estructurada de calidad aceptable, acelerando así

el proceso de mallado. Para las zonas de malla estructurada y no estructurada se utilizarán elementos hexaedros y tetraedros respectivamente, mientras que para la zona de transición se usan como elementos pirámides de base cuadrada.

2.2.2.2.4. Calidad de malla

La calidad de la malla es un factor determinante a la hora tanto de que el cálculo converja y como de obtener una solución precisa y realista. Por tanto, se deben verificar algunos parámetros de la malla antes de comenzar con el cálculo para comprobar que las celdas no están excesivamente deformadas, como son la relación de aspecto (o *aspect ratio*) y la asimetría (o *skewness*) y ortogonalidad.

Relación de aspecto (AR)

Este parámetro se obtiene como el cociente entre la longitud más larga entre la más corta de un elemento. Este valor de relación de aspecto óptima puede tomar diferentes valores según la localización y orientación de la celda en el dominio, como se puede ver a continuación.

- Menor que 10 para celdas que están orientadas según la dirección del flujo.
- Menor que 3 para celdas que están orientadas en una dirección perpendicular a la del flujo.
- Mayor que 100 en la capa límite y con la celda orientada según la dirección del flujo.

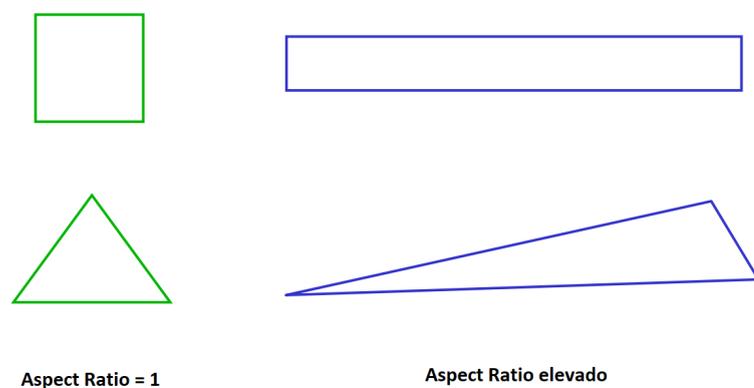


Figura 2.4: Esquema de relación de aspecto para elementos 2D triangulares y rectangulares.

Cabe comentar dentro de este apartado, por su relación con él, que existe otro factor a tener en cuenta en lo referente a la calidad de la malla. Este es la tasa de crecimiento. Este parámetro fija una tasa máxima para evitar un crecimiento excesivamente rápido y abrupto que puede suponer problemas para la convergencia y coherencia de la solución.

Asimetría y ortogonalidad

La asimetría o *skewness* es un parámetro que mide la deformación de un elemento respecto de su geometría regular, tal y como muestra la Figura 2.5 para el caso de un elemento triangular 2D. Este parámetro, que va desde 0 a 1, se puede calcular mediante la siguiente ecuación (aunque existen otros modos alternativos).

$$Skewness = \frac{\text{Tamaño de celda óptima} - \text{Tamaño de celda}}{\text{Tamaño de celda óptima}} \quad (2.10)$$

Cuanto mayor sea este parámetro y por tanto menos regulares sean y más distorsionados estén los elementos, más posibilidades existirán de tener problemas con la convergencia de la solución, y si es que dicha convergencia se alcanza se podrán obtener valores incoherentes. Esto es debido a que este parámetro está directamente relacionado con el error de discretización. Hay incluso casos en los que, por la excesiva deformación y distorsión de la celda, esta aparezca con un volumen negativo, lo cual supone problemas en la inicialización del cálculo, y si es que dicho cálculo ya está inicializado la solución se detendrá.

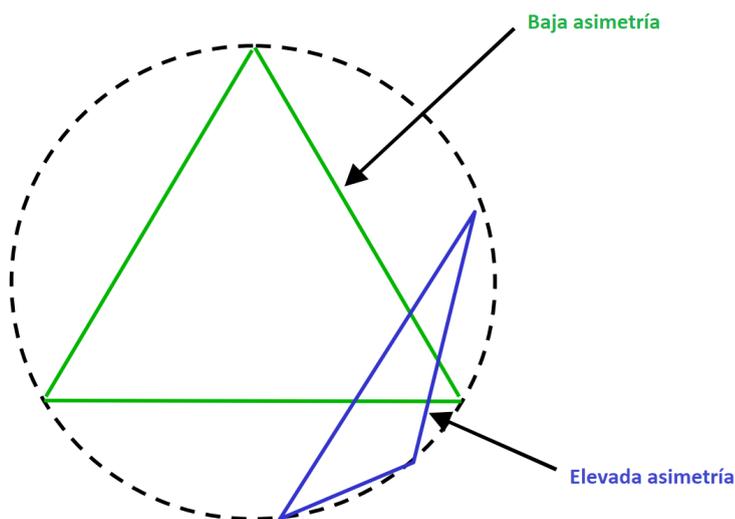


Figura 2.5: Esquema de asimetría para un elemento triangular 2D.

2.2.2.2.5. Capa límite

Como después se comentará en sucesivas secciones acerca de las condiciones de contorno, en la de tipo pared en concreto, sobre la superficie de un cuerpo la velocidad del fluido es nula debido a la viscosidad del fluido (y por tanto a la fricción), lo que se denomina condición de no deslizamiento. Esto hace que se genere una delgada capa de pequeño espesor que es la denominada capa límite. En dicha región existen importantes gradientes en las propiedades del fluido y la velocidad, como muestra la Figura 2.6. Por lo tanto, es preciso realizar un mallado adaptado a esta zona para poder captar los fenómenos ahí presentes: mallado de capa límite.

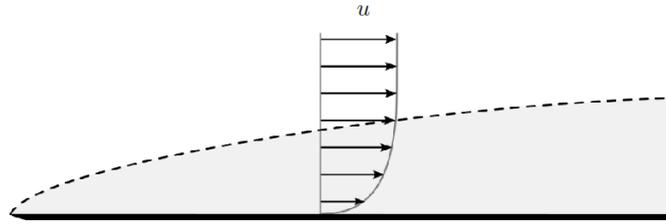


Figura 2.6: Capa límite creada sobre una placa plana.

Puesto que en la capa límite es bien conocida la dirección del flujo, se pueden utilizar elementos rectangulares y hexaedros en 2D y 3D respectivamente para llevar a cabo el mallado, todo ello independientemente del tipo de mallado y tipo de elementos que se utilicen fuera de esta región de la capa límite.

Los elementos empleados en la capa límite, como se ha comentado en la sección anterior, pueden presentar valores de relación de aspecto mucho más elevados que los elementos situados fuera de dicha capa límite, del orden de 100. Sin embargo, tampoco pueden ser excesivamente grandes en cuyo caso aparecerían problemas de divergencia en la solución por la excesiva deformación de los elementos y por ende por una mala discretización.

El grosor de los elementos de la capa límite va incrementándose conforme se aumentan las capas de mallado hasta conseguir un grosor parecido al de la primera celda situada fuera de la región de la capa límite. Así se consigue que la tasa de crecimiento no sea muy abrupta, como anteriormente también se comentó.

A la hora de determinar de un modo fiable la capacidad de resolución de la capa límite se define un parámetro denominado y^+ . Este no es más que un indicador de la distancia mínima entre la pared y el centroide de un elemento que está situado en la primera capa del mallado de capa límite realizado. Es un parámetro adimensionalizado con los esfuerzos cortantes en la pared, tal y como muestran las siguientes ecuaciones.

$$y^+ = u_\tau \cdot \frac{y_p}{\nu} \quad (2.11)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}} \quad (2.12)$$

Para obtener valores de este parámetro se sigue un proceso iterativo. En primer lugar se hace un cálculo estimativo y se representan los valores de y^+ sobre la superficie de la capa límite. A continuación se modifican los parámetros de la malla de capa límite y se vuelven a visualizar dichos valores de y^+ y así sucesivamente hasta obtener el valor deseado.

Por norma general, para poder resolver con calidad la capa límite el y^+ debe ser inferior a 1 (subrango viscoso) y se podrá utilizar un LES. Para valores superiores a 30 (subrango inercial) la capa límite se modela y deberá de usarse RANS. Para valores de entre 1 y 30 aproximadamente se encuentra la zona buffer donde no se puede calcular, ya que es una zona de comportamiento desconocido.

En el mallado de capa límite se puede jugar con 4 parámetros fundamentalmente:

- Número de capas
- Tamaño de elemento
- Espesor total de la capa límite
- Ratio de crecimiento entre capas

2.2.2.3. Modelos físicos básicos

Antes de comenzar con el cálculo, uno de los pasos a realizar es definir el modelo de física a utilizar, el cual variará según el problema que se esté tratando de resolver. El software de cálculo ofrece una gran variedad de modelos entre los que se encuentran: flujo compresible o incompresible, viscoso o no viscoso, turbulento o laminar, problema transitorio o estacionario, etc. Resolver todos estos modelos se reduce, básicamente, a la introducción de las ecuaciones básicas de conservación, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

- Ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad.
- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.
- Ecuación de conservación de la energía.

Además, si se considera flujo turbulento, es necesario tener en cuenta ecuaciones adicionales, que puede ir desde 1 hasta dos o más, para poder resolver o modelar dicha turbulencia. Estas ecuaciones adicionales a las de Navier-Stokes dependerán del modelo de turbulencia seleccionado, siendo el más óptimo dependiente del tipo de problema a resolver.

2.2.2.3.1. Ecuación de conservación de la masa

Mostrada en la ecuación (2.13) en forma integral, la ecuación de continuidad o conservación de masa establece que la masa absoluta entrante y saliente a un volumen de control, a través del cual existe un flujo de masas, es la misma.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho \cdot \chi \right) dV + \oint_a \rho \cdot \vec{V} \cdot da = \int_V S_m \cdot dV \quad (2.13)$$

Las integrales que se pueden apreciar en la ecuación son, por un lado, integrales de línea que se aplican a los bordes del dominio, y por otro integrales de volumen del dominio de estudio.

Cabe destacar que esta ecuación es válida tanto para casos de fluido compresible como incompresible. Además, en el caso en que existiesen reacciones químicas en el interior del dominio de cálculo se debe añadir el término fuente S_m tal y como aparece en el lado derecho de la ecuación. Este término fuente no es más que la masa añadida a una fase continua por el resto de fases del fluido multifase. Para el caso de estudio de este proyecto este término fuente no será considerado ya que no existe ningún tipo de reacción química en el interior del dominio que sea necesario considerar.

2.2.2.3.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Esta ecuación se define mediante la Segunda Ley de Newton o Principio Fundamental de la Dinámica aplicado a un volumen de control en el que existe un flujo másico entrante y otro saliente del mismo a través de sus fronteras. Esta ecuación dice que la resultante de todas las fuerzas actuantes sobre el volumen de control es igual a la variación de la cantidad de movimiento de la masa dentro de dicho volumen de control y del flujo a través de sus fronteras.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho \cdot \vec{V} \right) dV + \oint_a \rho \cdot \vec{V} \times \vec{V} \cdot da = - \oint_a p \cdot I \cdot da + \oint_a T \cdot da + \int_V f_b \cdot dV + \int_V f_p \cdot dV \quad (2.14)$$

El significado de algunos términos de la ecuación anterior es:

- $\oint_a p \cdot I \cdot da$: fuerzas de presión.
- $\oint_V f_b \cdot dV$: fuerzas que actúan sobre el cuerpo.
- $\oint_a T \cdot da$: fuerzas externas.
- $\int_V f_p \cdot dV$: resistencia porosa.

2.2.2.3.3. Ecuación de conservación de la energía

La ecuación (2.15) no es más que una representación del Primer Principio de la Termodinámica. Según este, la variación existente en la energía del fluido que se encuentra dentro del volumen de control y del flujo que atraviesa sus fronteras es igual a la diferencia entre la variación del calor añadido a dicho volumen de control y la variación del trabajo que se realiza en el mismo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} ((\chi \cdot (\rho \cdot E)_{fluid} + (1 - \chi) \cdot (\rho \cdot C_p)_{solid} \cdot T) \cdot dV) dV + \oint_a \rho \cdot H \cdot \vec{V} \cdot da = \\ = - \oint_a \dot{q}'' \cdot da + \oint_a T \cdot \vec{V} \cdot da + \int_V f_b \cdot \vec{V} \cdot \chi \cdot dV + \int_V S_m \cdot dV \end{aligned} \quad (2.15)$$

Donde:

- H: entalpía total.
- \dot{q}'' : flujo de calor.
- $\oint_a T \cdot da$: fuerzas externas.

Cabe destacar que entre las diferentes posibilidades en las que esta ecuación puede ser expresada se encuentran aquellas en términos de entalpía y entalpía total y energía total.

2.2.2.3.4. Modelos de turbulencia

La turbulencia no se define como la propiedad de un fluido sino más bien como un estado concreto de dicho fluido. Por tanto, un flujo en estado de turbulencia presenta unas ciertas características que lo hacen muy aleatorio, de hecho, este tipo de flujo se suele estudiar mediante métodos estocásticos.

La turbulencia viene caracterizada por:

- Irregularidad: todos los flujos turbulentos están muy alejados de la linealidad, siendo aleatorios y caóticos.
- Tridimensionalidad: esta es una característica básica de la turbulencia, no existe turbulencia bidimensional ni unidimensional aunque su flujo promedio si que lo sea. Esto es así porque las estructuras turbulentas, llamadas vórtices, son estructuras tridimensionales siempre.
- Rotacionalidad: es una característica proveniente de una vorticidad no nula, la cual es debida a los ya mencionados vórtices tridimensionales.
- Difusividad: la energía contenida en el flujo favorece la homogeneización del mismo.
- Disipación: debido a los esfuerzos tangenciales causados por la viscosidad existe una constante transformación de energía cinética en interna, por lo que es necesario un constante aporte de energía.
- Número de Reynolds alto, superior 20.000 en flujo libre por ejemplo.

La turbulencia se describe en diferentes escalas, de mayor a menor: escala integral, escala de Taylor y microescala de Kolmogorov. Como la Figura 2.7 muestra, en las grandes escalas es donde se genera la energía cinética turbulenta, la cual va disminuyendo a medida que los vórtices se van rompiendo y por tanto la escala se va haciendo cada vez más pequeña. En la más pequeña de todas estas escalas, llamada microescala de Kolmogorov, estos torbellinos se disipan. Por tanto, se puede decir que en la escala de Kolmogorov se produce una disipación de energía cinética turbulenta en calor, la cual es debida a la viscosidad del fluido.

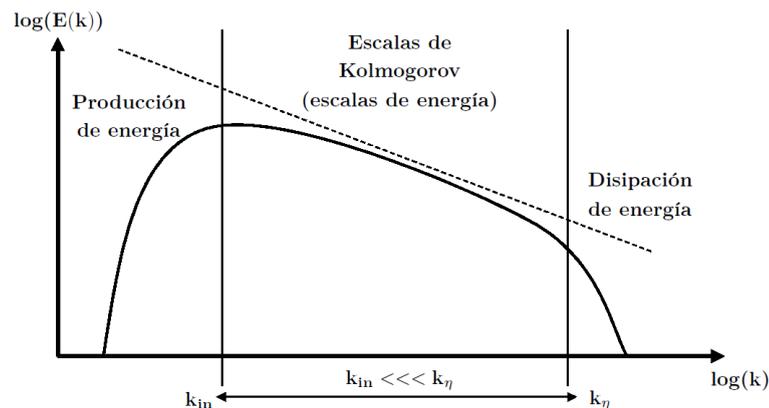


Figura 2.7: Producción de energía (E) en función de las escalas de la turbulencia, representadas por el número de onda (k).

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que no son más que las que dictan el comportamiento de un flujo en movimiento, se puede recurrir a diferentes técnicas. La más general de todas ellas es el conocido DNS (*Direct Numeric Simulation*) en la cual se resuelven todas las escalas de la turbulencia. Como consecuencia se necesita una malla lo suficientemente fina como para poder mallar estructuras del tamaño de la escala de Kolmogorov, incrementándose así muchísimo el coste computacional. Además, también se requiere una buena discretización temporal, lo que aumenta más aún el coste computacional resultante de la discretización espacial. Es importante mencionar que un cálculo con condiciones de turbulencia siempre será transitorio debido al carácter impredecible y caótico de la turbulencia [5].

Esto supone una gran inversión en recursos y en tiempo, lo que no siempre está disponible, por lo que DNS resulta inabarcable en la mayoría de los casos. De esto modo, en la práctica se recurre a otras técnicas que pese a perder un poco de precisión en los resultados reducen enormemente el coste computacional, como son: LES (*Large Eddy Simulation*) y RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*).

La metodología RANS es la más ampliamente utilizada en cálculos CFD. Es la que menor coste computacional supone pero también la que permite obtener los resultados más alejados de la realidad. Esta técnica no resuelve ninguna escala de la turbulencia, sino que la modela completamente, de ahí su falta de realismo. Se basa en el promediado de las ecuaciones de Navier-Stokes, quedando todas las variables separadas en una componente media y una pulsante.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.16)$$

Del promediado de estas ecuaciones aparece un nuevo término que no es posible resolver, el llamado *Tensor de Esfuerzos de Reynolds*. Para poder resolver faltan ecuaciones, por lo que es necesario considerar los diferentes modelos de turbulencia disponibles que aportando ecuaciones adicionales permiten alcanzar la resolución, es lo que se conoce como problema de cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes. Entre estos modelos de turbulencia se encuentran: $k - \epsilon$, $k - \omega$, $k - \omega SST$ o *Spalart-Almaras* entre otros.

Por último, existe un paso intermedio entre las dos metodologías explicadas anteriormente: LES. Supone un estado intermedio tanto en cuanto a coste computacional como a realismo de la solución entre DNS y RANS. Esta técnica no es más que un filtrado de las ecuaciones de Navier-Stokes, de modo que las escalas más pequeñas de la turbulencia se modelan y las más grandes se resuelven. Como ocurre en RANS, en esta metodología también son necesarias ecuaciones adicionales para poder resolver, pero en este caso esto es debido al filtrado de las ecuaciones, no al promediado como se hacía en RANS. Aquí también aparece el problema de cierre de las ecuaciones Navier-Stokes. Análogamente a RANS, para solucionar esto se aplican los modelos de turbulencia disponibles en este caso, que no son los mismos que en el caso anterior puesto que ahora se están modelando escalas mucho más pequeñas. Entre ellos se encuentran: Smagorinsky, Dynamic Smagorinsky y WALE. En este proyecto, puesto que se pretende resolver la capa límite, donde la turbulencia es dominante, se utilizará esta metodología de resolución.

2.2.2.4. Modelos numéricos

Además de los modelos físicos seleccionados, los modelos numéricos juegan un papel esencial en el cálculo CFD puesto que tanto la precisión como el coste computacional dependen de ellos.

2.2.2.4.1. Modelado del flujo

El llamado modelado de flujo en realidad no tiene nada que ver con características del fluido que se va a resolver sino que está relacionado con la forma en que se resuelven las ecuaciones mencionadas anteriormente en la sección de modelos físicos, es decir, conservación de masa, cantidad de movimiento y energía y turbulencia y transporte de especies (si es que se consideran estas últimas).

La inmensa mayoría de los software de CFD utilizan volúmenes finitos. Este método divide el dominio en un gran número de volúmenes de control a pequeña escala, lo cual se realiza con el mallado. De este modo, todas las anteriormente mencionadas ecuaciones se resuelven en dichos volúmenes de control, para lo que las ecuaciones han sido discretizadas y linealizadas y se resuelven iterativamente.

Como se va a explicar en detalle a continuación, se pueden seguir dos modelos de flujo para la resolución: flujo segregado y flujo acoplado.

Flujo segregado

En este modelo de flujo las ecuaciones de transporte se resuelven de un modo desacoplado, es decir, secuencialmente se van obteniendo los diferentes parámetros. Sin embargo, la presión y la velocidad si que se deben calcular acopladamente, y para ello dos metodologías se pueden seguir, que normalmente están implementadas en cualquiera que sea el software de CFD usado.

- SIMPLE: su utilidad gira en torno a análisis transitorios, es un método predictor-corrector llamado *Pressure Implicit Split Operator*.
- PISO: se utiliza fundamentalmente en cálculos estacionarios, es un método predictor-corrector llamado *Semi-implicit Methods Pressure Linked Equations*.

Dentro de las especificaciones del fluido que hacen óptimo a este modelo de flujo se encuentra la de flujo incompresible. Sin embargo, cabe decir que también puede ser utilizado en ciertos casos donde existe una ligera compresibilidad del fluido o el número de Rayleigh sea bajo (poca importancia de la convección natural del fluido).

Este tipo de modelo es un modelo difusivo, lo que hace que las ondas de choque no se puedan apreciar con buena definición. Se trata además de un modelo que no es muy robusto en comparación con el que se expondrá a continuación, pero por contra se puede obtener una solución razonablemente buena sin un gran aumento del coste computacional y por tanto de forma rápida.

A grandes rasgos, el esquema de resolución que sigue este modelo es el siguiente:

1. Se actualizan las propiedades.
2. Se resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.
3. Se resuelve la ecuación de la presión.
4. Los resultados obtenidos son actualizados y volcados a las celdas.
5. Se resuelve la ecuación de la turbulencia, de la energía y de las especies (si es que todas ellas son necesarias según el modelo de física definido).
6. Se comprueba si el cálculo ha convergido:
 - Si ha convergido: parar el proceso.
 - No ha convergido: volver al punto 1.

Flujo acoplado

A diferencia del modelo de flujo segregado, en este caso se resuelven acopladamente todas las ecuaciones, a modo de sistema de ecuaciones. Esto implica obviamente un incremento en el coste computacional del cálculo. Sin embargo, también se trata de un modelo más robusto, tanto para cálculos transitorios resueltos explícita como implícitamente.

En este modelo, mediante la ecuación de conservación del momento se calcula el campo de velocidades, la presión es obtenida de la ecuación de conservación de la masa y finalmente para la densidad se hace uso de la ecuación de estado. A grandes rasgos, el proceso seguido en este caso es:

1. Se actualizan las propiedades.
2. Se resuelven al mismo tiempo la ecuación de continuidad, especies y momento.
3. Se resuelve la ecuación de la turbulencia.
4. Se comprueba si el cálculo ha convergido:
 - Si ha convergido: parar el proceso.
 - No ha convergido: volver al punto 1.

Si se desead una gran precisión en flujos con importante compresibilidad este modelo será adecuado. También para cálculos bidimensionales puede ser adecuado, pues el coste computacional no se ve tan incrementado por el menor número de celdas. Sin embargo para cálculos tridimensionales si que puede suponer una excesiva dilatación en el tiempo de cálculo.

Además, cabe destacar que a diferencia del modelo anterior, en este caso las ondas de choque si que aparecen perfectamente definidas.

2.2.2.4.2. Modelado del tiempo

En la práctica, muchas veces es necesario llevar a cabo estudios estacionarios y transitorios indistintamente. Es más, existe fenómenos físicos que son únicamente transitorios o únicamente estacionarios, por lo que carece de sentido una solución obtenida inversamente. Por tanto, resulta de interés conocer el modelado numérico de flujos tanto estacionarios como transitorios.

Flujo estacionario

En los análisis estacionarios el tiempo deja de ser una variable del cálculo, no hay dependencia de ella. Por tanto, la simulación llevada a cabo se realiza para obtener un estado ‘solución’ convergido para un determinado instante de tiempo y bajo unas determinadas condiciones que se mantienen constantes (como pueden ser las condiciones de contorno o las propiedades del fluido).

Cabe decir que debido a su naturaleza atemporal, los resultados que se obtengan y que reflejen algún tipo de fenómeno no estacionario no serán bajo ningún caso fiables debido a que en dichos fenómenos ningún tipo de evolución temporal es mostrado.

Referente al coste computacional, para estudios estacionarios obviamente éste es inferior en términos generales. Es por esto que muchas veces, frente a un caso transitorio, se realiza previamente un rápido cálculo estacionario para utilizar esa solución convergida como condición inicial del análisis transitorio.

Flujo no estacionario

En este tipo de análisis el tiempo si que se introduce como una variable de cálculo, de modo que se obtienen soluciones convergidas para cada instante temporal. Esta resolución temporal es discreta, pues como se ha comentado se obtiene la solución para diferentes instantes de tiempo, normalmente equiespaciados por un paso temporal que el usuario puede fijar. Además, dentro del cálculo relativo a cada paso temporal el usuario también fija una serie de iteraciones intermedias que el solver lleva a cabo con el objetivo de obtener la solución convergida para dicho paso temporal. Como se puede observar, esto supone un incremento en el coste computacional del problema. Por otro lado, es interesante notar que la solución obtenida en un paso temporal es usada como condición inicial para la resolución del siguiente instante de tiempo.

Los análisis transitorios se pueden llevar a cabo de dos formas diferentes: mediante cálculo explícito o implícito.

- Cálculo explícito: este tipo de cálculo solo se puede realizar con flujo acoplado. Además, solamente se hace compatible con flujos no viscosos y laminares.
- cálculo implícito: es la alternativa al cálculo explícito en flujo acoplado. Sin embargo, este tipo de cálculo también se puede llevar a cabo en flujo segregado.

2.2.2.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno es algo de importancia capital en la configuración de un caso CFD. Estas condiciones imponen como debe comportarse el flujo en las fronteras

donde son aplicadas. De este modo, se puede obtener la solución única de las ecuaciones diferenciales de conservación.

Todas y cada una de las fronteras del dominio de calculo debe estar caracterizada con una condición de contorno. En las condiciones de contorno se fijan: la localización, la naturaleza y el valor (si es que lo requiere) de dicha condición de contorno. Seleccionar las condiciones de contorno más apropiadas para un problema concreto es una de las tareas más difíciles de la preparación del caso, ya que de no acertar en la selección se puede estar resolviendo un problema totalmente diferente al que inicialmente se deseaba.

A continuación se procede a explicar todos los tipos de condiciones de contorno disponibles en el cálculo CFD.

2.2.2.5.1. *Free stream*

Esta condición de contorno, también llamada en otros software como *Pressure Far Field*, define la velocidad y su dirección del flujo y el valor de temperatura estática lejos del cuerpo que se está analizando, es decir, en una zona que no esté siendo perturbada. Con el objetivo de que el flujo llegue al cuerpo lo suficientemente desarrollado y que los efectos aguas abajo causados por la estela sean mínimos, se definen unas distancias estándar que pueden ser consideradas como ‘suficientemente lejos’. Por ejemplo, para el caso de flujo externo, y suponiendo un caso de un perfil donde la longitud característica es la cuerda:

- Flujo subsónico: 5 cuerdas aguas arriba y de 5 a 20 cuerdas aguas abajo.
- Flujo supersónico: 5 cuerdas tanto aguas arriba como aguas abajo.

Ahondando un poco más en la matemática, esta condición de contorno no hace distinción entre lo que es flujo saliente o entrante a la celda. De este modo todas las variables termodinámicas son halladas a partir de las celdas contiguas o extrapolando de la condición de contorno.

2.2.2.5.2. *Mass flow inlet*

La situación en la que el gasto másico a la entrada del dominio sea conocido hace a este tipo de condición de contorno una de las más realistas y adecuadas para usar. Se establece dicho valor de gasto másico por unidad de área en la frontera de entrada al dominio. No existe distinción entre flujo supersónico o subsónico, se puede usar en ambos casos.

2.2.2.5.3. *Overset mesh*

Un mallado overset es aquel que se lleva a cabo mediante dos mallas que en una misma región se solapan. El interés de este mallado aparece por ejemplo cuando hay partes móviles en el dominio que se quiere estudiar. En este caso, para que no existan saltos de propiedades de una malla a otra en la zona de solapamiento, ya que esto no tendría sentido, se utiliza este tipo de condición de contorno. Para ello se realiza una interpolación entre los valores de dichas propiedades en ambas mallas.

2.2.2.5.4. *Pressure outlet*

Este tipo de condición de contorno, válida tanto en flujo compresible como incompresible, fija el valor de la presión. Si bien, cabe mencionar que pese a que el nombre de esta condición de contorno hace referencia a la salida del flujo del dominio, esta puede ser aplicada en cualquier frontera donde la presión sea conocida, no solo a la salida.

Es muy utilizada en la mayoría de los análisis CFD realizados puesto que la presión es una de los parámetros más fácilmente medibles experimentalmente.

2.2.2.5.5. *Stagnation inlet*

El usuario se encarga de definir en la frontera de entrada al dominio tanto los valores totales de temperatura y presión como la dirección con la que llega el flujo al dominio.

2.2.2.5.6. *Symmetry plane*

El objetivo principal de esta condición de contorno es reducir el coste computacional mediante la reducción del dominio de cálculo por la presencia de planos de simetría en el mismo. De este modo el dominio de cálculo es dividido en varios subdominios menores y simétricos y solamente uno de ellos es calculado. En esta condición de contorno no se define ningún valor de ninguna variable, solo se define en que plano de simetría va a ser aplicado, ya que no es necesario nada más.

2.2.2.5.7. *Velocity inlet*

Como el propio nombre indica, esta condición de contorno establece tanto el valor como la dirección de la velocidad a la entrada del dominio. Todas las propiedades totales quedan libres, por lo que serán calculadas para satisfacer la distribución de velocidad del flujo fijada a la entrada del dominio.

2.2.2.5.8. *Wall*

La condición de contorno de tipo pared se emplea para definir la superficie del cuerpo que se está estudiando. Para ello se define que la permeabilidad no está posibilitada, es decir, que no existe flujo entrante ni saliente del cuerpo, y por otro lado también se define que la velocidad sobre la superficie del cuerpo es nula, lo cual se denomina condición de no deslizamiento y es debida a la viscosidad del fluido (para casos simplificados donde se trabaja con fluidos no viscosos se puede activar una opción de esta condición de contorno que sí permite el deslizamiento sobre el cuerpo y por tanto la velocidad en su superficie no será cero). Aunque mucho menos utilizadas en la práctica, se puede jugar con gran variedad de otras propiedades de esta condición de contorno, como son la porosidad de la superficie o el intercambio de calor entre el fluido y la pared.

Los esfuerzos cortantes debidos a la viscosidad del fluido también pueden ser calculados, existiendo diversos tratamientos para su cálculo según sea el modelo de turbulencia seleccionado para el caso de flujos turbulentos, como es este caso.

Finalmente, cabe mencionar que, debido a la perturbación causada en el flujo por la presencia de un cuerpo en el seno del fluido, se pueden calcular las fuerzas y momentos asociados a dicha perturbación mediante esta condición de contorno.

2.2.2.6. Convergencia de la solución

Es importante tener nociones sobre convergencia ya que es lo que permite saber cuando un cálculo que está corriendo puede ser considerado como finalizado correctamente. Para ello existen los llamados criterios de convergencia. Es importante resaltar que cuando un criterio de convergencia es satisfecho no se puede garantizar la convergencia absoluta de la solución. Si bien, cuando varios de ellos conjuntamente se cumplen se puede asumir que es altamente probable que se haya alcanzado convergencia y por tanto se puede detener el cálculo.

A continuación se exponen algunos de los criterios de convergencia más utilizados en la práctica.

2.2.2.6.1. Monitorización de los residuales

Los residuales son unos parámetros calculados internamente por el software de cálculo que indican el grado de oscilación de las ecuaciones que están siendo resueltas. Se definen de un modo arbitrario unos valores para los residuales por debajo de los cuales el cálculo podría estar convergido:

- Ecuación de continuidad: Residual $< 10^{-3}$
- Resto de ecuaciones: Residual $< 10^{-6}$

Sin embargo, este criterio no es un criterio muy contundente. De hecho, puede darse el caso en el que los residuales hayan alcanzado los valores establecidos arriba pero la solución convergida no se haya alcanzado aún, y viceversa, puede haberse alcanzado dicha solución pero los residuales no cumplir con lo expuesto anteriormente. Este último caso ocurre más a menudo en cálculos transitorios.

2.2.2.6.2. Monitorización de variables

Todos los software CFD permiten monitorizar, además de los residuales, cualquier otra variable de interés. Esto permite ver como evoluciona con las iteraciones dicha variable.

Según la ecuación de continuidad, la masa entrante y saliente del volumen de control es la misma, por lo que un monitor importante para analizar la convergencia es aquel que permite realizar un balance entre flujo entrante y saliente. Para no rechazar la posibilidad de convergencia del cálculo un criterio a considerar es que la variación de dicho parámetro monitorizado no sea superior al 0.1 %, en caso contrario la convergencia no puede haber sido alcanzada.

2.2.2.6.3. Flujo sin fenómenos espurios

Finalmente, además de los criterios comentados anteriormente, también es importante vigilar que la solución no presente características antinaturales, como puede hacerse mediante la visualización del campo de velocidades en el dominio, por ejemplo. Esto no es nada que garantice la convergencia, pero si que puede ayudar a garantizar la no convergencia, como el resto de criterios explicados.

A fin de cuentas, nada va a garantizar la convergencia al 100 %, aunque cuando muchos de estos criterios se cumplen conjuntamente es razonable pensar que puede haberse conseguido.

Capítulo 3

Metodología y herramientas

Índice

3.1. Cálculo fluido-dinámico	37
3.1.1. Independencia de malla	37
3.1.2. Independencia de dominio	40
3.1.3. Estimación del paso temporal para LES	42
3.1.4. Influencia del número de Reynolds	43
3.2. Cálculo estructural	47
3.2.1. Simplificación del dominio	47
3.2.2. Independencia de malla	48

La Figura 3.1 muestra la metodología que se ha seguido en el desarrollo del presente proyecto. Como se puede observar, el primero de los pasos consiste en realizar un análisis por separado para la parte del dominio fluido y para la parte del sólido. Esto es así ya que se está siguiendo un enfoque segregado del estudio del acoplamiento en FSI. Este tipo de enfoque es el más utilizado en la práctica, por la ventaja que supone trabajar con software comerciales ya desarrollados. El estudio del fluido se lleva a cabo mediante el programa de simulación de fluidos StarCCM+ (versión 13.04.11) mientras que para el sólido se utiliza Ansys Workbench (versión 19.2).

En ambos software de simulación, tanto volúmenes finitos para el caso de StarCCM+ como elementos finitos para Ansys Workbench, el dominio de cálculo es discretizado utilizando una malla. Como se comento en el capítulo anterior, la importancia de la malla es capital a la hora de obtener resultados realistas y precisos, por lo que en ambos estudios se realiza un análisis de independencia de malla. Además, para el caso del estudio del campo fluido es preciso también realizar un estudio de independencia de dominio, ya que en este tipo de problemas la cercanía de las paredes del dominio por el que circula el flujo puede introducir perturbaciones en dicho flujo que no tienen nada que ver con la realidad. Finalmente, también para el caso del estudio del campo fluido, se realiza una evaluación de la influencia del número de Reynolds en el presente problema. El interés de este último estudio reside en la posibilidad de poder cambiar de condiciones de flujo, cambios de flujo e incluso de dimensiones sin tener que volver a recalcular el dominio, todo ello si se puede concluir que para este problema en concreto el número de Reynolds es invariante o varía muy poco.

Tras haber realizado el análisis del campo fluido, de este se obtiene un campo de presiones al que está sometido la placa del problema. Este campo de presiones será el causante de la deformación de la placa. Por tanto, es preciso exportar dichas presiones desde StarCCM+ e importarlas en Ansys Workbench para el cálculo estructural. Sin embargo, es importante comentar que al tratarse de un estudio transitorio, donde el campo de presiones que se exporta varía con el tiempo, antes de importar dichos valores de presión es necesario aplicarle la Transformada de Fourier o FFT para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esto se realiza porque para el cálculo estructural, donde se pretende observar los modos de vibración que son excitados por dichas presiones, el dominio de la frecuencia es más óptimo. Además, para saber que modos son excitados, previamente se han obtenido las frecuencias naturales de la placa mediante un análisis modal de la misma usando Ansys Workbench, como muestra la Figura 3.1 en su parte superior derecha.

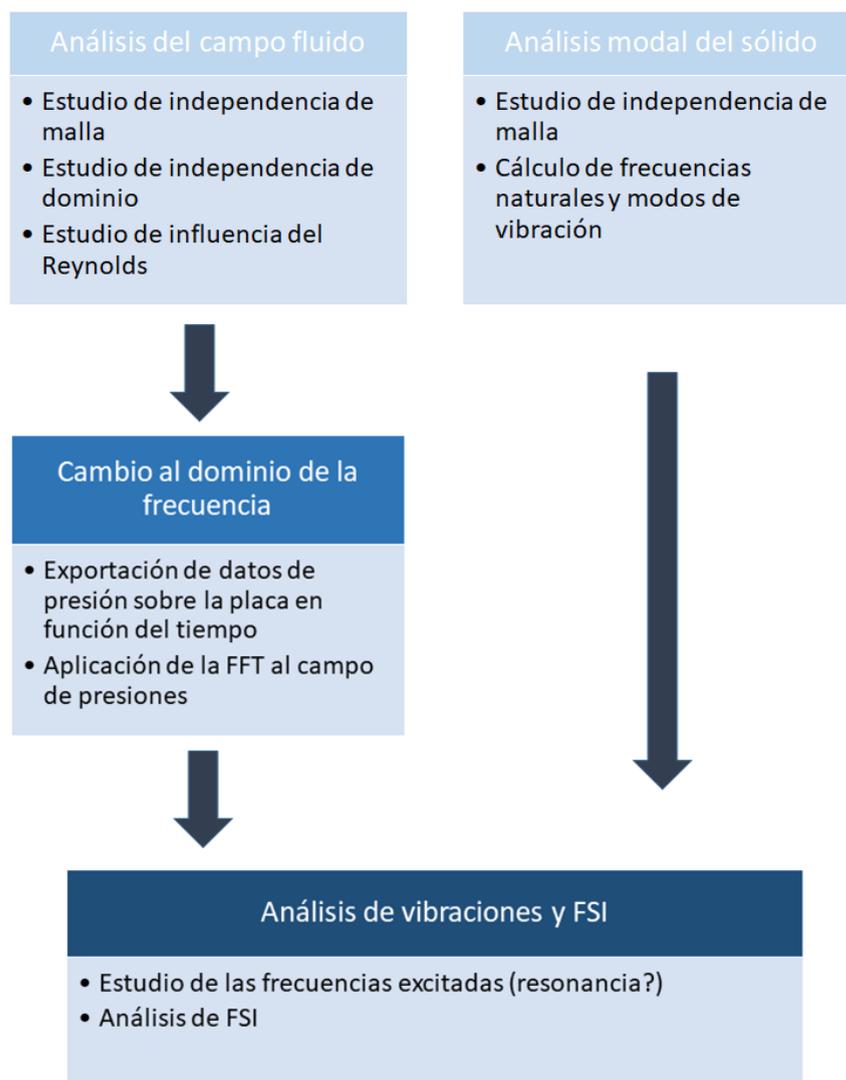


Figura 3.1: Esquema de la metodología seguida en este proyecto.

Finalmente, una vez se dispone de los campos de presiones en función de la frecuencia procedentes del análisis del campo fluido y de las frecuencias naturales procedentes del

análisis modal de la placa, estudios que se han realizado por separado, es posible realizar un estudio vibratorio de la placa y se puede determinar el nivel de acoplamiento fluido-estructura existente en este problema. En base a dicho nivel de acoplamiento se discute la metodología de resolución de la Interacción Fluido-Estructura más óptima que debería considerarse, que puede ser *One Way* ó bien *Two Ways*, atendiendo a criterios como coste computacional ó grado de precisión entre otros.

Para el estudio vibratorio de la placa se introducen los campos de presiones en Ansys Workbench, se obtiene la respuesta armónica del conjunto y se observan los modos y frecuencias excitadas. Según dichas frecuencias y su proximidad a las frecuencias naturales se puede determinar el nivel de vibración de la placa, alcanzándose la resonancia en el punto exacto donde la frecuencia excitada coincide con una de las frecuencias naturales de la estructura.

3.1. Cálculo fluido-dinámico

3.1.1. Independencia de malla

Para comenzar con la independencia de malla, lo primero que se decide es una dimensión del dominio fluido tanto aguas arriba como aguas abajo. Se toma un valor que a priori se piensa que es razonablemente bueno, ya que el estudio de independencia de dominio se realizará posteriormente con la malla obtenida del presente análisis. De este modo, se selecciona $5 \cdot L_{ref}$ y $20 \cdot L_{ref}$ para aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Obviamente, la dimensión aguas abajo es mucho mayor por la presencia de la estela.

A continuación, se debe seleccionar un criterio para evaluar la independencia de la malla. Tras cálculos preliminares y análisis de resultados se aprecia que el esfuerzo cortante sobre la pared de la placa presenta un cambio de signo. Este cambio de signo no es más que un cambio en la dirección del flujo, o lo que es lo mismo, una vórtice, lo cual se puede contrastar en la Figura 3.2. Por tanto, se decide utilizar como criterio la longitud de esta primera burbuja de recirculación y para obtener dicha longitud se trabaja con el punto en que el esfuerzo cortante en la pared cambia de signo.

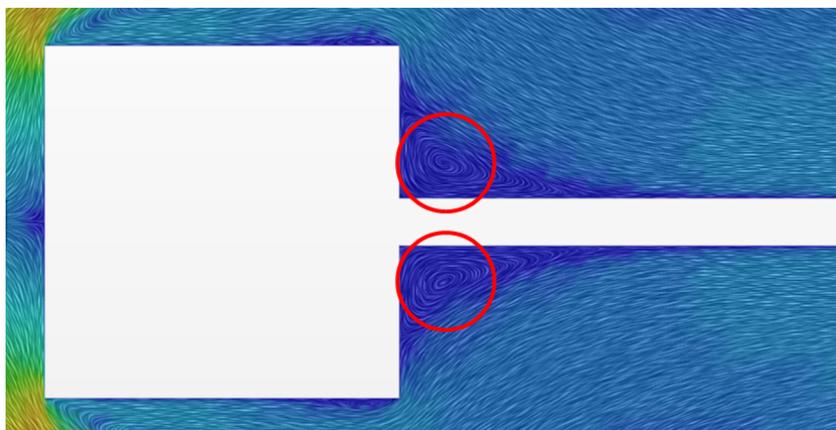


Figura 3.2: Localización de la primera burbuja de recirculación.

Por otro lado, puesto que el objetivo es llevar a cabo un cálculo LES, donde algunas

escalas de la turbulencia (las más grandes) deben ser calculadas, se realiza también un mallado de capa límite. Los parámetros del mallado de capa límite son siempre constantes, no variando al cambiar el tamaño de malla para el estudio, y se presentan a continuación:

- Espesor de capa límite: 0.18 mm
- Número de capas en el espesor: 8
- Factor de crecimiento: 1.5

Además, con el objetivo de ahorrar coste computacional, se realiza un refinamiento de la malla adaptado a cada zona, pues algunas de estas zonas no requerirán una malla muy fina. De este modo, se crea una zona para el campo cercano y otra para la estela, que se pueden diferenciar en color amarillo y rojo respectivamente en la Figura 3.3. Cabe destacar que para definir estas regiones se ha realizado un cálculo previo rápido para tener una idea de donde se localiza la estela y el campo cercano y posteriormente se ha ajustado mejor en diferentes etapas del estudio de independencia de malla.

Entre las regiones de refinamiento de campo cercano y estela y la región del campo lejano, donde no se requiere una malla demasiado fina, existe hasta un total de 7 niveles de refinamiento, sin contar con el de la capa límite, que hacen que la transición entre los tamaños de malla sea más suave. Además, estos niveles de refinamiento se fijan de forma relativa a un tamaño base de malla y es este tamaño base de malla el que se varía en el presente estudio de independencia. Con esto se consigue que la configuración de la malla sea siempre la misma e igual a la mostrada en la Figura 3.3.

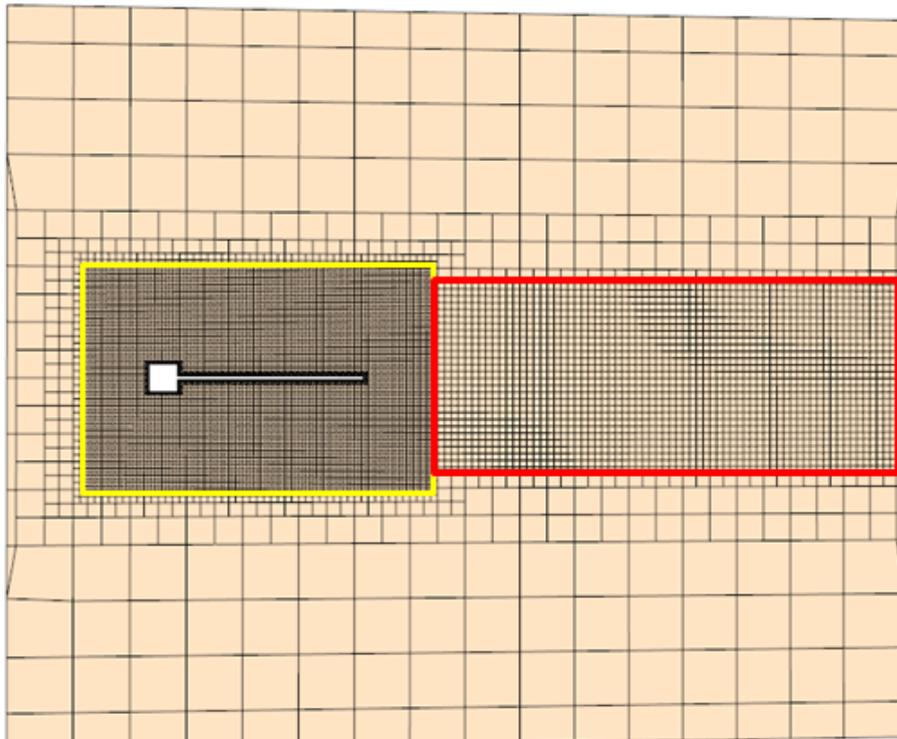


Figura 3.3: Malla final del dominio fluido resultante del estudio de independencia de malla.

Tras poner en práctica todo lo mencionado anteriormente se hace un barrido a razón de $\sqrt{2}$ del parámetro base de tamaño de llama, llamado *Base Size* en StarCCM+, ya que como se ha comentado anteriormente todos los niveles de refinamiento están expresados de forma relativa a este, excepto el mallado de capa límite que utiliza los valores absolutos anteriores. Para estas simulaciones se utiliza RANS por el menor coste computacional que supone.

Se obtiene por tanto la gráfica de la Figura 3.4. Dicha gráfica corrobora la existencia de una convergencia de malla, pues llega un momento en que por mucho que se aumente el el tamaño base la longitud de la primera burbuja de recirculación a penas cambia. Tanto los puntos en rojo como en negro de dicha gráfica podrían tomarse como válidos. Para un cálculo RANS no cabría duda y se utilizaría el punto en rojo, pero para uno en LES quizá tendría más sentido invertir un poco más de recursos y optar por la malla correspondiente al punto en color negro. Sin embargo, la mejora proporcionada es muy baja y prácticamente duplica el número de celdas, además de que se ha observado en la comunidad científica que problemas de simulaciones LES con geometrías y tamaños similares [1] pueden ser resueltas satisfactoriamente con un número de celdas del orden de 4 millones e incluso menos, se opta finalmente por el punto en color rojo. Dicho punto se corresponde con un número de celdas de 4.2 millones aproximadamente y un tamaño base de 30 mm.

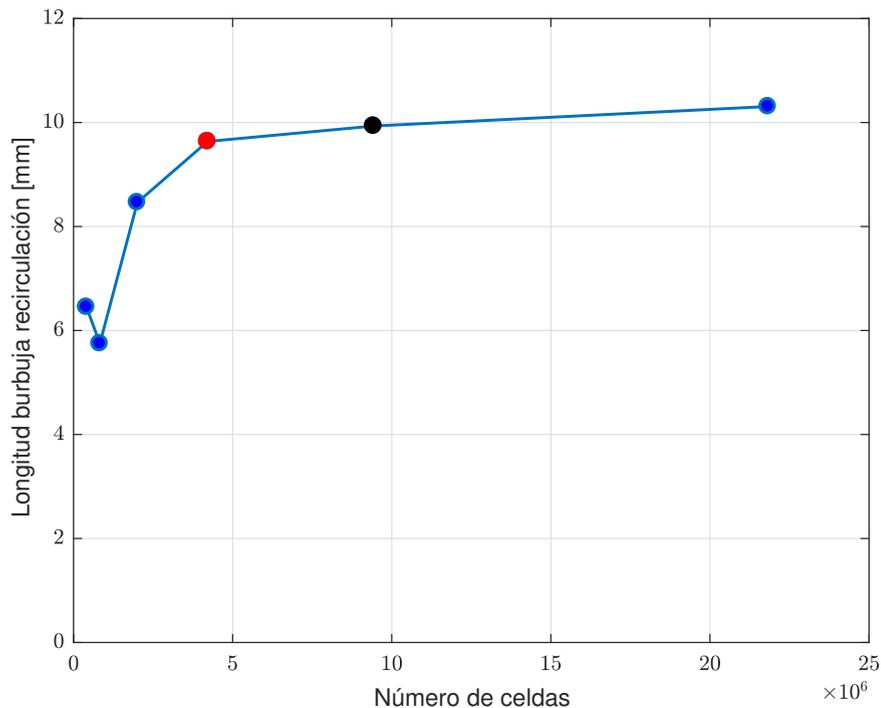


Figura 3.4: Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente al número de celdas.

Una vez obtenida la malla que se va a usar en el cálculo CFD es interesante mostrar dos parámetros de calidad de la misma, los cuales vienen mostrados en la Figura 3.5. En dicha figura se muestra, por un lado, la relación de aspecto de las celdas que están en contacto directo con las paredes de la placa y de la barra del dominio, y como se puede ver no existe ninguna celda con una relación de aspecto inferior a 0.01, que es el límite

inferior permisible para cálculos LES. Para cálculos RANS el límite inferior permisible es de 0.001 por lo que esta malla también es apta para este tipo de cálculos. Cabe mencionar que en la Figura 3.5a solamente se han considerado las celdas en contacto con las paredes de la barra y la placa porque son las más deformadas por la adaptación de la malla para calcular la capa límite, por lo que es donde se alcanzarán los menores valores de relación de aspecto, y si estos cumplen todas las celdas de la malla cumplen.

Por otro lado, la Figura 3.5b muestra los valores del coeficiente Y^+ para las celdas que están en contacto también con la barra y la placa. Este parámetro es interesante para el presente estudio en cuanto a que debe ser siempre inferior a 1 para poder garantizar que la capa límite está siendo resuelta, que es lo que justamente muestra dicha figura. Solamente se considera el de las celdas en contacto con la barra y la placa porque es donde está la capa límite.

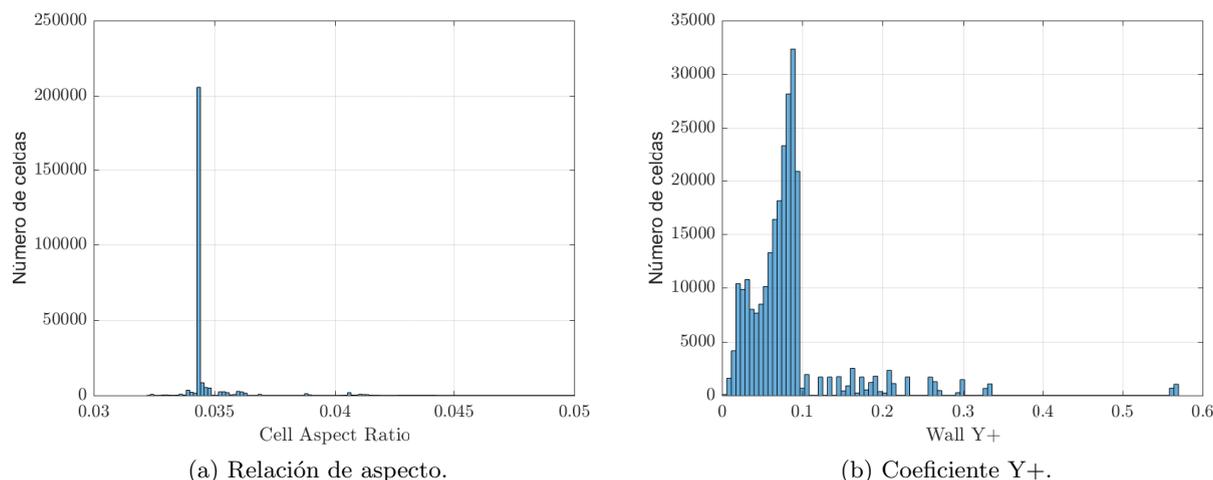


Figura 3.5: Histograma representativo de la relación de aspecto (AR) y del coeficiente Y^+ de las celdas en contacto con las paredes de la barra y de la placa.

3.1.2. Independencia de dominio

Tras el estudio de independencia de malla se ha obtenido ya el tamaño de elemento a utilizar en cada una de las zonas del dominio, de forma que se optimice el coste computacional y la precisión de una forma conjunta. A continuación, para el tamaño de malla obtenido se procede a realizar el estudio de independencia de dominio, con el fin de evitar que la cercanía de las paredes de dicho dominio afecten a la solución. Se analizan las dimensiones aguas arriba (upstream) y aguas abajo (downstream) del conjunto barra+placa, ya que la anchura y altura del dominio (40 cm en ambos casos) están fijas por el tamaño del túnel de viento.

En primer lugar se obtiene la longitud óptima de aguas arriba, para una longitud de aguas abajo razonablemente buena ($20 \cdot L_{ref}$). Tras esto se obtiene la longitud óptima de aguas abajo con la óptima de aguas arriba que se acaba de calcular. Además, se utiliza el mismo criterio que en independencia de malla: longitud de la primera burbuja de recirculación.

En la Figura 3.6 se muestra como varía la longitud de la primera burbuja de recir-

culación a medida que va cambiando la longitud del dominio aguas arriba del conjunto barra+placa, se expresa de forma relativa a la longitud de referencia (L_{ref}) tomada en este problema, que recordar que es el lado de la sección cuadrada de la barra. Puede apreciarse una tendencia hacia la obtención de la dimensión mínima de dominio aguas arriba que no inflencie la solución. Como aparece marcado en rojo en la figura en cuestión, se ha tomado finalmente como distancia aguas arriba $10 \cdot L_{ref}$, pues a partir de ahí se obtiene prácticamente la misma longitud de la burbuja y el coste computacional se vería incrementado por el aumento de celdas del mallado a consecuencia del incremento en el volumen del dominio.

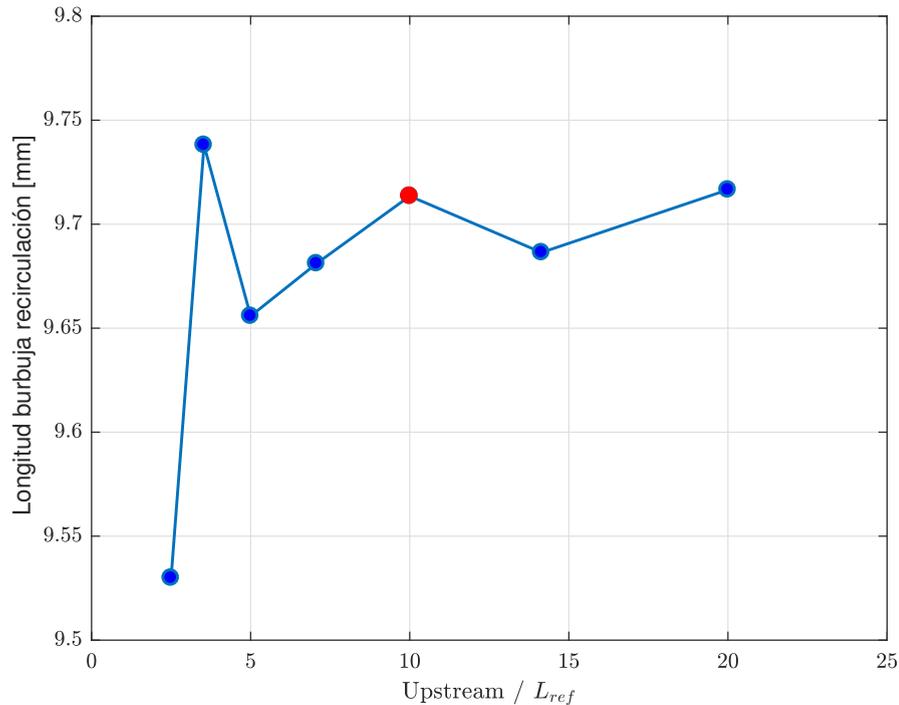


Figura 3.6: Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente a la longitud del dominio aguas arriba.

Como se ha comentado antes, una vez obtenida la dimensión óptima de aguas arriba, utilizando ese valor, se procede a realizar un barrido de dimensiones aguas abajo siguiendo una relación de $\sqrt{2}$, al igual que para aguas arriba. La Figura 3.7 muestra una tendencia que como en el caso anterior pretende mostrar la convergencia al valor óptimo. También marcado en rojo en esta figura, se toma como valor óptimo $40 \cdot L_{ref}$. Si bien, se puede apreciar que para $20 \cdot L_{ref}$ que es lo que se había usado anteriormente se obtiene prácticamente lo mismo, sin embargo parece apreciarse aún un pequeño decremento en la longitud de la burbuja por lo que se opta por $40 \cdot L_{ref}$, además de que así se obtendrá un mejor conocimiento de la estela.

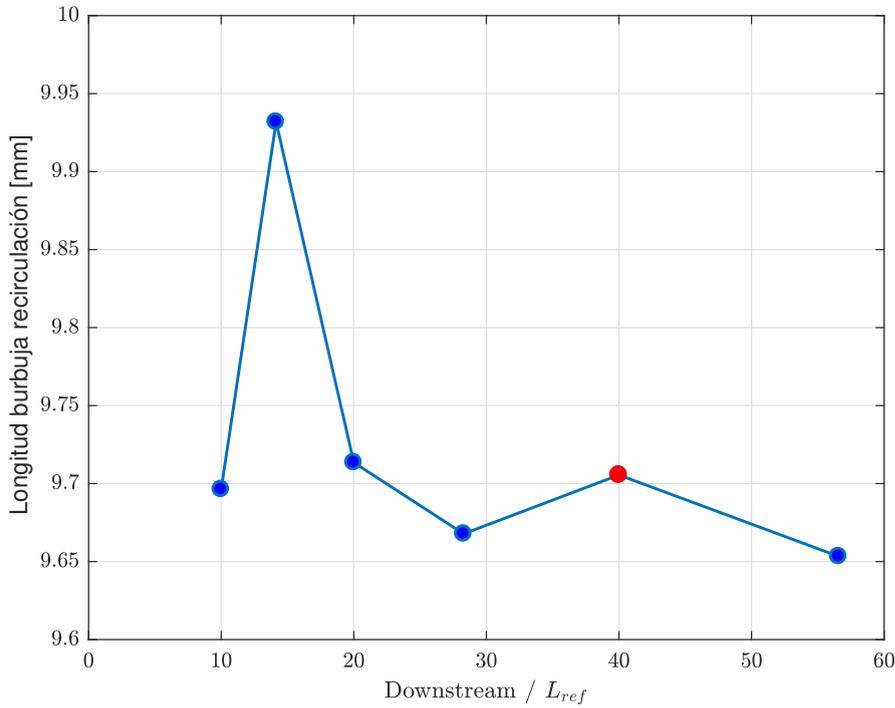


Figura 3.7: Tamaño de la primera burbuja de recirculación frente a la longitud del dominio aguas abajo.

3.1.3. Estimación del paso temporal para LES

Como no puede ser de otra manera, un cálculo LES es siempre de naturaleza transitoria. Esto se debe a que una parte de la turbulencia se está resolviendo numéricamente, en concreto las escalas mas grandes, y como es bien sabido la turbulencia no se puede estudiar estacionariamente.

Para los estudios transitorios es necesario definir un paso temporal. Dicho parámetro es de gran importancia en términos de convergencia a la solución, ya que de ser muy grande, pese a implicar un coste computacional más bajo, el cálculo sería muy susceptible de diverger. Aquí entra el juego el número de Courant, definido en la ecuación (3.1).

$$CFL = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3.1)$$

El número de Courant, más rigurosamente conocido como Courant-Friedrichs-Levy, de ahí sus siglas en inglés CFL , relaciona el paso temporal máximo permitido según la discretización espacial empleada, un paso temporal superior producirá resultados incorrectos en la solución.

Esto es muy restrictivo para esquemas explícitos, donde el CFL debe ser inferior a 1. Para esquemas implícitos, como el que se usa en el presente estudio, no existe restricción alguna, siempre habrá convergencia, pero puede darse el caso que pese a que el cálculo haya convergido la solución obtenida no sea la correcta, puesto que la discretización temporal

utilizada no presente resolución suficiente para capturar ciertos fenómenos que ocurren en el flujo. Por tanto, para evitar esto, se define también aquí un número de Courant máximo permisible de 1.

Para encontrar el paso temporal óptimo que garantiza dicho CFD para la discretización espacial obtenida previamente se hacen varios cálculos transitorios RANS, por su menor coste computacional, donde se varía el paso temporal y se vigila que el CFL máximo esté por debajo de 1. Esto se consigue, tal y como muestra la Figura 3.8, para un paso temporal de $\Delta t = 10 \mu s$.

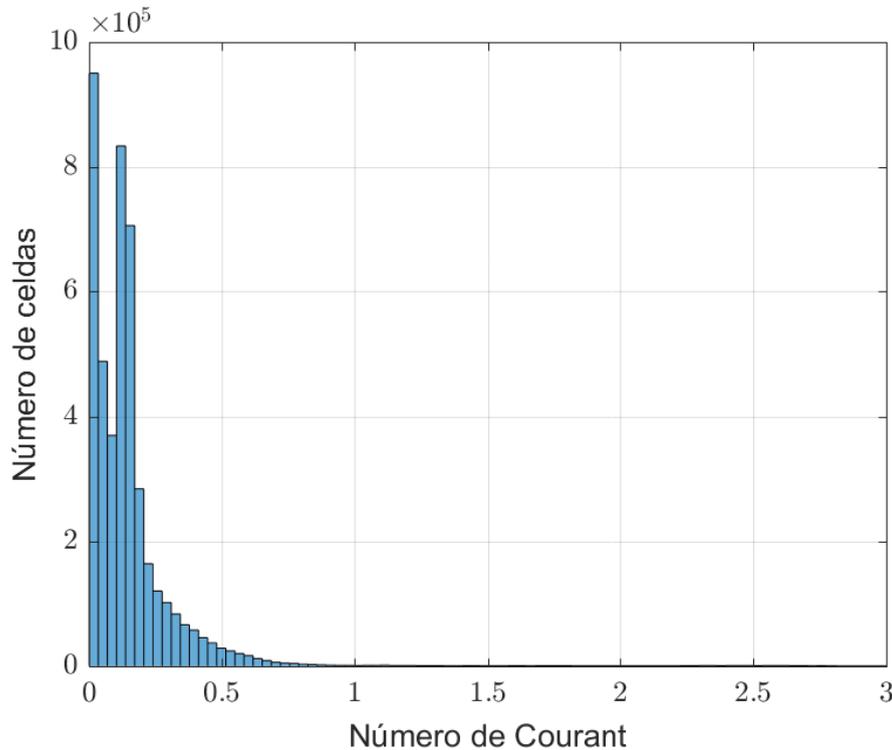


Figura 3.8: Histograma representativo del número de Courant en las distintas celdas del dominio.

3.1.4. Influencia del número de Reynolds

Una vez conocida la malla y el dominio a utilizar y también el paso temporal para el transitorio en LES, se pretende analizar la influencia que tiene el número de Reynolds en el presente problema. El objetivo de esto reside en que de conseguir un resultado favorable y poder despreciar dicha influencia se ahorraría mucho tiempo y recursos en el análisis de problemas de este tipo. Esto es debido a que el cálculo fluido-dinámico se realizaría una única vez y serviría para posteriores modificaciones en el escalado de la geometría, en la velocidad del fluido e incluso se podría cambiar de fluido.

Para abordar este reto se han lanzado dos cálculos CFD, idénticos ambos salvo que uno con la geometría completa y otro con dicha geometría escalada entre dos, lo que permite reducir el número de Reynolds a la mitad. En estos cálculos se han guardado datos tanto de coeficiente de Drag (C_d) como de Lift (C_l) durante un tiempo aproximadamente de

0.14 segundos.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se puede observar, para el caso de la geometría real, la evolución temporal del C_l y C_d con sus respectivos valores medios y desviaciones típicas y el contenido en frecuencia. Para el caso del Reynolds reducido a la mitad, o lo que es lo mismo, la geometría escalada a la mitad, los respectivos resultados aparecen en las Figuras 3.11 y 3.12. Sin embargo, para comparar estos resultados de un modo más sencillo se han organizado los resultados en las Tablas 3.1 y 3.2 que aparecen a continuación.

	$\overline{C_l}$	$\sigma(C_l)$	Strouhal	f (Hz)
$Re = 22596$	-0.0028	0.6058	0.1240	181.8
$\frac{Re}{2} = 11298$	0.008	0.5383	0.1240	363.7
% Variación	385.71 %	11.14 %	0.00 %	100.01 %

Tabla 3.1: Influencia del número de Reynolds en el coeficiente de Lift (C_l).

	$\overline{C_d}$	$\sigma(C_d)$	Strouhal	f (Hz)
$Re = 22596$	1.8526	0.0412	0.2529	370.9
$\frac{Re}{2} = 11298$	1.8416	0.0415	0.2480	727.4
% Variación	0.59 %	0.73 %	1.94 %	96.09 %

Tabla 3.2: Influencia del número de Reynolds en el coeficiente de Drag (C_d).

Referente a los valores medios y desviación típica, aunque para el caso del C_d la variación sea inferior a un 1 % para el C_l los valores obtenidos son mayores. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque exista una variación de 385 % en el caso del $\overline{C_l}$ esto es debido a que se trata de un valor muy bajo, que se puede considerar prácticamente 0, por lo que una pequeña variación ya implica un porcentaje de cambio muy elevado. Puesto que se está trabajando con una placa plana tiene sentido que la sustentación media sea nula.

Es importante notar también que el número de Strouhal se mantiene prácticamente constante, tal y como muestran las tablas, ya que aunque la dimensión se reduzca a la mitad la frecuencia predominante se duplica. El hecho de que se duplique esta frecuencia implica que al hacerse el cuerpo más pequeños los fenómenos que tienen lugar ocurren el doble de rápido aunque su amplitud sea la misma, tal y como explica el hecho de que los valores medios se mantengan. Estas frecuencias predominantes aparecen marcadas en las Figuras 3.10 y 3.12 con líneas rojas discontinuas tanto para el caso del C_l como para el caso del C_d . Además, sea cual sea el número de Reynolds, la frecuencia del coeficiente de Drag siempre es el doble que la del coeficiente de Lift, lo cual debe ocurrir por ser propio de aquellos problemas en los que aparece el fenómeno del *Vortex Shedding*.

Por tanto, se puede concluir que la influencia que presenta el número de Reynolds en este problema es muy baja, y teniendo en cuenta además las inmensas ventajas que puede suponer despreciarlo, como anteriormente se ha mencionado, es una hipótesis muy razonable y rentable el despreciarlo.

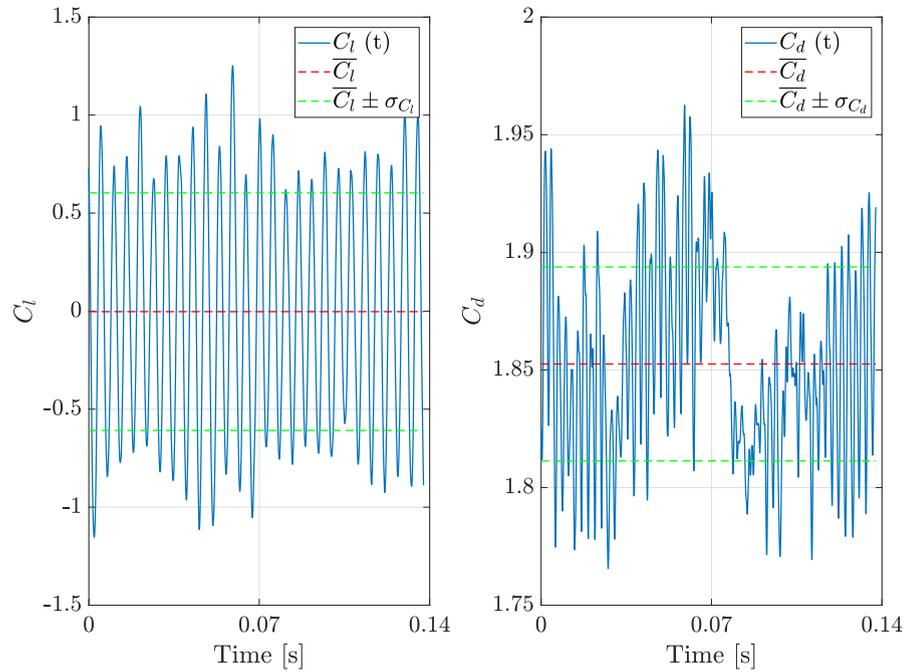


Figura 3.9: Evolución temporal del C_l y del C_d para el Reynolds del problema real ($Re = 22596$).

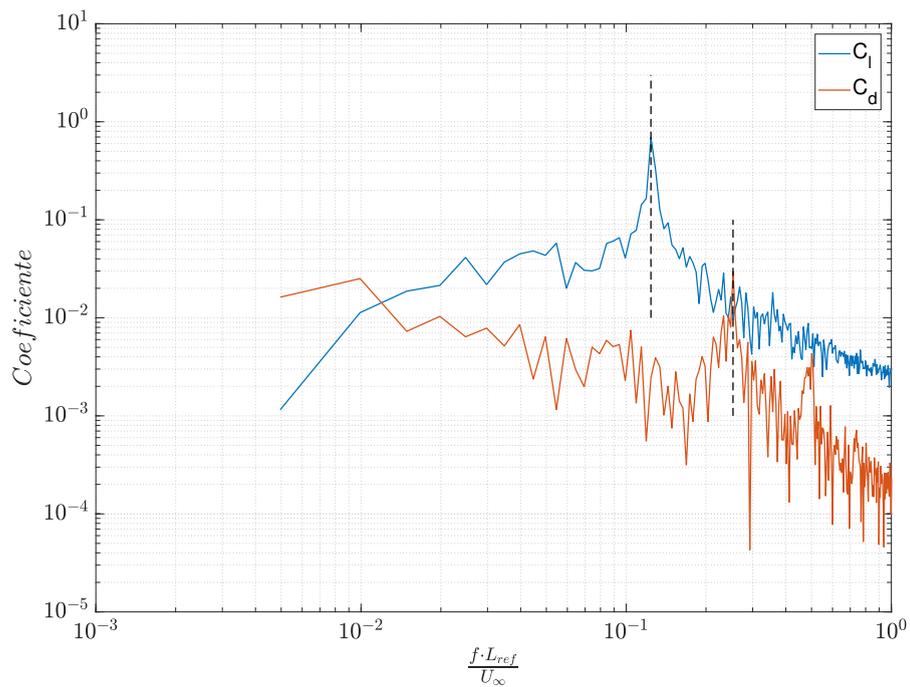


Figura 3.10: Contenido en frecuencia del C_l y del C_d para el Reynolds del problema real ($Re = 22596$).

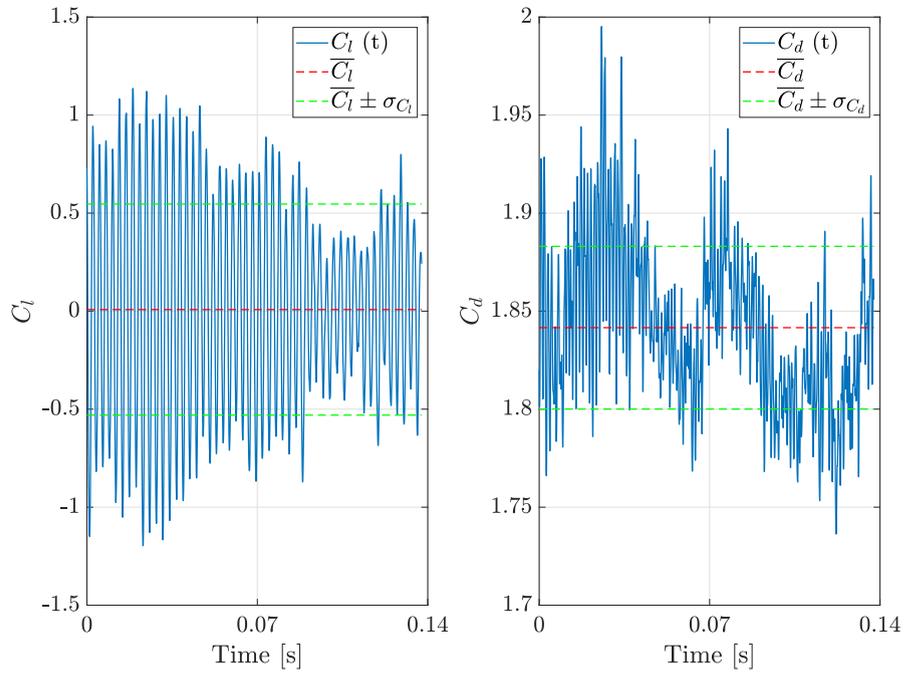


Figura 3.11: Evolución temporal del C_l y del C_d para el Reynolds del problema escalado ($\frac{Re}{2} = 11298$).

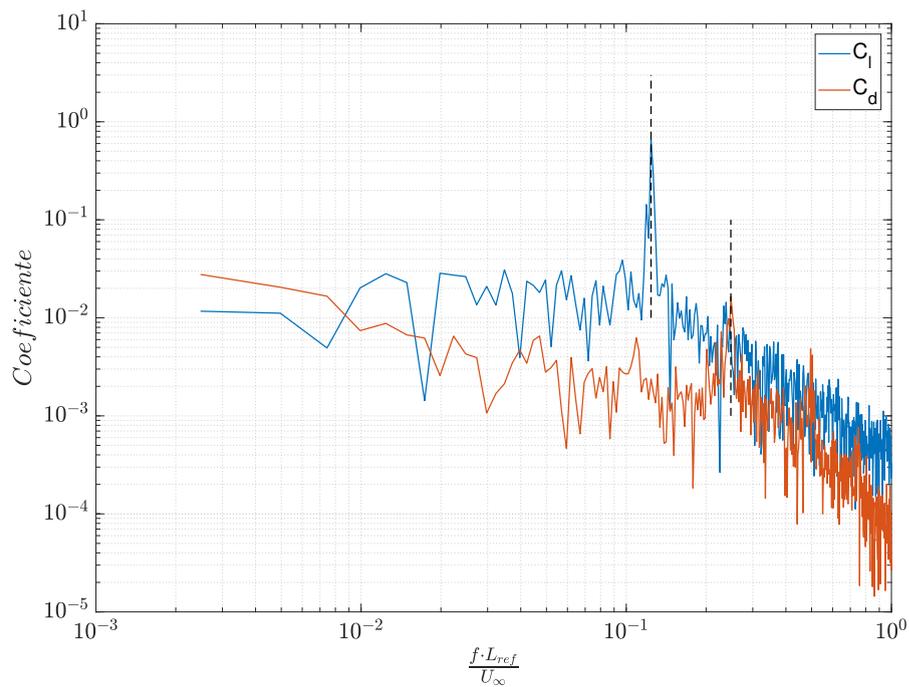


Figura 3.12: Contenido en frecuencia del C_l y del C_d para el Reynolds del problema escalado ($\frac{Re}{2} = 11298$).

3.2. Cálculo estructural

3.2.1. Simplificación del dominio

En un primer momento del cálculo estructural sería preciso considerar toda la estructura formada por la barra y la placa. Sin embargo, con el objetivo de simplificar este cálculo de elementos finitos, existen, a priori, dos motivaciones en pro de despreciar la influencia de la barra y considerar solo la placa, ya que la deformación de dicha placa será bastante superior a la de la barra. Estas motivaciones son:

- En primer lugar, el espesor de la placa es muy inferior al de la barra. Mientras que la placa cuenta con un espesor de tan solo 2 mm la barra tiene una dimensión en dicha dirección de 15 mm, por lo que el ratio es 7.5, casi un orden de magnitud.
- Por otro lado, y lo que es muy importante, se debe considerar la disposición de las condiciones de contorno. De este modo, mientras que la barra se encuentra biempotrada por sus dos extremos la placa se encuentra en voladizo.

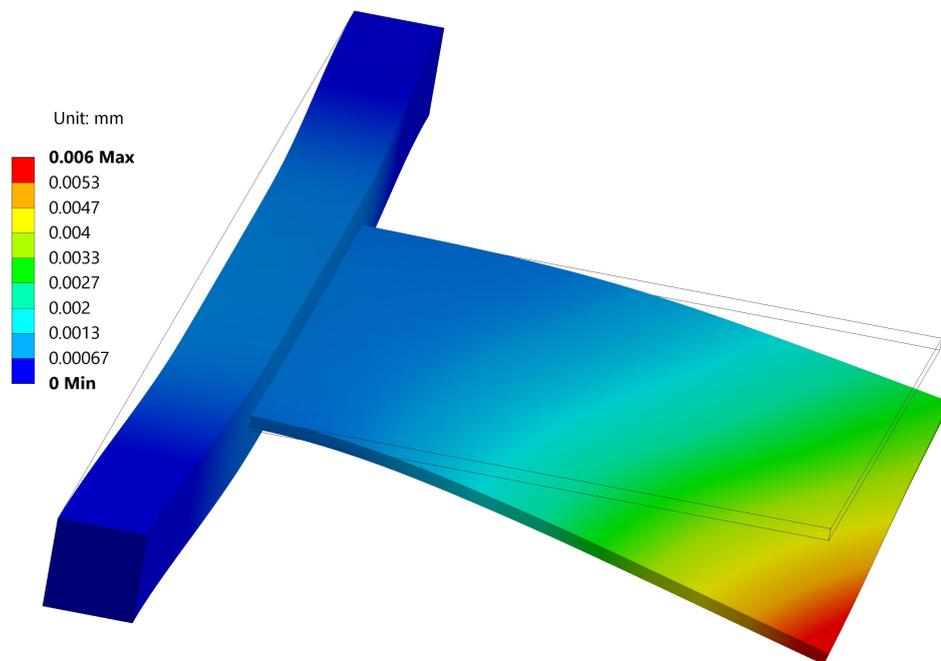


Figura 3.13: Deformación tanto en la barra como en la placa obtenida con Ansys para un calculo estructural estático, habiendo importado una distribución de presiones obtenida mediante el cálculo CFD previo.

Para probar esta simplificación con un mayor rigor científico se ha realizado una simulación estructural bajo carga estática considerando ambos sólidos. La carga aplicada es la respectiva a un instante temporal aleatorio del cálculo CFD llevado a cabo previamente, teniendo en cuenta que la convergencia ya ha sido alcanzada. Por tanto, importando la

distribución de presión de dicho instante temporal y aplicando las condiciones de contorno de biempotramiento en la barra se puede calcular con Ansys la deformación total de ambos sólidos.

En la Figura 3.13 se muestra la deformación obtenida, donde puede probarse que dicha deformación es bastante mayor para la placa. Pero no solo eso, sino que la deformación en la barra ocurre en una dirección ortogonal a la respectiva en la placa. Esto favorece la aplicación de la simplificación del dominio que aquí se discute ya que el interés del presente estudio es analizar la vibración en la dirección perpendicular al movimiento del flujo libre y en base a lo obtenido la deformación de la barra no influirá en la de la placa. Para acabar, también es importante mencionar que dichas deformaciones son de naturaleza diferente. Por un lado la deformación de la barra será permanente debida a la presión de remanso ahí existente mientras que por otro, en la placa tendrá lugar un fenómeno vibratorio causado por el llamado *Vortex shedding*.

3.2.2. Independencia de malla

A continuación se procede a exponer el procedimiento seguido en la independencia de malla en el dominio sólido del cálculo estructural realizado. En este caso, la malla, pese a ser también de importancia capital para obtener buenos resultados, es mucho más sencilla de abordar que en el caso del dominio fluido, donde había que seguir un enfoque adaptativo a diferentes zonas del dominio, considerar capa límite o tener en cuenta la influencia de las fronteras del dominio con la respectiva repercusión en el tamaño de la malla.

Al tratarse de una geometría prismática rectangular es tremendamente sencillo realizar el mallado usando precisamente este tipo de elementos, obteniendo así una malla estructurada, que ofrece una mayor precisión y un menor coste computacional también. Además, puesto que el espesor de la placa es mucho menor en comparación con el resto de dimensiones de la misma, los elementos prismáticos utilizados para el mallado serán también menores en el espesor. De este modo, para mallar, se realiza un mallado de superficie en la placa y a partir de ahí se hace una operación de barrido (Sweep Method) a lo largo del espesor de la misma.

Como criterio para determinar la independencia de malla se han usado las 10 primeras frecuencias naturales de la placa, la cual se asume empotrada por su superficie en contacto con la barra.

En este estudio de independencia de malla es necesario estudiar tanto el tamaño de elemento en la malla de superficie como en el espesor, por lo que se realizan dos análisis independientes. En primer lugar se asume un total de 5 capas de elementos en el espesor de 2 mm de la placa, lo que equivale a una dimensión de la celda de 0.4 mm en esta dirección. Se asume este valor puesto que a priori, en base a experiencia consultada, se piensa que es un valor razonablemente bueno. Tras esto, se hace un barrido a razón de $\sqrt{2}$ del tamaño de elemento de la malla de superficie. En la Figura 3.14 se muestran los resultados de este análisis, donde se puede ver como varía cada una de las frecuencias naturales con el número de celdas de la malla. Además, para poder visualizar conjuntamente las tendencias de estos primeros 10 modos los resultados han sido normalizados, dividiendo cada valor de frecuencia natural por su máximo. Tal y como muestra la gráfica en dicha figura se aprecia una tendencia hacia un óptimo de tamaño de elemento. Finalmente se selecciona el penúltimo punto correspondiente a 10175 elementos, o lo que es lo mismo, 2.5 mm de tamaño de elemento de la malla de superficie.

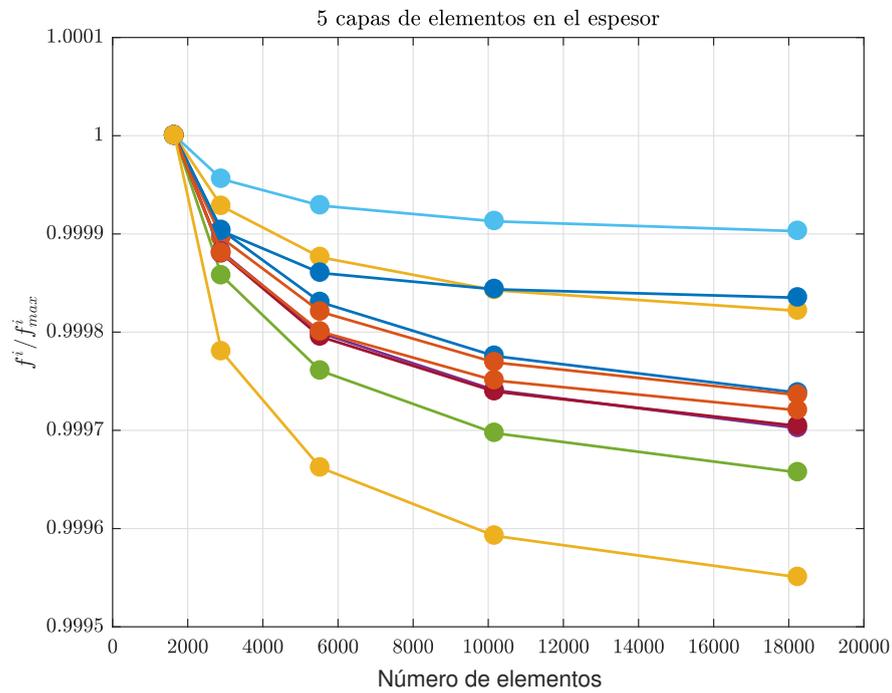


Figura 3.14: Variación de las 10 primeras frecuencias naturales con el número de celdas al cambiar el tamaño del elemento de la malla de superficie. Se toman 5 capas de elementos en el espesor de 2 mm.

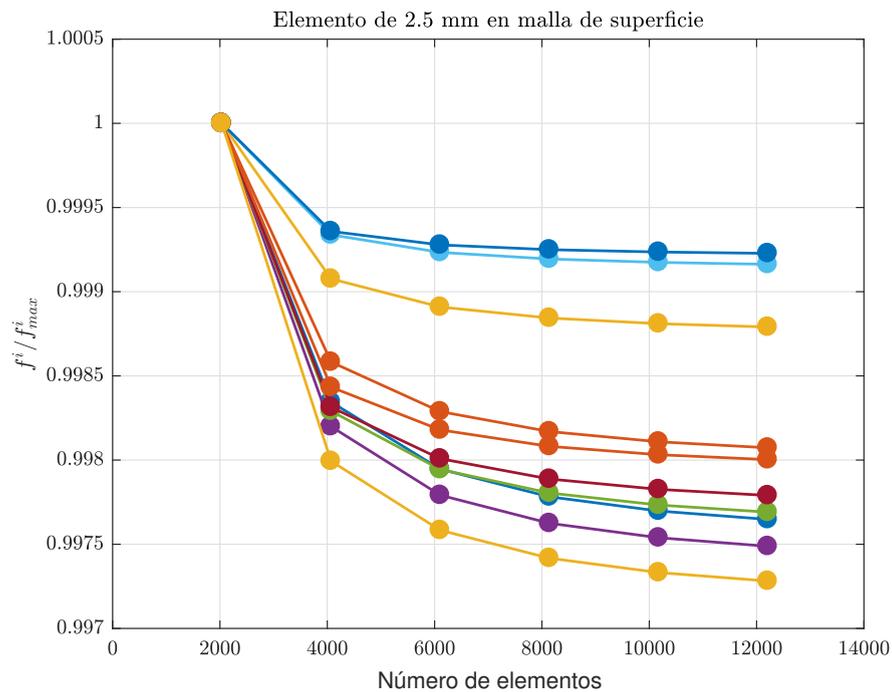


Figura 3.15: Variación de las 10 primeras frecuencias naturales con el número de celdas al cambiar el número de capas de elementos en el espesor de 2 mm. Se toma el tamaño de elemento en la malla de superficie de 2.5 mm obtenido previamente.

Una vez se ha seleccionado el tamaño de elemento en la malla de superficie se procede a analizar el correspondiente al de los elementos en el espesor. Dichos resultados se pueden ver la Figura 3.15, donde se ha hecho un barrido del número de capas de elementos en dichos espesor asumiendo que el tamaño de elemento de superficie es el ya seleccionado de 2.5 mm. Se muestra la evolución de las 10 primeras frecuencias naturales en función del número de elementos totales de la malla donde nuevamente se han normalizado dichas frecuencias naturales.

Finalmente se selecciona el penúltimo punto, que se corresponde también a los 10175 elementos anteriores, o lo que es lo mismo, a las 5 capas que se habían supuesto inicialmente. Esto demuestra que dicho supuesto realizado para el estudio del tamaño de la celda de superficie era razonable.

Cabe mencionar que como se puede apreciar tanto en la Figura 3.14 como en la 3.15 se podría haber optado por tamaños de elemento mayores, reduciendo así el coste computacional y obteniendo igualmente un buen resultado. Sin embargo, en el cálculo estructural de este problema en concreto el coste computacional no es un problema, cosa que si es en el cálculo fluido-dinámico del campo fluido, por tanto se puede optar por una malla más refinada sobre la placa puesto que se dispone de los recursos suficientes para ello. Además, y lo que es muy importante, utilizar una malla más fina no solo será beneficioso para el cálculo estructural sino que además mejorará muchísimo el mapeado de los campos de presiones exportados de StarCCM+ e importados en Ansys Workbench puesto que se dispondrá de mayor resolución espacial.

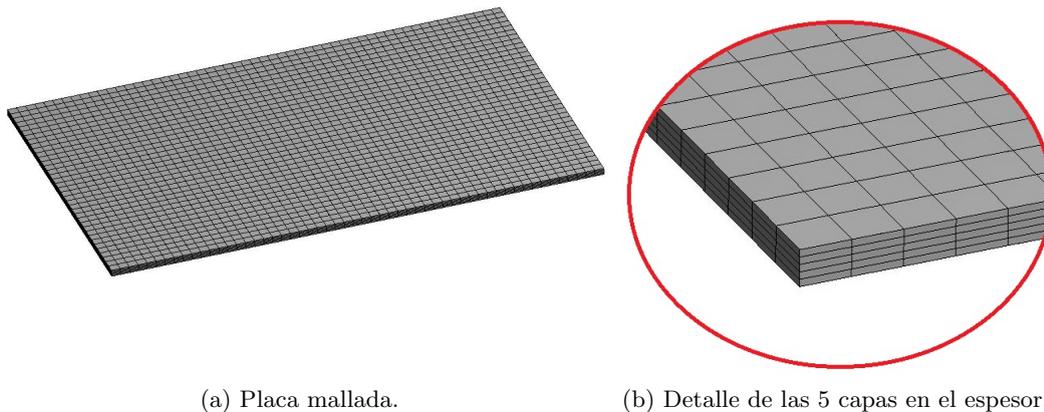


Figura 3.16: Esquema de la malla final utilizada.

Capítulo 4

Discusión de resultados

Índice

4.1. Estudio fluido-dinámico	51
4.2. Estudio mecánico	56
4.3. Estudio del acoplamiento	58

Este capítulo se ha subdividido en tres secciones. En primer lugar se exponen los resultados que tienen que ver únicamente con el cálculo fluido-dinámico del estudio, tras esto es el turno de los resultados que igualmente solo involucran la parte estructural, y finalmente se acaba con los correspondientes al análisis del acoplamiento fluido-estructura.

4.1. Estudio fluido-dinámico

Se puede comenzar la exposición de resultados fluido-dinámicos hablando de los coeficientes de fuerzas de sustentación C_l y resistencia C_d . Estos han sido ya usados en el capítulo anterior para la justificación de la independencia del número de Reynolds y se puede observar su evolución tanto en el campo temporal como de la frecuencia en las Figuras 3.9 y 3.10 respectivamente.

En dichas figuras se puede observar como ambos coeficientes presentan un claro carácter oscilatorio, con una frecuencia dominante para cada uno de ellos, aunque para el caso del C_d también aparecen los armónicos de dicha frecuencia. Como consecuencia, el problema estará dominado por un movimiento oscilatorio de la placa que, a juzgar por la disposición de las condiciones de contorno de empotramiento de la barra y a la dirección de aplicación de ambas fuerzas de sustentación y resistencia, será la fuerza de sustentación la encargada de generar el movimiento vibratorio de la estructura y como se verá más adelante excitará los modos de vibración. Además, cabe mencionar, y se puede verificar en el gráfico de la izquierda en la Figura 3.9, que el valor medio de esta sustentación es nulo ya que la estructura es simétrica (esto es lo que ocurre en los perfiles aerodinámicos simétricos).

Por otro lado, en las tablas 3.1 y 3.2 aparecen los valores numéricos de las frecuencias de ambos coeficientes de fuerza y como se puede apreciar la frecuencia del C_d es aproximadamente el doble de la frecuencia del C_l , lo que es una propiedad típica de los problemas en los que aparece el llamado fenómeno de *Vortex Shedding*. Este fenómeno, que ya se

ha mencionado en repetidas ocasiones anteriormente, determina fuertemente el comportamiento fluido-dinámico del problema estudiado en el presente trabajo. Además, es el causante de la aparición de las Calles de Von Kármán, un comportamiento característico de un flujo en el que tiene lugar un patrón repetitivo de vórtices arremolinados que se van desprendiendo. Estos dos fenómenos a menudo se suelen considerar como lo mismo en la bibliografía científica.

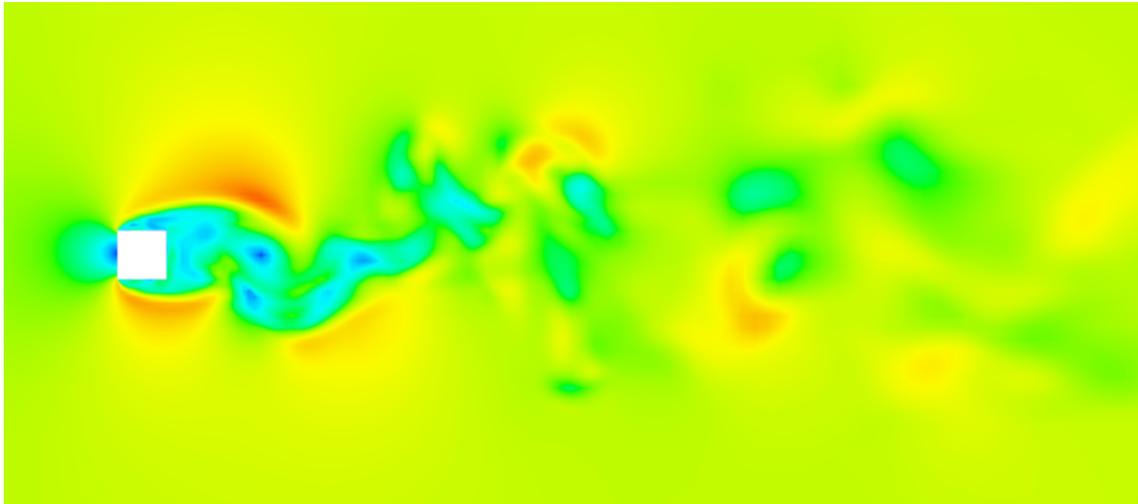


Figura 4.1: Efecto del *Vortex Shedding* sobre la magnitud de la velocidad en un plano medio donde no hay placa.

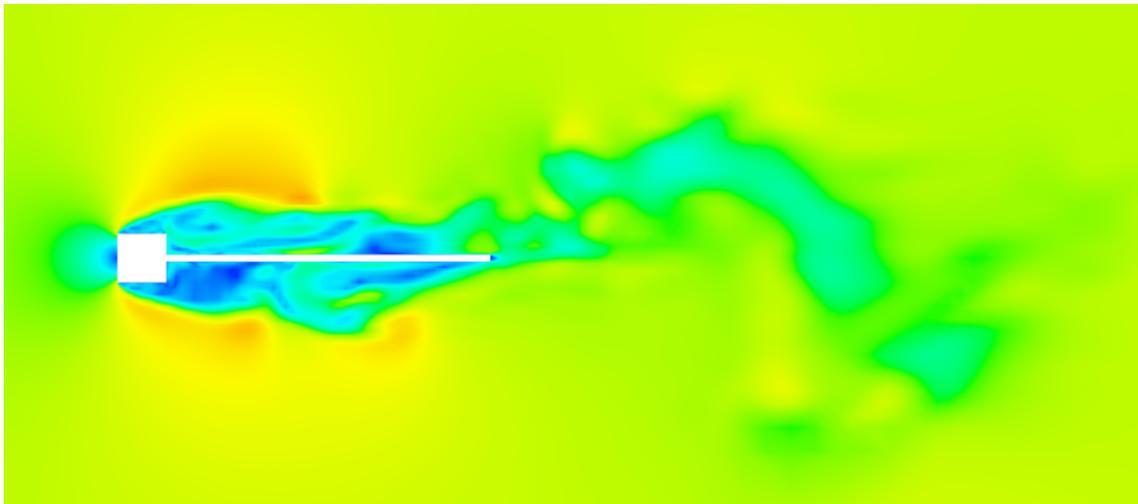


Figura 4.2: Efecto del *Vortex Shedding* sobre la magnitud de la velocidad en un plano medio donde sí hay placa.



Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran el fenómeno anteriormente explicado, pero además, comparando ambas, se puede discernir la influencia de la placa sobre el *Vortex Shedding* o Calles de Von Kármán. El patrón de vórtices repetitivos desprendidos es mucho más

marcado para el caso de la primera figura, donde solamente está la barra, ya que si se incluye la placa, como en la segunda figura, esta actúa como rectificadora haciendo el problema simétrico: el *Vortex Shedding* es un fenómeno de asimetría donde un vórtice sobre un lado del cuerpo cada vez va creciendo, por lo que si eliminamos la asimetría mediante la placa no ocurrirá esto. Además, un efecto de segundo orden también puede ser el hecho de que la viscosidad del fluido readhiera en parte el flujo sobre la placa, reduciendo así las estructuras vorticales. Como consecuencia de esto la estela para el caso de la Figura 4.2 considerando la placa es mucho menos caótica y más corta. Aún así, cabe remarcar que también aparecen en este último caso las Calles de Von Kármán, ya que algunos de los vórtices provenientes de la barra se mantienen aguas abajo. Por este motivo, y por el hecho de que el espesor de la placa es casi un orden de magnitud inferior al de la barra y por tanto la perturbación causada al fluido es mucho menor las Calles de Von Kármán son mucho menos marcadas.

Por otro lado, se debe prestar especial atención a la energía cinética turbulenta, ya que esta es una de los muchos indicadores del grado de confiabilidad de la solución LES obtenida. Al realizar un cálculo LES, puesto que las grandes escalas de la turbulencia se resuelven, mientras que las más pequeñas se modelan, hay una porción de la energía cinética turbulenta total que está siendo calculada y otra modelada. A partir de estas dos componentes, como muestra la ecuación (4.2), se define un parámetro η_K indicador de la cantidad de energía cinética turbulenta del total que es calculada. Este parámetro debe ser superior a 0.75, lo que significa que, como máximo, solo el 25% de dicha energía cinética turbulenta puede ser modelada para que el cálculo LES sea asumible.

$$K_{calc} = \frac{1}{2} \cdot (\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle) \quad (4.1)$$

$$\eta_K = \frac{K_{calc}}{K_{total}} = \frac{K_{calc}}{K_{calc} + K_{mod}} > 0.75 \quad (4.2)$$

En el presente estudio esto se cumple en prácticamente todo el dominio. Para justificarlo se usa la Figura 4.3, donde se representan en un plano medio la energía cinética turbulenta calculada, modelada y total respectivamente. Como se puede observar, casi la completa contribución a la cantidad total proviene de la componente calculada.

Adicionalmente, se ha añadido la Figura 4.4 donde se representa una isosuperficie de vorticidad correspondiente a 500 s^{-1} que ha sido coloreada según la magnitud de la velocidad del dominio. Con esta figura es posible hacerse una idea de como serán las estructuras vorticales en la región del dominio alrededor de la placa y la barra, que es donde aparece la turbulencia por el desprendimiento causado por la barra de sección cuadrada. Si bien, cabe mencionar que como se ha dicho ya lo representado en dicha figura es para un valor determinado de vorticidad, de coger otro valor para la isosuperficie las estructuras vorticales cambiarían. Si la vorticidad escogida es superior se estarían seleccionando los vórtices de mayor intensidad, que por lo general se encuentran más cercanos a la región donde ocurre el desprendimiento, es decir, más cercanos a la barra. Por el contrario, un valor inferior de vorticidad seleccionaría vórtices menos intensos y por tanto se observarían vórtices que se extienden a distancias aguas abajo superiores.

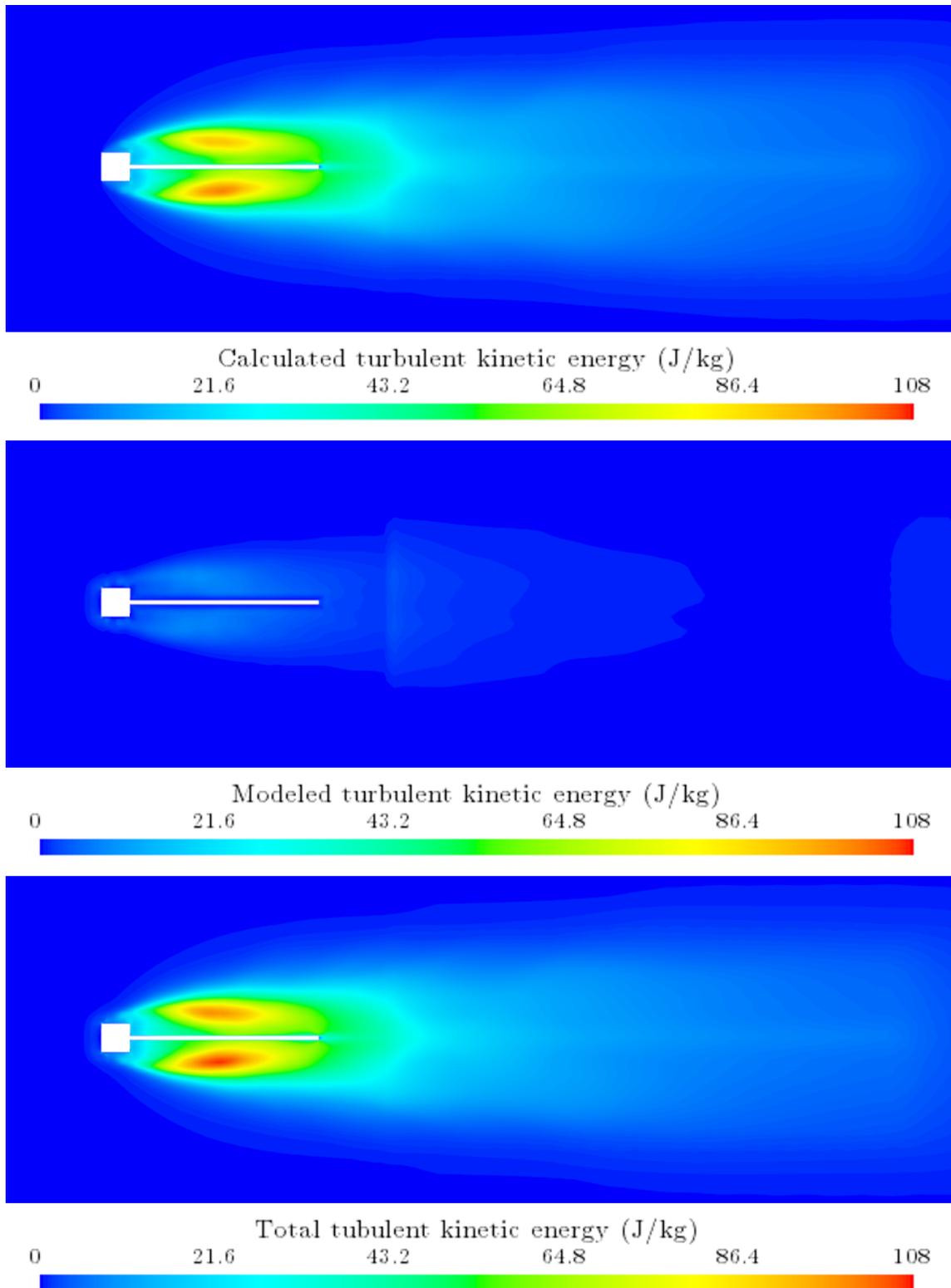


Figura 4.3: Distribución de energía cinética turbulenta calculada, modelada y total en un plano medio de la placa.

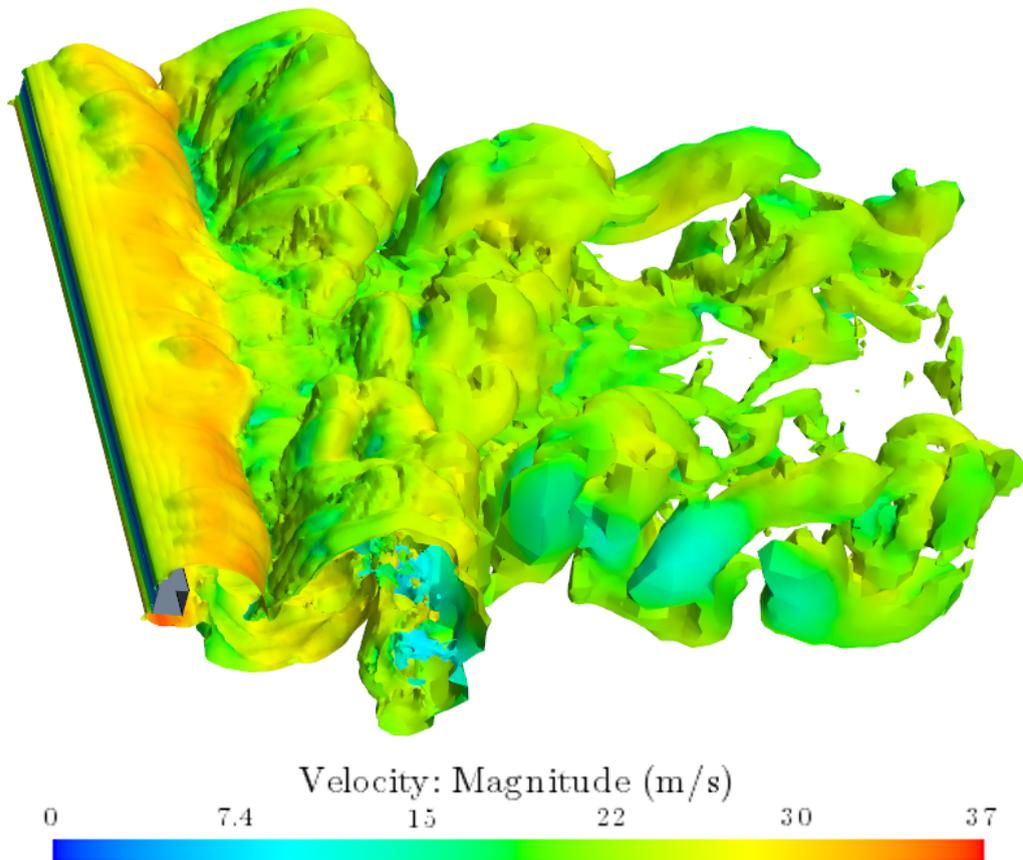


Figura 4.4: Isosuperficie de vorticidad de 500 s^{-1} coloreada según la magnitud de la velocidad en el dominio. Permite extraer una idea de las estructuras vorticales en el dominio para dicho valor de vorticidad.

Finalmente, cabe mostrar también como es la distribución de la presión media sobre la placa, ya que las componentes instantáneas de la misma serán posteriormente transformadas al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier e importadas a Ansys Workbench y mapeadas sobre la placa para el cálculo estructural.

Como puede observarse en la Figura 4.5 izquierda, existe una zona de presiones relativas negativas y otra de positivas. En la zona de presiones negativas habrá recirculación de flujo debido al desprendimiento del mismo causado por la barra de sección cuadrada. Esto tiene implicaciones sobre el campo de velocidades cerca de la placa, que como se puede ver en la figura anterior presenta burbujas de recirculación donde los esfuerzos cortantes cambian de signo. Cabe destacar también que la primera burbuja de recirculación que se observa, totalmente paralela a la barra, es la que se utilizó en el capítulo anterior como criterio para determinar la independencia de malla y de dominio. Esa primera burbuja está muy influenciada por el inmediato desprendimiento del flujo detrás de la barra. Por su parte, la segunda burbuja, que presenta una geometría curva, podría ser debida al cambio de signo en la presión sobre la placa ya que en una zona cercana a donde esta aparece dicha presión pasa de ser negativa a positiva.

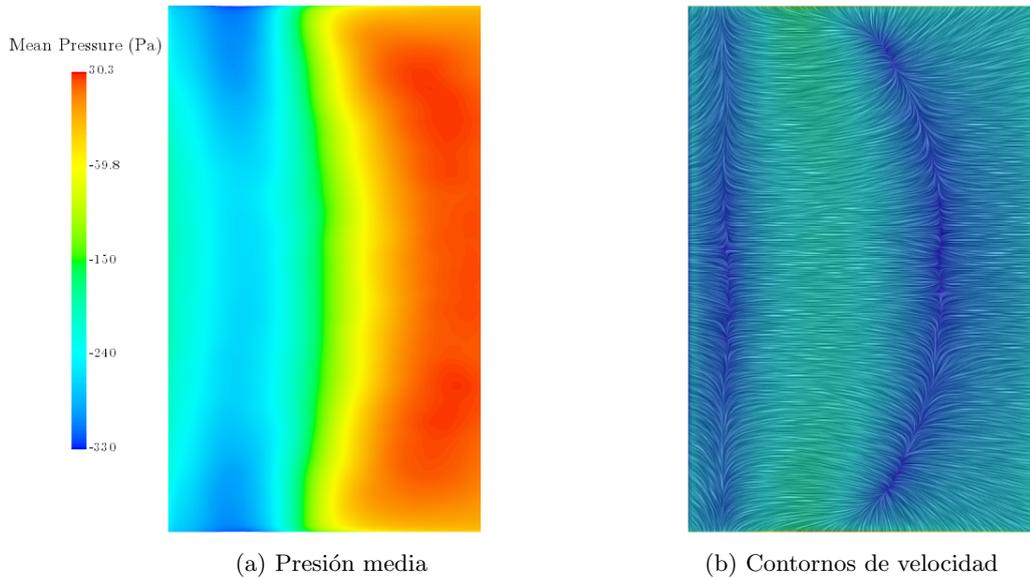


Figura 4.5: Presión media sobre la placa y velocidad en un plano superior y paralelo a la misma donde se pueden ver las burbujas de recirculación.

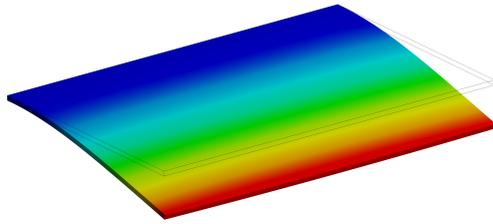
4.2. Estudio mecánico

En esta sección se analiza la placa estructuralmente y de un modo independiente al estudio fluido-dinámico realizado previamente. Por tanto se realiza aquí un estudio modal de la placa supuesta empotrada por la cara en la que esta se une a la barra. La barra se desprecia como se probó anteriormente.

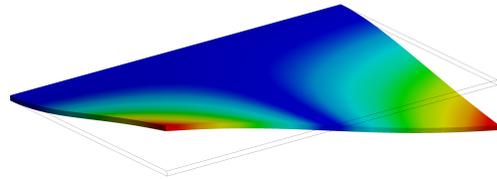
De este análisis modal se obtienen los valores y vectores propios del sistema. Los valores propios se corresponden con las frecuencias de resonancia de cada modo mientras que los vectores propios representan la forma de deformación propia de cada modo. Si bien es sabido que una estructura tiene tantos modos como grados de libertad [6], en el presente estudio se encontrarán solo aquellos modos que estén incluidos en el rango de frecuencias considerado. Este rango de frecuencias va desde cero hasta una frecuencia máxima que está relacionada únicamente con el paso temporal del cálculo, tal y como muestra la ecuación (4.3). Aunque el paso temporal que se definió en el cálculo CFD es de $1 \cdot 10^{-5}$ segundos, solamente se exportan datos de presión para el futuro cálculo armónico de la placa cada 25 pasos temporales, lo que a fin de cuentas resulta en un paso temporal de $25 \cdot 10^{-5}$ segundos. Por tanto, de este modo se obtiene un rango de frecuencias de 0 a 2000 Hz.

$$f_{max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (4.3)$$

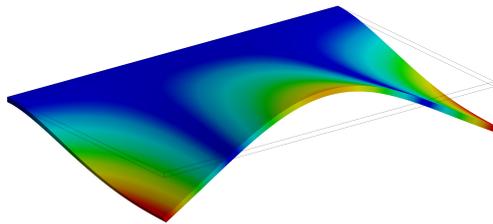
Tras llevar a cabo el cálculo modal con Ansys Workbench se obtienen siete modos de vibración en el rango de frecuencias de trabajo. Las frecuencias de resonancia de cada modo aparecen en la tabla 4.1.



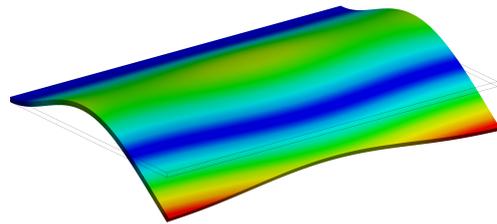
(a) Modo 1



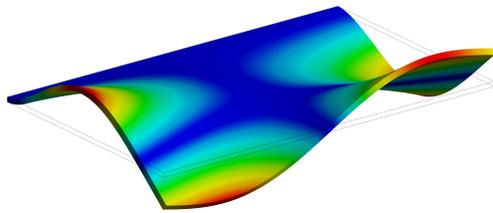
(b) Modo 2



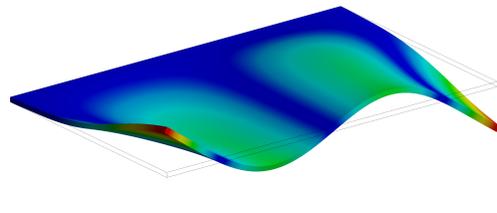
(c) Modo 3



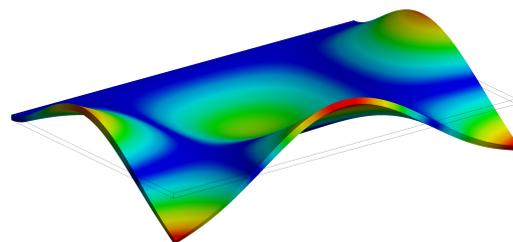
(d) Modo 4



(e) Modo 5



(f) Modo 6



(g) Modo 7

Figura 4.6: Modos de vibración de la placa para el rango de frecuencias de trabajo (0-2000 Hz).

Modo	1	2	3	4	5	6	7
f (Hz)	172.3	310.1	701.4	1081.7	1260.3	1537.6	1862.0
Strouhal	0.117	0.211	0.478	0.737	0.859	1.048	1.270

Tabla 4.1: Frecuencias naturales de los 7 modos de vibración de la placa para el rango de frecuencias de trabajo (0-2000 Hz).

La Figura 4.6 muestra la forma de vibración de cada uno de los siete modos de la estructura en el rango de frecuencias de trabajo. Como se puede observar, el modo 1, 3, 4 y 7 son simétricos mientras que los restantes modos 2, 5 y 6 son antisimétricos. La simetría o antisimetría tendrá, como se verá en la siguiente sección, importante influencia sobre la deformación media de la placa. Cabe comentar también que, según como sea la carga aplicada sobre la estructura, puede ser que no todos los modos de la misma se vean excitados, esto se analizará en la siguiente sección también.

4.3. Estudio del acoplamiento

En esta última sección de resultados se considera el acoplamiento entre el cálculo CFD y el estructural, es decir, se utiliza una evolución temporal de presiones sobre la placa para calcular la respuesta armónica de dicha estructura.

En primer lugar, se debe comentar que todos los modos son excitados. Tras realizar el cálculo de respuesta armónica, se han seleccionado los 7 valores de frecuencia más cercanos a los valores de frecuencia natural de cada modo que han sido expuestos previamente en la tabla 4.1 y se ha visto que su deformación es muy parecida a la mostrada para cada modo en la Figura 4.6. Además, para cada uno de estos 7 estados vibratorios se ha analizado la participación modal de cada modo, esperando que en cada uno de ellos exista un modo dominante. Para ellos se ha hecho uso de la superposición modal de un estado vibratorio, que viene dada por la ecuación (4.4). En dicha ecuación, u representa un estado vibratorio de la placa a la frecuencia f , N hace referencia a los 7 modos posibles, ϕ_i es el autovector i -ésimo, es decir, la forma vibratoria de cada modo (Figura 4.6) y finalmente η_i es la contribución del modo i -ésimo al estado vibratorio u de la placa.

$$u(x, z, f) = \sum_{i=1}^N \eta_i(f) \cdot \phi_i(x, z) \quad (4.4)$$

Puesto que los estados vibratorios son conocidos, pues se han seleccionado 7 de ellos cercanos a las frecuencias naturales, y los vectores propios también son conocidos del análisis modal, es posible obtener la participación de cada modo en cada estado vibratorio. Sin embargo, para ello es necesario resolver por mínimos cuadrados ya que el sistema está sobredeterminado.

Tras llevar a cabo dicho cálculo se obtienen los valores de participación modal mostrados en la Figura 4.7. En ella se puede observar como existe un modo que es dominante para cada estado vibratorio y que obviamente coincide con el que tiene la frecuencia natural más próxima a la frecuencia de excitación. Estas frecuencias de excitación, adimensionalizadas con el número de Strouhal, aparecen en la figura mencionada y se puede comparar que

están muy próximas a las frecuencias naturales mostradas en la tabla 4.1, donde también se han escrito en términos del Strouhal. La importancia de presentar los resultados de este modo, en términos de este número adimensional, es muy grande ya que estos son válidos también cuando se cambie la velocidad del fluido o la longitud de referencia, como muestra la ecuación (4.5).

$$St = \frac{f \cdot L_{ref}}{U_{\infty}} \quad (4.5)$$

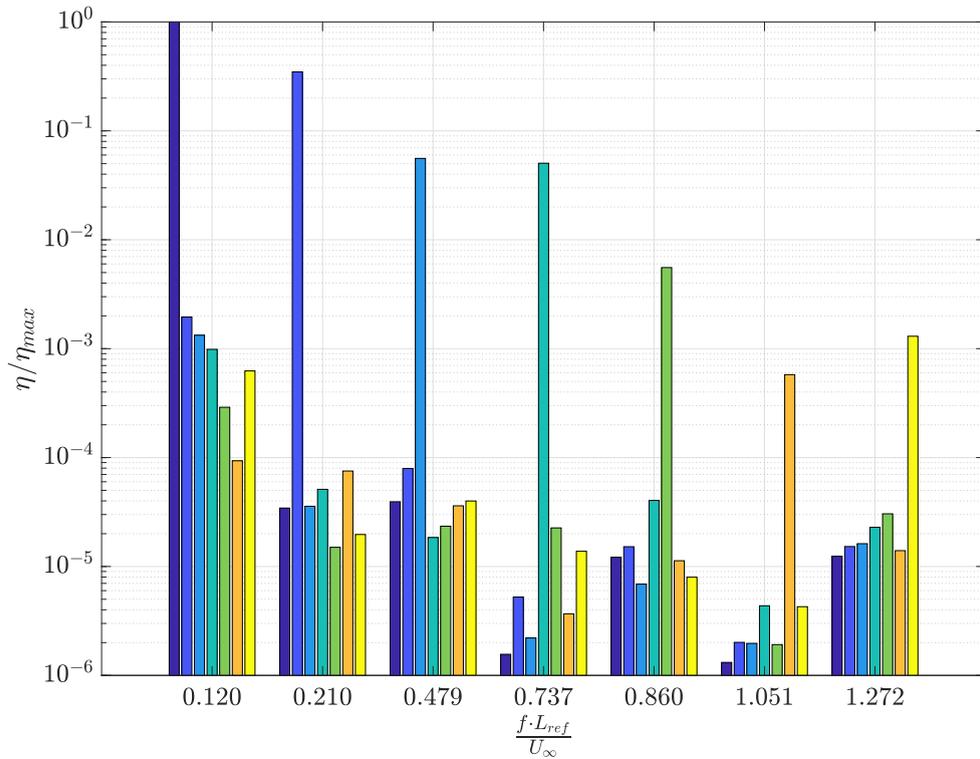


Figura 4.7: Modos dominantes a distintas frecuencias. Puede verse que los siete modos son excitados.

Además, tal y como muestra la Figura 4.7, la deformación es decreciente conforme aumenta la frecuencia de excitación, lo que hace que las deformaciones máximas ocurran con los primeros modos. Esto se debe fundamentalmente a dos motivos:

- Por un lado, la excitación de la placa, que es el coeficiente de sustentación C_l , va cayendo con la frecuencia, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.10.
- En segundo lugar, los modos de alta frecuencia son más rígidos, es decir, requieren de una excitación más intensa para que aparezcan.

Para probar esto se ha representado en la Figura 4.8 como evoluciona la deformación máxima de la placa con la frecuencia, que es equivalente al número de Strouhal como ya se ha comentado anteriormente. Se comprueba que efectivamente que la deformación va

decaendo con la frecuencia. Los valores numéricos respectivos a la frecuencia de resonancia de cada modo aparecen en la tabla 4.2. Además, aquí se puede probar también que los 7 modos de vibración de la placa para el rango de frecuencias de 0 a 2000 Hz son excitados, ya que aparecen los 7 picos a los números de Strouhal propios de las frecuencias naturales que se pueden comparar en la tabla 4.1.

Modo	1	2	3	4	5	6	7
$u_y^{\max}(\mu\text{m})$	37.820	8.541	1.200	1.009	0.122	0.164	0.031

Tabla 4.2: Valores numéricos de las deformaciones máximas a las frecuencias naturales de cada modo.

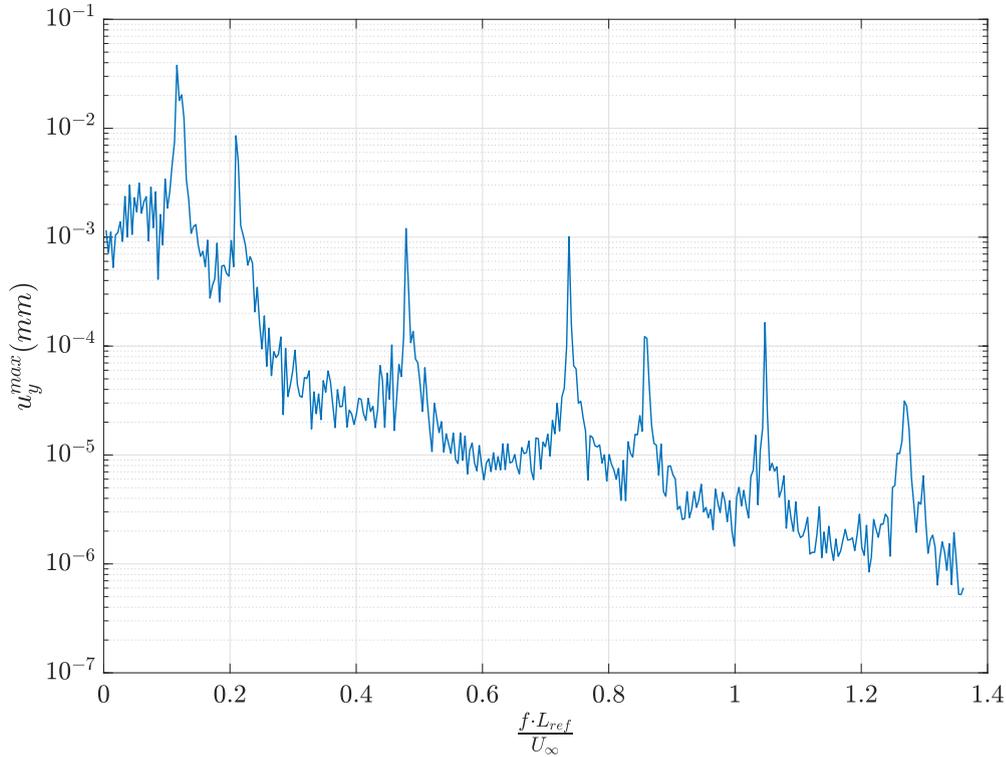


Figura 4.8: Evolución de la deformación máxima de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia).

También resulta interesante comentar el comportamiento de la deformación media de la placa con la frecuencia ya que esto revela información sobre la simetría de los modos de vibración.

En la Figura 4.9 se ha representado esta deformación media y como se puede observar, además de ser decadente con la frecuencia, solamente aparecen tres picos, es decir, tres modos, que se corresponden con el modo 1, el modo 3 y el modo 4. De los modos que no aparecen, el 2, el 5 y el 6 son completamente antisimétricos, como se puede comprobar analizando la Figura 4.6. En cuanto al modo 7 ocurre algo muy curioso y es que aunque este modo si que es simétrico su deformación máxima y mínima considerando el signo son muy muy parecidas y por tanto existe una compensación en la deformación ya que aunque

en un lado la magnitud es mayor en la otra el área es superior. Además, el hecho de que la deformación decaiga con la frecuencia y este sea precisamente el modo de mayor frecuencia también contribuye a este efecto.

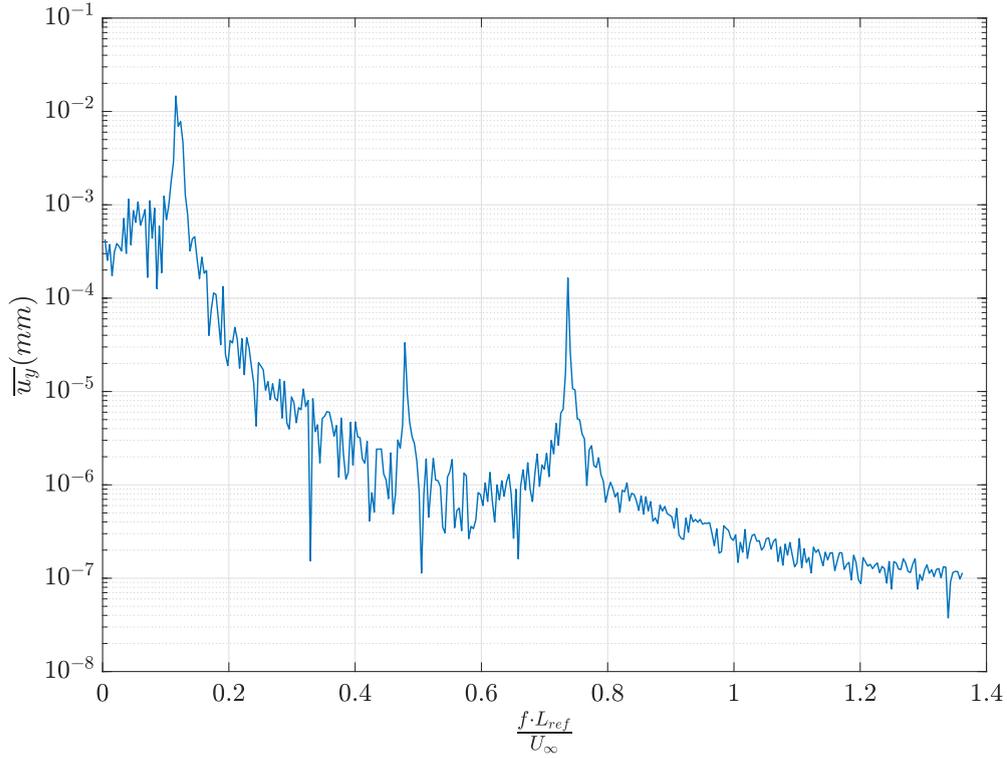


Figura 4.9: Evolución de la deformación media de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia).

Por último, cabe mencionar un aspecto. Como anteriormente se comentó, en el presente problema es el coeficiente de sustentación o Lift C_l el que se encarga de excitar la placa. Sin embargo, atendiendo a las Figuras 4.8 o 4.9 no se distingue claramente el pico correspondiente a este coeficiente.

En la tabla 3.1 se mostró que la frecuencia propia de este coeficiente es de 181.8 Hz, o lo que es equivalente a un número de Strouhal de 0.124, y puesto que el primer modo presenta una frecuencia y número de Strouhal de 172.3 Hz y 0.117 respectivamente puede ser posible que ambos se solapen por la proximidad entre ambos. De hecho, con una observación más exhaustiva de dichas figuras puede ser que la perturbación del pico del primer modo se deba al C_l .

Para comprobar si esto es realmente así y ambas frecuencias se están solapando se ha realizado otro cálculo modal y de respuesta armónica aumentando la rigidez de la placa en 2.5 veces, lo que implica un desplazamiento en los modos a mayores frecuencias. Con ello se obtiene que el primer modo aparece para un frecuencia bastante superior, por lo que todos los modos están ahora desplazados, tanto es así que en el rango de frecuencias de 0 a 2000 Hz solo aparecen ahora 5 modos. Ahora visualizando la Figura 4.10 se puede ver como para el Strouhal de 0.124 aparece un pico, que es el correspondiente al coeficiente de sustentación C_l y a partir de ahí aparecen 5 picos más asociados a los 5 modos. En

la tabla 4.3 se puede comparar numéricamente la separación que existe ahora entre dicho coeficiente y el nuevo primer modo. Por tanto, se prueba que efectivamente en el caso original de la rigidez del aluminio existía un acoplamiento por la cercanía en frecuencia.

	f (Hz)	Strouhal
Modo 1'	272.8	0.186
C₁	181.8	0.124

Tabla 4.3: Comparación entre las frecuencias del C_l y del nuevo primer modo tras aumentar la rigidez de la placa en 2.5 veces.

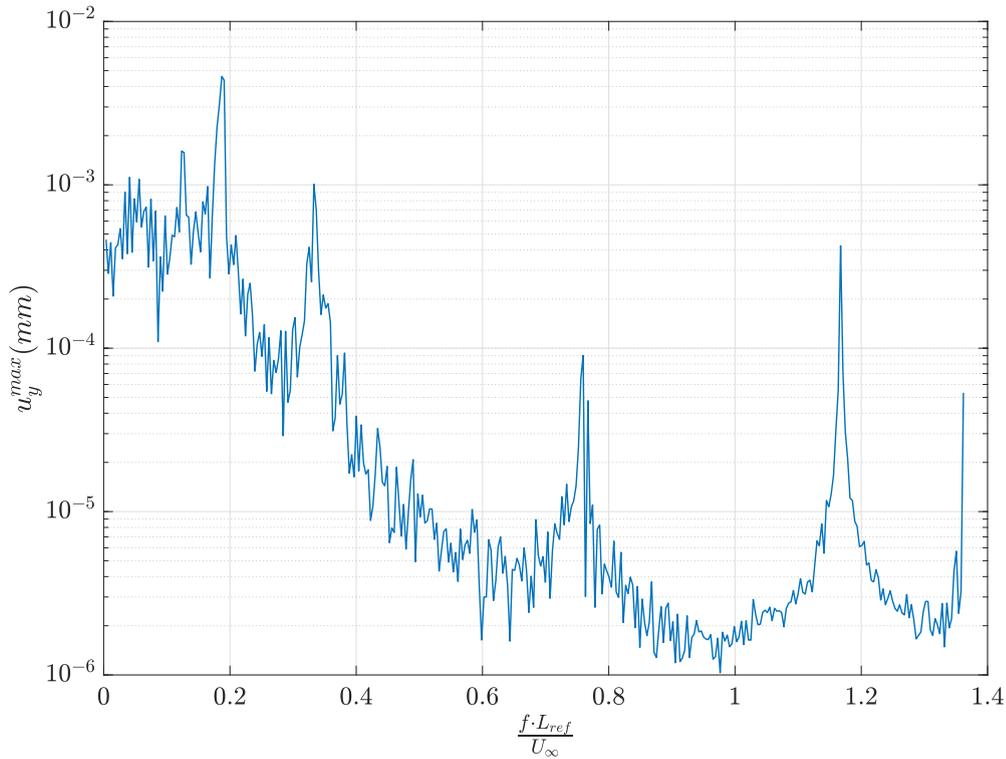


Figura 4.10: Evolución de la deformación máxima de la placa con el número de Strouhal (equivalente a la frecuencia) aumentando la rigidez de la placa en 2.5 veces.

Una vez expuestos todos estos resultados, puesto que han sido para un caso concreto de condiciones de velocidad y de material, cabe preguntarse que ocurriría con la solución si se cambiase dicho material o se cambiase la velocidad del fluido incidente, lo que puede ser muy común en cualquier aplicación real. Siempre se puede recalculer todo el problema de nuevo, partiendo del cálculo fluido-dinámico para obtener las presiones sobre la placa y tras esto realizar de nuevo el cálculo armónico. Si bien, el interés reside en poder aprovechar la solución ya obtenida para simplificar y agilizar los cálculos. En concreto, se pretende evitar tener que realizar de nuevo el estudio fluido-dinámico, ya que al tratarse de un cálculo LES el coste computacional es muy alto. El cálculo estructural no supone mayor problema, es muchísimo más rápido que el fluido-dinámico por lo que este no importaría realizarlo de nuevo. Por tanto, de cambiar el material o alguna de sus propiedades

simplemente se realizaría de nuevo el cálculo estructural puesto que, al haber supuesto acoplamiento monodireccional, la solución del campo fluido no depende del material. Sin embargo, el problema viene cuando se pretende modificar un parámetro fluido-dinámico como la velocidad del fluido U_∞ , ya que a priori habría que realizar de nuevo el cálculo LES.

Para responder a esto es preciso entender primeramente de qué parámetros depende la solución. Para su obtención se puede proceder mediante análisis dimensional o mediante la adimensionalización de las ecuaciones del fluido y del sólido [1]. Sin más rodeos, se muestran en forma de números adimensionales en la ecuación (4.6). El interés de utilizar aquí número adimensionales es evidente ya que permiten generalizar la solución.

$$\frac{U_y^{max}}{L_{ref}} = f \left(Re, St, \frac{E}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2}, \frac{\rho_s}{\rho_\infty} \right) \quad (4.6)$$

El primer comentario a realizar respecto a la ecuación anterior es la presencia del número de Reynolds. Pese a que para un problema genérico de este estilo dicho número adimensional tiene una gran influencia sobre la solución para este en concreto puede despreciarse ya que como anteriormente se ha probado es despreciable su efecto.

La mayor influencia aquí al cambiar la velocidad reside en el tercer parámetro, el parámetro de rigidez o K .

Se supone el caso en el que se parte de la solución obtenida en la Figura 4.8 para una velocidad de 22 m/s y aluminio y se pretende duplicar la velocidad a 44 m/s. Para evitar volver a realizar el cálculo LES se calcula, por medio del parámetro de rigidez, el nuevo módulo de Young del material cuyo cambio es análogo al cambio en velocidad. De este modo simplemente sería necesario volver a realizar el estudio mecánico cambiando la rigidez del material y el efecto en la solución sería análogo a cambiar la velocidad. Sin embargo, se debe mantener constante el resto de parámetros del material, ya que de cambiar por ejemplo la densidad esto ya no se cumpliría pues el cociente de densidades es otro parámetro de los que depende la solución del problema tal y como muestra la ecuación (4.6).

Por tanto, si se duplica la velocidad el parámetro de rigidez se divide por cuatro:

$$K_{22m/s} = \frac{E}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot 22^2} = 0.24 \quad \rightarrow \quad K_{44m/s} = \frac{E}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot 44^2} = 0.06 \quad (4.7)$$

Es posible obtener, con este nuevo parámetro de rigidez, que rigidez la corresponde al material si la velocidad se mantienen en 22 m/s, reflejando así el cambio en términos de rigidez. Como es directo, si el parámetro de rigidez se divide por 4 la rigidez también se dividirá por cuatro, tal y como muestra la siguiente ecuación, donde la rigidez original del aluminio es de 71 GPa.

$$E' = K_{44m/s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot 22^2 = 17.75 \text{ GPa} \quad (4.8)$$

Por tanto, ahora simplemente se debe sustituir este valor de rigidez en Ansys y calcular la nueva solución, la cual será para una velocidad de 22 m/s y una rigidez de 17.75 GPa. Tras obtener dicha solución, se adimensionaliza utilizando para dicha adimensionalización la velocidad original de 22 m/s y posteriormente se desadimensionaliza utilizando la nueva velocidad de 44 m/s. Con esto, se habrá obtenido finalmente la solución al problema con

el doble de velocidad habiendo evitado llevar a cabo el cálculo CFD nuevamente. Esta solución aparece en la Figura 4.11, y como se puede observar, comparando con la Figura 4.8 (pese a que esta está en términos del número de Strouhal es totalmente análogo) al duplicar la velocidad la deformación ha aumentado.

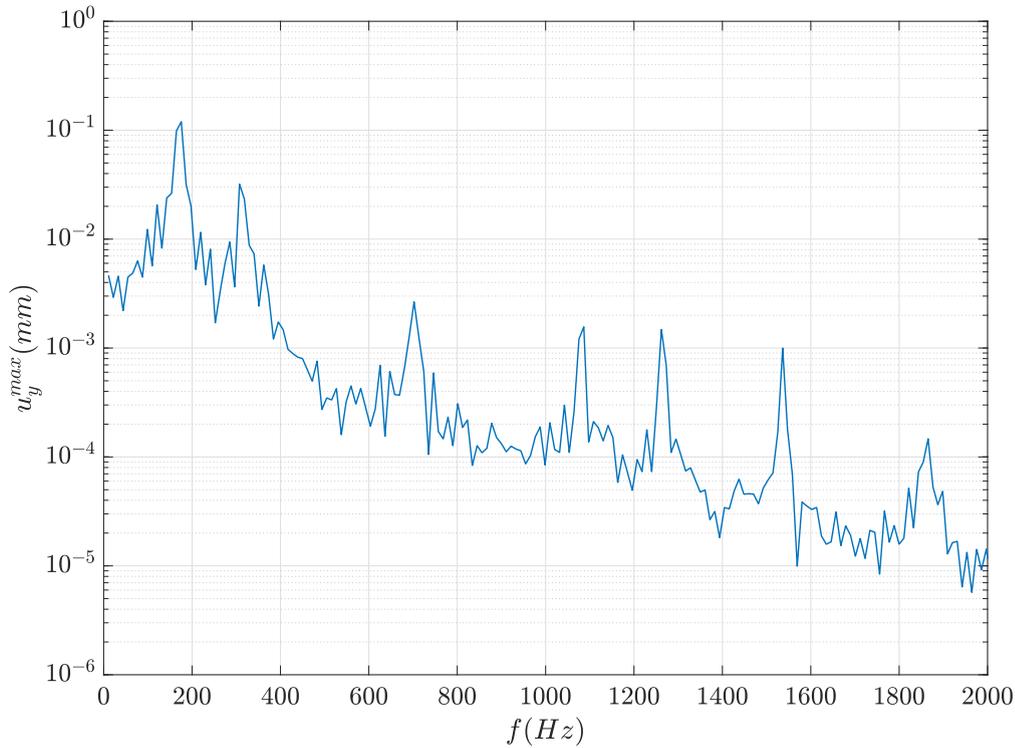


Figura 4.11: Solución de la deformación máxima de la placa ante un cambio en la velocidad del fluido de 22 m/s a 44 m/s.

También se puede observar la solución en términos del número de Strouhal, y como se puede ver para el caso de velocidad 44 m/s los modos están más próximos, en concreto, a la mitad de separación. Destacar que el hecho que para 44 m/s aparezcan 12 modos en lugar de 7 es debido a que se ha modificado para hacer el cálculo la rigidez de la placa y por tanto se modifican sus valores frecuencias naturales. Sin embargo, solamente son válidas las 7 primeras y si se traslada al campo de la frecuencia, desadimensionalizando, tal y como muestra la Figura 4.11 solo aparecen los 7 modos que deben aparecer.

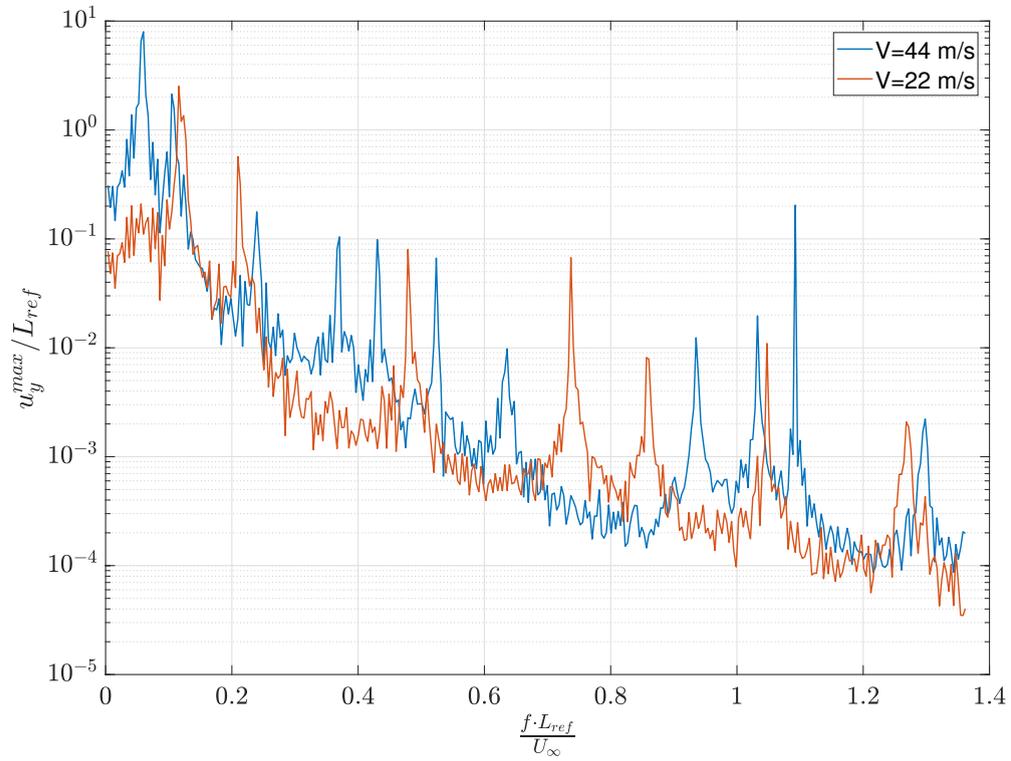


Figura 4.12: Solución de la deformación máxima de la placa ante un cambio en la velocidad del fluido de 22 m/s a 44 m/s.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Índice

5.1. Conclusiones del trabajo	67
5.2. Trabajos futuros	68

5.1. Conclusiones del trabajo

En primer lugar, remarcar que es fundamental tener en cuenta el fenómeno del *Vortex Shedding* en problemas de este tipo. Su importancia reside en la aparición de una frecuencia a la que la estructura es excitada fuertemente, como puede observarse en la Figura 3.10 a través del coeficiente de sustentación C_l . Pese a que éste tiene contenido en frecuencia, aunque decadente, en un amplio rango de frecuencias que hace que todos los modos en dicho rango de frecuencias sean excitados, existe como se ha comentado una frecuencia en la que su contenido es máximo por lo que la estructura sufriría grandes deformaciones pese a no ser excitada a la frecuencia de resonancia de un modo concreto. Consecuentemente, no considerar el *Vortex Shedding* podría acarrear el fallo de la estructura ya que la frecuencia dominante de este fenómeno no aparecería en el análisis modal.

Por otro lado, se puede concluir que la hipótesis realizada al comienzo del proyecto, donde se asumió un acoplamiento entre fluido y estructura monodireccional, el cual es llamado *One Way*, resulta ser mucho más que sensata. La deformación máxima alcanzada en la misma es de tan solo unas 38 micras, tal y como muestra la tabla 4.2, lo cual es mucho menor que todas las dimensiones características del problema. En concreto, comparando con el espesor de la placa, de 2000 micras y que es la dimensión característica más pequeña, dicha deformación máxima es de dos órdenes de magnitud inferior. Esta es, además, incluso menor al tamaño de la capa límite sobre la placa. Otro argumento a favor es que esta deformación máxima será del orden de la resolución que se puede conseguir a la hora de la fabricación del componente, donde ya solamente la propia rugosidad superficial del material será de micras.

Referente al número de Reynolds, como se demostró en el capítulo anterior, para este problema en concreto la influencia de este número adimensional es despreciable. Por ende, los resultados fluido-dinámicos obtenidos en las primeras fases del proyecto son válidos aún cuando se cambie la velocidad del fluido, las dimensiones de la estructura, pero siempre

manteniendo la misma geometría, es decir, solo escalando, o incluso cuando se cambie el fluido y las propiedades ambientales que tengan influencia sobre la densidad o viscosidad de dicho fluido. Esta conclusión es muy potente puesto que permite una gran flexibilidad para futuros estudios, reduciendo así el tiempo y la carga de trabajo.

Pero además, como muestra la ecuación (4.6), existe un parámetro que domina el problema fuertemente, llamado parámetro de rigidez K , que acopla variables fluido-dinámicas con estructurales. De este modo, una vez resuelto el problema para una velocidad puede obtenerse la solución para otra velocidad diferente sin tener que realizar de nuevo el cálculo LES, simplemente cambiando la rigidez del material y relanzando el cálculo estructural, el cual es infinitamente más rápido y menos costoso. Todo esto es gracias, como muchas veces ocurre, al trabajo con número adimensionales, por lo que la importancia y utilidad de estos quedan más que demostradas.

5.2. Trabajos futuros

Indudablemente algo que se debería llevar a cabo en trabajos futuros es un análisis experimental en túnel de viento donde se deberían verificar los resultados obtenidos en este estudio. Para ello tendrían que ser empleados vibrómetros muy precisos capaces de captar deformaciones del orden de micras, lo cual es normalmente un equipamiento caro, o bien se podría escalar la geometría y hacerla más grande, lo que permitiría obtener deformaciones más grandes también. Esto se podría hacer ya que como se ha dicho el problema puede considerarse independiente del número de Reynolds. Si bien, se debe tener en cuenta que de aumentar la deformación de la placa la hipótesis asumida de *One Way* en la interacción fluido-estructura puede que no fuese ya tan razonable.

Análogamente, se podría utilizar otro material menos rígido para la placa, lo que obviamente aumentaría las deformaciones en la misma (como se vio en el capítulo anterior esto es equivalente a aumentar la velocidad) y por tanto más sencillas de medir. De ambos modos, bien incrementando la dimensión de la placa o decrementando su rigidez el cálculo fluido-dinámico no sería necesario de llevarlo a cabo nuevamente, solo el estructural, que es mucho menos costoso computacionalmente hablandado, por lo que los resultados se podrían comparar con los experimentales fácilmente.

Algo interesante sería también llevar a cabo un estudio con acoplamiento *Two Way* en la interacción fluido-estructura y probar que efectivamente los resultados obtenidos son prácticamente similares mientras que el coste computacional y la dificultad del problema aumenta muy significativamente. Esto, de nuevo, prueba la validez de la hipótesis de acoplamiento *One Way*.

Finalmente, se podría llevar el problema aquí estudiado a aplicaciones realistas. Por ejemplo, la geometría del presente estudio se puede considerar como un caso simplificado de un alerón de un coche de competición de campeonatos de velocidad. Por tanto, tendría sentido realizar un análisis más en detalle con una geometría más aerodinámica y parecida a los perfiles utilizados en la realidad. Esto tendría una aplicación práctica muy inmediata y en un campo donde pequeñas variaciones en el campo fluido tiene un efecto primordial en la eficiencia operativa del vehículo.

Otras posibles aplicaciones de esto podría ser el caso de las alas en las aeronaves o incluso de las velas en los barcos veleros.

Bibliografía

- [1] A. Torregrosa, A. Gil, P. Quintero Igeño, A. Ammirati, H. Denayer, and W. Desmet, “Prediction of flow induced vibration of a flat plate located after a bluff wall mounted obstacle,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [2] M. Cavcar, “The international standard atmosphere (isa),” *Anadolu University, Turkey*, vol. 30, p. 9, 2000.
- [3] I. Garrick and H. Wilmer, “Historical development of aircraft flutter,” 1981.
- [4] A. Collar, “The first fifty years of aeroelasticity,” 1978.
- [5] S. B. Pope, “Turbulent flows,” 2001.
- [6] M. Paz, *Dinámica estructural: teoría y cálculo*. Reverté, 1992.
- [7] “Agencia Tributaria, Gobierno de España.” https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml.
- [8] “Descargas de software para alumnos, UPV.” <https://software.upv.es/>.

Parte II

PLIEGO DE CONDICIONES

Capítulo 1

Pliego de condiciones

Índice

1.1. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	73
1.2. Disposiciones generales	73
1.3. Protección en los centros de trabajo	74

En este capítulo se expone la normativa que se debe cumplir en un proyecto de estas características. En primer lugar, se hace mención a las obligaciones y derechos de los trabajadores, seguido de las disposiciones mínimas de seguridad, salud e higiene en los puestos de trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización, para lo que se recurre al Real Decreto 488/1997 del 14 de abril (incluido en el BOE num. 97).

1.1. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril

Como ya se ha comentado, en trabajos con equipos que incluyan pantallas de visualización, como es mayoritariamente este caso, la normativa de seguridad, higiene y salud viene recogida en el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril, el cual fue modificado por última vez el 13 de noviembre de 2004.

En el marco de una política eficaz, coherente y coordinada, la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales es la que establece la normativa sobre responsabilidades y garantías con el objetivo de fijar un nivel adecuado en lo que respecta a la salud del trabajador frente a riesgos procedentes de las condiciones de trabajo. Cabe notar que los aspectos más técnicos de dichas medidas preventivas serán concretados en base al artículo 6 de esta la Ley 31/1995.

1.2. Disposiciones generales

Ámbito de aplicación.

La cobertura de esta Ordenanza se aplica a todas aquellas personas que trabajen y estén

recogidas en el Sistema de la Seguridad Social, proporcionándoles la protección mínima que es obligatoria para tratar de evitar enfermedades y/o accidentes profesionales, sin olvidarse de las óptimas condiciones de bienestar e higiénicas en todos y cada uno de los centros de trabajo en los que este personal lleve a cabo su labor.

Obligaciones y derechos de los trabajadores.

Cooperar, no solo para evitar riesgos laborales sino también para preservar las correspondientes condiciones de higiene en la Empresa, es una de las obligaciones que tiene cada trabajador. Para ello, se deberán cumplir a rajatabla todos los puntos de esta Ordenanza, sus complementarias instrucciones y todas y cada una de las indicaciones y ordenes dictadas por los superiores en la Empresa.

Las obligaciones de los trabajadores a tal efecto en la Empresa se expresan del siguiente modo:

- Recibir formación sobre socorrismo, seguridad, salvamento e higiene mediante cursos llevados a cabo por las Instituciones del Plan Nacional o por la Empresa mismamente.
- Realizar un correcto uso de los medios de protección personal y preocuparse por su conservación y buen estado.
- Ante la posibilidad de riesgos en cualquier puesto de trabajo causados por averías de cualquier tipo el trabajador está obligado a comunicar con sus superiores en la Empresa.
- En aras de evitar el contagio de enfermedades de tal naturaleza el trabajador está obligado a cuidar de su higiene personal de un modo mas restrictivo de lo habitual.
- Evitar a rajatabla ser una molestia para el resto de trabajadores o causarles distracción alguna.
- El trabajador deberá someterse a vacunaciones, inmunizaciones, y reconocimientos médicos en general, siempre que estos hayan sido solicitados por Autoridades Sanitarias o por la misma Empresa a través de su Servicio Médico interno.
- Siempre que las condiciones fuesen razonablemente exigibles, el trabajador tendrá que ayudar en la extinción de accidentes y salvamento.
- No acudir al centro de trabajo en estado de embriaguez o intoxicado de cualquier otro modo.
- No introducir ni consumir en el centro de trabajo bebidas, elementos tóxicas ni cualquier otro tipo de sustancias no permitidas.

1.3. Protección en los centros de trabajo

Artículo 1. Objetivo.

1. El Real Decreto en cuestión fija las premisas mínimas de salud y seguridad que se aplican a cualquier puesto de trabajo con exposición a pantallas de visualización.

2. La aplicación de este Real Decreto queda descartada para:

- a) Buques pesqueros.
- b) Obras de construcción temporales o móviles.
- c) Industrias de extracción.
- d) Campos de cultivo, bosques y otros terrenos que formen parte de una empresa o centro de trabajo agrícola o forestal pero que estén situados fuera de la zona edificada de los mismos.
- e) Medios de transporte utilizados fuera de la empresa o centro de trabajo, así como a los lugares de trabajo situados dentro de los medios de transporte.

3. La normativa definida en la Ley 31/1995 del 8 de noviembre en materia de Prevención de Riesgos Laborales se aplicará completamente al conjunto establecido en el apartado 1.

Artículo 2. Definiciones.

1. En base al Real Decreto en cuestión, se define como lugar de trabajo a aquellas áreas que albergarán a los trabajadores durante su día a día, ya estén edificadas o no. Se consideran también a aquellos lugares a los que por motivos de trabajo el trabajador tenga que acceder puntualmente. Tampoco se olvidan las áreas de descanso, comedores, primeros auxilios y servicios higiénicos.

2. Instalaciones de protección o servicios anexas a áreas de trabajo se entenderán como una parte integrante de los mismos.

Artículo 4. Condiciones constructivas.

1. Las áreas de trabajo, con vista a la seguridad frente a caídas o resbalones del personal, derrumbamientos de material sobre los propios trabajadores o incluso choques o golpes contra objetos, deberán estar debidamente diseñadas contando con las características constructivas más óptimas.

2. Las anteriores características constructivas, aparte de ofrecer seguridad deberán ser las óptimas en términos del control de situaciones de emergencia, como pueden ser las rápidas evacuaciones de personal por incendios y otras causas.

3. El anexo I del Real Decreto muestra unos requisitos de seguridad que deberán ser cumplidos por dichas áreas de trabajo.

Artículo 5. Orden, limpieza y mantenimiento. Señalización.

El anexo II establece las disposiciones a cumplir en términos de mantenimiento, orden y limpieza de áreas de trabajo.

En cuanto a la señalización de los mismos, el Real Decreto 485/1997 del 14 de abril fija los requisitos preestablecidos.

Artículo 7. Condiciones ambientales.

1. La salud y seguridad de los trabajadores no debe verse afectada por las condiciones ambientales de exposición en las áreas de trabajo. Con dicho objetivo, el anexo III establece las condiciones óptimas ambientales (termohigrométricas especialmente) a las que se deben ceñir estas áreas de trabajo.

2. La exposición en el ambiente y lugar de trabajo a agentes biológicos, químicos y físicos se regirá por lo normativa específica.

Artículo 8. Iluminación.

En las áreas de trabajo la iluminación, la cual viene regulada por el anexo IV, deberá ser tal que permita a los trabajadores desempeñar su labor en condiciones de visibilidad tal que no supongan estas un riesgo para su salud y su seguridad.

Artículo 9. Servicios higiénicos y locales de descanso.

El anexo V muestra las disposiciones a las que deben someterse las áreas de trabajo en términos de locales de descanso y de servicios higiénicos.

Artículo 10. Material y locales de primeros auxilios.

El anexo VI expresa las disposiciones con las que deben contar las áreas de trabajo en lo referente a la prestación de servicios de primeros auxilios a los empleados bajo cualquier circunstancia en los que estos sean requeridos, por lo que los locales y materiales necesarios para dichos servicios deberán ser los adecuados.

Artículo 11. Información a los trabajadores.

El empresario debe asegurar, según el artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, que los trabajadores y representantes de los mismos hayan recibido formación e información apropiada en materia de protección y prevención según explica el Real Decreto en cuestión.

Anexo I. Condiciones generales de seguridad en los lugares de trabajo.

1. Seguridad estructural.

1º Según la funcionalidad de las áreas de trabajo y edificios, estos deberán contar con la solidez y estructura adecuada.

2º Los elementos de están permitidos ser sobrecargados. Tampoco se podrá autorizar accesos a cubiertas o techos sin que existan las oportunas garantías de resistencia si no es por medio de los adecuados equipos que garanticen la seguridad en el trabajo.

2. Espacios de trabajo y zonas peligrosas.

- 1º Con el fin de los empleados lleven a cabo su labor de un modo seguro y saludable y en las condiciones más ergonómicas posibles las áreas de trabajo deben contar con las dimensiones adecuadas. Estas dimensiones mínimas deberán ser:
 - a) una altura de suelo a techo de 3 metros, aunque cabe la posibilidad de reducirla a 2.5 metros en locales comerciales, oficinas y despachos y de servicios.
 - b) una superficie libre de 2 metros cuadrados por cada empleado.
 - c) un volumen libre de 10 metros cúbicos por cada empleado.
- 2º Con el propósito de que los empleados desarrollen su labor de un modo seguro y saludable la separación existente entre los elementos presentes en las áreas de trabajo deberá estar regulada. Cuando esto no pueda suceder por motivos intrínsecamente asociados a la labor desempeñada por el operario, este deberá de contar con un espacio adicional suficiente en las proximidades del área donde se encuentra trabajando y que no cumple con la normativa de separación.
- 3º En las áreas de trabajo donde pueda haber algún tipo de riesgo por caída de objetos, caída de personal o de exposiciones o contacto a elementos agresivos las pertinentes medidas deberán ser tomadas para proteger a aquellos trabajadores que deban acceder a dichas áreas por motivos de trabajo. Además, para que aquellos trabajadores que no estén autorizados a acceder a dichas zonas no puedan hacerlo se deberá de disponer de algún tipo de sistema que lo controle y regule.
- 4º La señalización debe ser clara y contundente en aquellas áreas de los lugares de trabajo donde pueda haber riesgo de caída de objetos, caída del personal o de exposición o contacto a elementos agresivos.

3. Suelos, aberturas y desniveles, y barandillas.

- 1º Para garantizar la seguridad en el lugar de trabajo, los suelos de los mismos deberán ser estables, fijos, no resbaladizos y sin pendientes ni irregularidades peligrosas.
- 2º Barandillas o sistemas de protección de seguridad equivalentes deberán de ser empleados para garantizar la seguridad de los trabajadores frente a caídas a través de desniveles o aberturas. Estos sistemas de protección podrán ser retráctiles o móviles si en algún caso es preciso acceder a dicha abertura contando con las medidas de seguridad pertinentes.
- 3º Las barandillas anteriormente mencionadas deberán cumplir requisitos que garanticen la seguridad de los trabajadores. Entre ellos, la rigidez de los materiales de construcción de las mismas debe ser considerada, la altura mínima será de 90 centímetros y contará además con algún tipo de protección en su parte inferior impidiendo así la caída o resbalamiento de objetos o personal por debajo de ella.

4. Tabiques, ventanas y vanos.

- 1º Deberán de haberse fabricado con materiales seguros y estar debidamente señalizados todos aquellos tabiques translúcidos o transparentes con el objetivo de evitar golpes de los trabajadores o lesiones de los mismos en caso de rotura de estos tabiques, en especial aquellos que se encuentren situados cerca de vías de circulación o en las proximidades de los puestos de trabajo. Otra posibilidad es que estén correctamente separados de dichas vías y puestos de trabajo.

2º Los vanos de iluminación cenital y ventanas tendrá que poder ser limpiados de un modo seguro mediante los operarios que se dedican a tal labor, para lo cual tendrán que haber sido fabricados integrando los dispositivos de limpieza. Tampoco deben suponer un riesgo para los trabajadores que se encuentre en ese área o en sus alrededores.

5. Vías de circulación

1º En todas las áreas de trabajo, las vías de circulación, ya sean exteriores o interiores a los edificios, así como los pasillos, puertas, rampas, escalas fijas y escaleras o incluso muelles de carga, se deberán de usar de un modo que no suponga ningún tipo de riesgo para la salud y el bienestar de los operarios ni tampoco para los trabajadores que desempeñen su labor en las proximidades y cumpliendo con el modo en que la normativa lo especifica.

2º Se determina como anchura mínima tanto para los pasillos como para las puertas exteriores de 1 metro y 80 centímetros respectivamente.

3º Deberá de existir una separación suficiente entre las vías de circulación de peatones, escaleras, portones, pasillos y puertas y las vías de circulación destinadas a cualquier tipo de vehículo que pueda suponer un peligro para las personas, tanto pertenecientes a la Empresa como viandantes en caso de zonas exteriores.

4º Deberá de existir una clara señalización en el trazado de las vías de circulación con el objetivo de garantizar la seguridad de los operarios en el trabajo.

6. Puertas y portones

1º Puertas acristaladas y transparentes tendrá que disponer de una apropiada señalización dispuesta a una altura próxima a la vista para evitar el riesgo de golpeo del personal.

2º En el caso de portones o puertas fabricados en materiales translúcidos o transparentes y que no sean lo suficientemente seguros deberán de ser protegidos para evitar que supongan un riesgo para los trabajadores cuando ocurra la rotura.

3º En lo que respecta a las puertas correderas, para evitar la caída de las misma por la salida de los carriles, estas deberán contar con algún tipo de sistema de seguridad.

4º Dispositivos de parada de emergencia y de fácil identificación y acceso serán utilizados en portones y puertas mecánicas para poder operarlas de forma segura para los empleados. También podrán abrirse manualmente a excepción del caso en el que el sistema de emergencia esté averiado, en cuyo caso se abrirán siempre de modo automático.

5º Para evitar caídas, cuando algún tipo de puerta acceda directamente a unas escaleras para cambiar de planta estas no abrirán directamente a dicha escalera sino que abrirá sobre un descanso que cuenten con una altura como mínimo de igual tamaño a la de los escalones.

7. Rampas, escaleras fijas y de servicio

1º Se utilizarán materiales no resbaladizos en la construcción de plataformas de trabajo, rampas y escaleras. También se emplearán elementos para evitar el deslizamiento en las mismas.

- 2º En cuanto a la pendiente de las rampas, su valores máximos permitidos están tabulados.
 - a) 12 % para longitudes inferiores a 3 metros.
 - b) 10 % para longitudes inferiores a 10 metros.
 - c) 8 % para el resto de los casos.
- 3º La mínima anchura de los escalones en las escaleras está tabulada, siendo de 55 centímetros para las escaleras de servicio y de 1 metro para el resto de los casos.
- 4º Todos y cada uno de los peldaños constituyentes de una escalera deberán ser del mismo tamaño. El caso particular de las escaleras de caracol quedan totalmente prohibidas excepto para el caso en que se trate de escaleras de servicio.
- 5º Para las escaleras de servicio la huella será como mínimo de 15 centímetros y la contrahuella de 25 centímetros como máximo. Del mismo modo, las dimensiones para la huella de una escalera que no sea de servicio se encuentran entre 23 y 36 centímetros y para la contrahuella entre 13 y 20 centímetros.
- 6º Se establece un valor máximo de altura entre descansos de 3.7 metros. Además, si estos descansos son intermedios, la profundidad de los mismos será de igual o mayor tamaño que la mitad de la anchura de la escalera o 1 metro. Por otro lado, se define un valor de espacio libre vertical de 2.2 metros desde los peldaños.

8. Escalas fijas

- 1º La máxima distancia existente entre los peldaños será de 30 centímetros y la mínima anchura de la escala fija de 40 centímetros.
- 2º La separación que existe entre la pared más próxima al lado del ascenso y el frente de los escalones será mínimamente de 75 centímetros. Por su parte, la mínima distancia que puede haber entre el objeto fijo más próximo y la parte posterior de los escalones será de 16 centímetros. Además, existirán 40 centímetros de separación a los dos lados del eje de la escala si esta no está provista de jaulas o cualquier otro dispositivo equivalente.

9. Vías y salidas de evacuación

- 1º Las salidas y vías de evacuación ante cualquier accidente y las puertas y vías de circulación que den acceso a estas vías de escape deben de estar sujetas a la regulación específica.
- 2º Las salidas de emergencia y vías de evacuación deben estar libres de obstáculos y desembocar a áreas lo más exteriores y seguras posibles.
- 3º Si algún accidente o amenaza ocurriese, todos los trabajadores deben poder ser evacuados con rapidez y de un modo seguro.
- 4º El tamaño, la cantidad y la distribución de las vías de evacuación dependerán del tamaño del lugar de trabajo, de los equipos presentes, del número de trabajadores y de la frecuencia de utilización de las mismas.
- 5º En lo referente a las puertas de emergencia, estas deben estar siempre abiertas y abrirse hacia el exterior y de un modo sencillo y rápido, para que cualquier persona pueda hacer uso de ellas de una forma efectiva ante cualquier emergencia. Además, está prohibido usar puertas giratorias o correderas como puertas de emergencia.

- 6º Las puertas que se encuentren dispuestas en las vías de evacuación ante una emergencia deberán de estar señalizadas adecuadamente y además deberán de poder abrirse desde el interior y sin necesidad de hacer un gran esfuerzo.
- 7º Las vías y salidas de evacuación deben estar señalizadas de una manera segura y duradera según lo establecido en el Real Decreto 485/1997 del 14 de abril.
- 8º Tanto las vías y salidas de evacuación como el resto de vías que den acceso a ellas deben estar libres de obstáculos para poder hacer un uso seguro y eficiente de ellas. Además, las puertas de emergencia no deben de estar cerradas con llave.
- 9º Las vías de evacuación y salidas que requieran iluminación tendrán que disponer de un sistema de iluminación de seguridad de suficiente intensidad ante cualquier caso de avería en la iluminación.

10. Condiciones de protección contra incendios

- 1º Las áreas y puestos de trabajo deben estar sujetos a lo que dicta la normativa correspondiente a protección contra incendios.
- 2º Se deben emplear los correspondientes dispositivos para combatir los incendios, así como detectores de incendios y alarmas, en función de las dimensiones y utilidad de los edificios, de las características físicas y químicas de las sustancias existentes en los mismos, de los equipos presentes en ellos y del número máximo de personas que pueden estar presentes en el momento del suceso.
- 3º Se requiere un fácil manejo y acceso a todos los dispositivos de uso no automático de lucha contra incendios. El Real Decreto 485/1997 del 14 de abril establece la correcta señalización de estos dispositivos, de modo que esta sea efectiva y duradera.

11. Instalación eléctrica

- 1º En lo que respecta al campo de la instalación eléctrica esta debe ajustarse a lo que establece la normativa específica.
- 2º Explosiones e incendios deben estar evitados en todo momento a través de un óptimo diseño del sistema eléctrico. Además, todos los trabajadores deben estar siempre protegidos de peligros referentes a contactos directos o indirectos.
- 3º Tanto la instalación eléctrica en sí como sus dispositivos de protección están obligados a considerar la tensión, competencia de cada uno de los operarios que puedan acceder a cualquier elemento de esta instalación, así como cualquier factor externo condicionante.

12. Minusválidos.

Todos los elementos utilizados por trabajadores minusválidos, como pueden ser puertas, escaleras, vías de circulación o evacuación, puestos de trabajo y servicios higiénicos, deben estar acondicionados para que estos trabajadores puedan utilizarlos.

Anexo II. Orden, limpieza y mantenimiento.

1. Todas las vías de circulación, salidas y zonas de paso, y más especialmente todas aquellas que se requieran usar en casos de evacuación, deben estar libres de obstáculos en todo momento para poder usarlas fácil y eficientemente en el momento oportuno.

2. Con el objetivo de preservar unas características higiénicas óptimas en todo momento, todos las áreas de trabajo y los equipos e instalaciones presentes en cada una de ellas deben ser limpiados periódicamente. Para favorecer y hacer esta tarea más fácil de ejecutar, techos, suelos y paredes deben haberse elegido con características que favorezcan este mantenimiento de la higiene. Además, todos aquellos residuos, como manchas de grasa o sustancias peligrosas que puedan suponer un riesgo para el operario al desempeñar su labor o por el hecho de que el ambiente quede contaminado, serán retirados con la máxima rapidez posible.
3. Las labores de limpieza no deben suponer ningún tipo de riesgo ni para el operario que las lleva a cabo ni tampoco para cualquier otro tipo de trabajador de la Empresa, por lo que se realizarán en los momentos más adecuadas y con los medios mas apropiados.
4. Todas las instalaciones y equipos que se utilicen por parte de los trabajadores para llevar a cabo su labor deben someterse a revisiones y mantenimientos periódicos con el objetivo de que estos desempeñen su función del modo más apropiado para el progreso del proyecto y para que no supongan ningún tipo de riesgo para el trabajador que está haciendo uso de ella.

En el caso de las instalaciones de ventilación es preciso que todas ellas se encuentren siempre en buen estado y que cuenten con sistemas que avisen sobre posibles fallos en el funcionamiento con el objetivo de evitar cualquier problema para la salud del trabajador.

Por su parte, en instalaciones de protección, el mantenimiento no solo se ceñirá al funcionamiento de dicha instalación sino también al del controlador de funcionamiento de la instalación en cuestión.

Anexo III. Condiciones ambientales de los lugares de trabajo.

1. La seguridad de los empleados así como su salud debe estar garantizada y no verse afectada en ningún caso por condiciones ambientales adversas en el puesto de trabajo.
2. Dichas condiciones ambientales no deben suponer un estado de malestar para los empleados en sus puestos de trabajo. De este modo, deberán llevarse a cabo medidas que acaben con valores extremos de humedad y temperatura o cambios bruscos de los mismos, corrientes de aire que causen malestar, olores insoportables y también irradiación excesiva y radiación procedente del sol.
3. Si el área de trabajo es un área cerrada se deberá de cumplir:
 - a) Temperatura para trabajos de oficina de entre 17°C y 27°C. Si dichos trabajos son menos sedentarios, es decir, más ligeros, dicho rango de temperaturas variará entre 14°C y 25°C.
 - b) El rango permitido para la humedad es de entre el 30 % y el 70 %, a excepción de las áreas de trabajo donde exista peligro por electricidad estática, en cuyo caso el rango cambiara siendo el valor mínimo de 50 %.
 - c) Debe evitarse exposición prolongada por parte de los empleados a corrientes de aire con velocidades superiores a:
 - 1º 0.25 m/s: en ambientes que no sean calurosos.
 - 2º 0.5 m/s: en ambientes calurosos realizando labores sedentarias.

3º 0.75 m/s: en ambientes calurosos realizando labores no sedentarias.

Estos valores limitantes no son aplicables en el caso de corrientes de aire usadas para evitar el estrés causado por una intensa exposición al calor ni tampoco para el caso de aire acondicionado, cuyos límites en este caso serán de 0.25 m/s para labores sedentarias y 0.35 m/s para el resto de casos.

- d) Referente a la normativa del Reglamento de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria que se puede encontrar en el Real Decreto 1618/1980 del 4 de julio se establece que para trabajos sedentarios en ambientes que no estén contaminados por humo de tabaco y que tampoco sean muy caluroso la renovación de aire limpio mínima debe de ser de 30 metros cúbicos por hora y por trabajador. Para el resto de casos se definen 50 metros cúbicos en lugar de 30. Todo esto es con el objetivo de evitar olores desagradables y ambiente viciado.

La renovación del aire en el puesto de trabajo debe quedar garantizada a través del sistema de ventilación empleado y más concretamente la distribución seguida para tanto entradas de aire fresco y limpio como para salidas de aire viciado.

4. Lo expresado en el apartado 3 también se aplicada para aquellas áreas de descanso de los trabajadores, comedores, áreas del servicio de limpieza e higiénicos, locales para el personal de guardia y también para las áreas destinadas a llevar a cabo labores de primeros auxilios.

Anexo IV. Iluminación de los lugares de trabajo.

1. Según la labor que se lleve a cabo en cada uno de los lugares de trabajo la iluminación deberá estar ajustada a dicha labor, considerando:
 - a) Los riesgos dependientes a la iluminación que puedan suponer un peligro para la salud y bienestar de los empleados.
 - b) La iluminación puede jugar un papel crucial en las exigencias visuales de ciertos trabajos desarrollados por los empleados.
2. Se le dará prioridad a la iluminación natural frente a la artificial, aunque esta última deberá usarse como complemento cuando únicamente la iluminación natural no garantice los estándares de iluminación requeridos. Más aún, cuando ciertas labores requieran de altos niveles de iluminación por el papel desempeñado por el operario se empleará también iluminación artificial localizada.
3. La tabla mostrada a continuación (Tabla 1.1) fija los niveles mínimos de iluminación en las áreas de trabajo.

Área del lugar de trabajo (*)	Mínimo nivel de iluminación (lux)
Zona de baja exigencia visual	100
Zona de moderada exigencia visual	200
Zona de alta exigencia visual	500
Zona de muy alta exigencia visual	1000
Áreas de uso ocasional	50
Áreas de uso habitual	100
Vías de circulación de uso ocasional	25
Vías de circulación de uso habitual	50

Tabla 1.1: Niveles mínimos de iluminación según el área de trabajo.

(*) Los niveles de iluminación definidos por la norma deben ser medidos a la altura del suelo a la que se lleva a cabo la labor por parte del operario. Para el caso de vías de circulación esta medición del nivel de iluminación se realiza a la altura del suelo. Por su parte, en áreas de uso general se lleva a cabo la medición a una altura respecto al suelo de 85 centímetros.

Los niveles de iluminación mínima presentados en la Tabla 1.1 deberán de ser duplicados en las siguientes situaciones:

- a) Cuando exista algún tipo de riesgo que atente contra la salud del propio trabajador o de terceros causado por un error de apreciación visual durante la ejecución del trabajo por parte del empleado.
 - b) Cuando sea muy débil el contraste de iluminación o de color entre el fondo donde se encuentra y el objeto.
4. Las condiciones expuestas a continuación deberán ser cumplidas por el sistema de iluminación presente en las áreas de trabajo principalmente en cuanto a distribución y otras características.
- a) Se debe conseguir la mayor uniformidad posible en cuanto a la distribución de los niveles de iluminación.
 - b) Los niveles de iluminación y contraste se tratarán de mantener lo mas constantes posibles en base a lo requerido para llevar a cabo la tarea en cuestión, de modo que se evitarán cambios bruscos en dichos niveles.
 - c) Evitar deslumbramientos directos por luz artificial o natural. Pare ello, se deberá de utilizar algún tipo de protección entre dichas fuentes de iluminación y el campo visual del empleado.
 - d) Evitar deslumbramientos indirectos causados por superficies reflectantes localizadas en lugares cercanos o en el propio lugar de trabajo.
 - e) Deberá evitarse en todo momento un fallo en la percepción por parte del operador de los contrastes, las separaciones entre objetos en su área de trabajo o la profundidad de la misma. Para ello se evitarán todas las fuentes de luz y sistemas que creen algún tipo de riesgo de producir lo anterior y también cualquier tipo de fenómeno estroboscópico o de intermitencia visual.

5. Los sistemas de alumbrado en aquellos lugares y situaciones cuyo fallo pueda originar una situación de peligro y riesgo para el bienestar y salud de los trabajadores contarán con alumbrado de emergencia para garantizar la seguridad y la evacuación.
6. Riesgos de incendio, problemas eléctricos y también explosión deben ser evitados en todo momento mediante el sistema de iluminación instalado.

Anexo V. Servicios higiénicos y locales de descanso.

1. Agua potable

Siempre debe existir agua potable de un modo fácilmente accesible para el trabajador y en las cantidades suficientes para su consumo. Además, se luchará contra la contaminación de esta agua potable del modo que sea posible, siendo este un factor de riesgo para la salud de los empleados muy considerable. Finalmente, todas y cada una de las fuentes de agua dispuestas a lo largo de las áreas de trabajo existirá algún tipo de sistema de indicación para clarificar si se trata de agua potable o no, despejando cualquier duda que pueda existir.

2. Vestuarios, duchas, lavabos y retretes

- 1º Es requisito que los trabajadores dispongan de lugares para realizar un cambio de vestimenta, tales como vestuarios, en aquellos casos en los que la indumentaria a utilizar deba ser especial para la labor a realizar.
- 2º En dichos vestuarios, en los que se podrá almacenar mínimamente ropa y calzado, el trabajador dispondrá de taquillas con llave e individuales para tal efecto además de asientos para poder realizar el cambio de un modo mas seguro. Además, el almacenaje de ropa de calle o de trabajo se realizará en taquillas separadas cuando exista una contaminación en alguna de ellas que no se permita o bien en el trabajo o bien en la calle.
- 3º Las áreas de trabajo dispondrán en sus proximidades y las de los vestuarios de locales habilitados para aseo personal tales que cuenten con espejo y agua corriente (y caliente cuando sea requerido), y jabón y toallas individuales o cualquier otro sistema de lavado y secado que cumpla con la normativa higiénica. Cuando sea necesario por el tipo de trabajo realizado por el empleado, este dispondrá de duchas con agua corriente ya sea fría o caliente. Siempre será necesario proveer a los trabajadores de los sistemas de limpieza e higiene que sean necesarios en cada caso.
- 4º En caso de que los vestuarios y los locales de lavado y aseo no estén suficientemente próximos la comunicación entre ellos debe ser sencilla y rápida de efectuar.
- 5º Es necesario que existan retretes dotados de lavabos para que el trabajador pueda hacer uso de ellos en cualquier momento. Por tanto, estos deben estar situados en las proximidades de las áreas de trabajo, de los vestuarios, de las áreas de descanso y de los locales de aseo (si es que dichos retretes no están integrados en estos locales).
- 6º Respecto a los retretes, los cuales contarán en todo momento con papel higiénico, también poseerán un sistema automático de descarga de agua. Cuando se trate de retretes femeninos contarán además con recipientes cerrados especiales. Todos y cada uno de los retretes estarán separados del resto por puertas dotadas de cierre interior y contarán con al menos una percha.

- 7º No debe suponer una molestia el uso de vestuarios, locales de aseo, retretes, taquillas y armarios, inodoros y duchas, colgadores o asientos. Las dimensiones de los mismos deben ser las suficiente para un uso adecuado, fácil y efectivo. Además, dichas dimensiones dependerán también del número de trabajadores que estarán haciendo uso de todos estos sistemas y locales de un modo simultáneo.
- 8º Todos y cada uno de las instalaciones, equipos y locales mencionados en el punto anterior serán siempre de fácil utilización y acceso, además de poseer unas características constructivas que faciliten su limpieza lo máximo posible.
- 9º Todos los locales de aseo, vestuario y retretes presentarán una separación para hombres y mujeres, o en su defecto se preverá una utilización separada de los mismos. Todos estos locales y equipos serán únicamente usados para los fines para los que están previstos.

3. Locales de descanso

- 1º En toda Empresa debe existir un local de descanso, además provisto de un fácil acceso, para que los trabajadores puedan hacer uso del mismo cuando las condiciones del trabajo lo requieran.
- 2º Para el segmento de trabajadoras en lactancia o embarazadas se deberá de ofrecer la posibilidad de recibir un descanso adecuado y tumbadas.

Anexo VI. Materiales y locales de primeros auxilios.

1. En todo lugar de trabajo debe existir un área destinada a la prestación de servicios de primeros auxilios con el material adecuado para desempeñar su función. Ambos dependerán del número de trabajadores, de la función que desempeñan, de los riesgos a los que estos estén expuestos y de la proximidad a la que se encuentra el área de trabajo del centro de salud más cercano. Este material de primero auxilios empleado también dependerá de la cualificación del personal que presta el servicio.
2. Se debe garantizar una adecuada disponibilidad del material de primeros auxilios ante cualquier accidente laboral, se produzca en la zona del área de trabajo que se produzca. Con tal fin, dicho material se localizará en el área de primeros auxilios de un modo estratégico, no solo garantizando su fácil y rápido acceso sino también su efectivo transporte hasta el lugar de prestación del servicio, en caso que este no se preste en el área destinada a ello por la gravedad del accidente.
3. Se debe disponer mínimamente en toda área de trabajo de un botiquín portátil que contenga en su interior vendas, gasas estériles, desinfectantes y antisépticos autorizados, algodón hidrófilo, pinzas y guantes desechables.
4. Es obligatoria una revisión periódica del material de primeros auxilios y una reposición del mismo tras su agotamiento por el uso o por sobrepasar la caducidad del mismo.
5. Siempre que en la plantilla de trabajo el número de empleados sea superior a 50 deberá de existir un local habilitado para prestar el servicio de primeros auxilios y cualquier otra atención sanitaria. Pero además, para aquellas plantillas de trabajadores de 25 empleados los cuales se encarguen de llevar a cabo labores que supongan un gran riesgo para la salud o que dichas labores se realicen a una distancia considerable respecto al centro de salud más cercano, la autoridad laboral podrá determinar la existencia de un local para prestar ayuda sanitaria también en este caso.

6. Todos y cada uno de los locales de primeros auxilios que existen contarán mínimamente de un botiquín portátil, flujo de agua potable y una camilla. Estos se localizarán lo más cerca posible de los puestos de trabajo y su acceso será sencillo para poder transportar las camillas.
7. Debe de existir siempre una clara y eficiente señalización de los locales de primeros auxilios y de su material.

Parte III

PRESUPUESTO

Capítulo 1

Presupuesto

Índice

1.1. Costes del proyecto	89
1.1.1. Personal analista	89
1.1.2. Hardware	90
1.1.3. Software	90
1.2. Presupuesto total	91

En este apartado se procede al cálculo del coste del desarrollo del proyecto completo. Recoge costes de personal fundamentalmente, aunque también se tienen en cuenta los debidos a los equipos informáticos y licencias de programas que son necesarios para la realización del trabajo.

1.1. Costes del proyecto

Como se ha dicho, se consideran por un lado los costes asociados al trabajo del personal que integran el equipo del proyecto y por otro los costes de todas las herramientas de hardware y software usadas en el mismo.

1.1.1. Personal analista

En cuanto al personal, se cuenta con un ingeniero doctor, dos ingenieros máster y un becario. Se consideran aquí las horas de mano de obra dedicadas por cada miembro al cálculo, simulaciones, tratamiento de resultados y discusiones realizados en el proyecto. El precio de mano de obra de cada uno de ellos son proporcionados por la administración del departamento.

	Horas [h]	Sueldo [€/h]	Subtotal [€]
Ingeniero doctor	50	38.06	1903.00
Ingeniero máster 1	120	35.02	4202.40
Ingeniero máster 2	25	35.02	875.50
Becario	338	5.33	1801.44
		Total	8782.44 €

Tabla 1.1: Coste del personal implicado en el procesado de datos y análisis realizados del proyecto.

1.1.2. Hardware

Se consideran por un lado los costes de amortización de los hardware utilizados: un ordenador portatil Asus de sétima generación, 8GB de RAM, 4 procesadores y disco dura HDD de 1TB y SSD de 480GB integrados y por otro lado se utiliza también una estación de trabajo fija localizada en el departamento. Para los costes de amortización se utilizan los coeficientes de amortización ofrecidos por la Agencia Tributaria [7].

	Precio [€]	Coef. amortizacion [-]	Tiempo uso [meses]	Subtotal [€]
Ordenador portatil	1000	0.25	4	83.33
Ordenador del departamento	2500	0.25	4	208.33
			Total	291.67 €

Tabla 1.2: Coste de los equipos informáticos empleados en el proyecto.

1.1.3. Software

Referente a los software usados, se encuentran entre ellos los siguientes: Microsoft Office 2016, Matlab, Ansys Workbench 2019 y StarCCM+ 13.04. Los tres primeros no implican un coste adicional ya que pueden ser obtenidos con licencia gratuita de estudiante [8] mientras que el último de ellos si que supone un coste por adquisición de licencia.

	Horas [h]	Licencia [€/h]	Subtotal [€]
Microsoft Office 2016	22	0.00	0.00
Matlab	45	0.00	0.00
Ansys	150	0.00	0.00
StarCCM+	700	0.50	350.00
		Total	350.00 €

Tabla 1.3: Coste de los software empleados en el proyecto.

1.2. Presupuesto total

Considerando el desglose del presupuesto realizado, sumando todos los subtotales y aplicando el impuesto al valor añadido (IVA) reglamentario del 21 %, se obtiene un presupuesto total del proyecto de **once mil cuatrocientos tres euros con diecisiete céntimos**.

Personal analista	8782.44 €
Equipos informáticos	291.67 €
Software	350 €
Subtotal	9424.11 €
I.V.A. 21 %	1979.06 €
Total	11403.17 €

Tabla 1.4: Presupuesto total del proyecto.