



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ESTUDIO NUMÉRICO SOBRE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN EL FLUJO EXTERNO INCOMPRESIBLE ALREDEDOR DE PLACAS PLANAS INCLINADAS A DIFERENTES ÁNGULOS DE INCIDENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: David Gil Fernández
Director: José Pérez García

Cartagena, 19 de septiembre de 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme de forma incondicional y poner siempre todos los medios que tienen a mi disposición para que pueda seguir formándome. Porque todos los éxitos que he conseguido y consiga, serán gracias a ellos.

A mi hermana pequeña Elena por quererme y darme momentos de complicidad, y algún que otro dolor de cabeza.

A Paco, Alberto, Samuel y Arturo, por regalarme momentos que curan y por confiar en mí, en mis posibilidades y en mi buena fe para hacer las cosas.

A mi familia por darme siempre su calor y su cariño.

A todos aquellos compañeros de la UPCT que me ayudaron durante mi trayecto en la carrera.

A los que ya no están o nunca estuvieron, y no han podido verme conseguir algo de lo que se hubieran sentido orgullosos.

A Pepe Pérez, por estar disponible para ayudarme en todo momento y guiarme en este último tramo del camino, haciendo que me superara a mí mismo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y FASES DEL TFG.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTUDIO	1
1.2. OBJETIVOS DEL TFG.....	2
1.3. FASES DEL TFG.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. INTRODUCCIÓN. LA AEROELASTICIDAD.....	4
2.2. ESTUDIOS NUMÉRICOS Y COMPUTACIONALES.....	5
2.3. ESTUDIOS DE MALLADO.....	9
2.4. ESTUDIOS DE PROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.....	9
3. EL PROBLEMA AEROELÁSTICO. MODELO NUMÉRICO Y MÉTODOS COMPUTACIONALES PARA SU RESOLUCIÓN.	11
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. MODELO MATEMÁTICO.....	11
3.3. FSI. INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA.....	14
3.3.1. <i>MODELO CFD</i>	15
3.3.2. <i>MODELO CSD</i>	16
3.4. MÉTODOS DE ACOPLAMIENTO DE LOS MODELOS FLUIDO Y ESTRUCTURAL	17
3.4.1. <i>ANÁLISIS ONE-WAY</i>	17
3.4.2. <i>ANÁLISIS TWO-WAY</i>	18
4. DOMINIO COMPUTACIONAL.....	19
4.1. EL FENÓMENO TURBULENTO.....	19
4.1.1. <i>MODELOS DE TURBULENCIA</i>	19
4.1.2. <i>MODELOS DE TURBULENCIA RANS</i>	22
4.2. PARÁMETROS DEL ENTORNO COMPUTACIONAL	26
4.2.1. <i>PARÁMETROS DE CÁLCULO</i>	26
4.2.2. <i>PARÁMETROS DE MALLADO</i>	30
5. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	32
5.1. CREACIÓN DEL MODELO 3D EN CATIA V5.....	32
5.2. ANÁLISIS MODAL.....	38
5.3. VALIDACIÓN DEL MÓDULO FLUENT EN 2D.....	50
5.3.1. <i>METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL MODELO Y DEL ESPACIO COMPUTACIONAL. DESIGN MODELER</i>	50
5.3.2. <i>METDODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN DE LA MALLA. ANSYS MESHER Y GAMBIT</i>	55

5.3.3.	<i>CONFIGURACIÓN DEL SETUP</i>	68
5.3.4.	<i>ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE MALLA Y RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN</i>	74
5.4.	VALIDACIÓN DEL MÓDULO ESTRUCTURAL.....	78
6.	SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ACOPLAMIENTO	80
6.1.	CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO <i>FLUENT</i> EN 3D	85
6.2.	CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO TRANSIENT STRUCTURAL.....	88
6.3.	ACOPLMIENTO DE MÓDULOS.....	92
6.3.1.	<i>ANÁLISIS ONE-WAY</i>	94
6.3.2.	<i>ANÁLISIS TWO-WAY</i>	95
6.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO.	96
6.4.1.	<i>RESULTADOS ONE-WAY</i>	96
6.4.2.	<i>RESULTADOS TWO-WAY</i>	101
6.4.3.	<i>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS SIMULACIONES</i>	105
7.	CONCLUSIONES DEL TFG	107
8.	BIBLIOGRAFÍA	110
9.	ANEXO: EJEMPLO DE INFORME DE UNA SIMULACIÓN FSI TWO-WAY	113

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Triángulo de Arthur Collar	4
Figura 2. Análisis One-way	17
Figura 3. Análisis two-way.....	18
Figura 4. Cascada de energía turbulenta	19
Figura 5. Nivel de detalle de los modelos de turbulencia	21
Figura 6. Promediado de Reynolds	22
Figura 7. Coste computacional de los modelos de turbulencia	25
Figura 8. Influencia de y^+ en la capa límite	27
Figura 9. Esquema de la capa límite.....	27
Figura 10. Esfuerzo cortante en la pared	29
Figura 11. Volume-based skewness	30
Figura 12. Esquema dominio computacional.....	53
Tabla 1. Skewness level.....	31
Tabla 2. Orthogonal quality level	31
Tabla 3. Frecuencias naturales de vibración	46
Tabla 4. Resultados deflexión	79
Imagen 1. Catia. Part Design	32
Imagen 2. Sketch mode.....	33
Imagen 3. Insertar polilínea	34
Imagen 4. Dibujo perfil de la placa.....	34
Imagen 5. Restricción de simetría.....	35
Imagen 6. Cotas.....	36
Imagen 7. Valor cotas.....	36
Imagen 8. Extrusión del sketch	37
Imagen 9. Workbench. Modal.....	39
Imagen 10. Engineering Data	39
Imagen 11. Biblioteca de materiales.....	40
Imagen 12. Módulo Modal.....	40

Imagen 13. Interfaz Modal	41
Imagen 14. Mesh resolution	42
Imagen 15. Selección de material	42
Imagen 16. Malla análisis modal	43
Imagen 17. Fixed support.....	43
Imagen 18. Tipo de selección	44
Imagen 19. Soporte fijo cara	44
Imagen 20. Total deformation	45
Imagen 21. Deformation mode	45
Imagen 22. Modo natural de vibración 1	47
Imagen 23. Modo natural de vibración 2	47
Imagen 24. Modo natural de vibración 3	48
Imagen 25. Modo natural de vibración 4	48
Imagen 26. Modo natural de vibración 5	49
Imagen 27. Modo natural de vibración 6	49
Imagen 28. Entorno Design Modeler	50
Imagen 29. Selección de plano y sketch.....	51
Imagen 30. Orientación de vista	51
Imagen 31. Sketching	52
Imagen 32. Dominio computacional	53
Imagen 33. Surfaces from Sketches	54
Imagen 34. ANSYS Mesher	55
Imagen 35. Generate Mesh.....	56
Imagen 36. Edge Sizing.....	57
Imagen 37. Element Size Mesh	58
Imagen 38. Growth Rate y Adaptative Sizing.....	58
Imagen 39. Named Selection	59
Imagen 40. Malla no estructurada	59
Imagen 41. Interfaz Gambit	60
Imagen 42. Círculos y elipses	61
Imagen 43. Straight edge	61
Imagen 44. Geometry Gambit.....	62

Imagen 45. Geometry Gambit.....	62
Imagen 46. Split Edges	63
Imagen 47. Face	64
Imagen 48. Mesh edge	64
Imagen 49. Interval count	65
Imagen 50. Mesh faces. Type.....	66
Imagen 51. Mesh faces. Elements.....	66
Imagen 52. Specify Continuum Types	67
Imagen 53. Specify Boundary Types	67
Imagen 54. Setup	68
Imagen 55. General. Pressure-Based.Steady	68
Imagen 56. Modelo k-omega	69
Imagen 57. Velocity-inlet	70
Imagen 58. Pressure-outlet.....	70
Imagen 59. Reference values	71
Imagen 60. Second order	72
Imagen 61. Report definitions.....	72
Imagen 62. Drag Coefficient.....	73
Imagen 63. Lift coefficient.....	73
Imagen 64. Static Structural	79
Imagen 65. Geometry acoplamiento	80
Imagen 66. Enclosure	81
Imagen 67. Boolean.....	82
Imagen 68. Selección Fluid/Solid	83
Imagen 69. Selección Fluid/Solid	83
Imagen 70. Hide body	83
Imagen 71. Named Selections.....	84
Imagen 72. Vincular módulos.....	84
Imagen 73. Malla 3D	85
Imagen 74. Dynamic Mesh.....	87
Imagen 75. Create dynamic mesh.....	88
Imagen 76. Loads. Fluid Solid Interface	89

Imagen 77. Stress Tool	90
Imagen 78. Safety Factor.....	90
Imagen 79. Equivalent Stress Von Misses	90
Imagen 80. Analysis Setting	91
Imagen 81. System Coupling	92
Imagen 82. Ajuste System Coupling.....	93
Imagen 83. Configuración one-way	94
Imagen 84. Configuración two-way	95
Imagen 85. Itinerancia de datos.....	96
Imagen 86. Spring Constant Factor	106
Gráfica 1. Frecuencias de vibración	46
Gráfica 2. Coeficiente normal	74
Gráfica 3. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	97
Gráfica 4. Deformación máxima (verde) y media(azul)	97
Gráfica 5. Itinerancia de datos	98
Gráfica 6. Deformación máxima (verde) y media(azul)	98
Gráfica 7. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	99
Gráfica 8. Itinerancia de datos	99
Gráfica 9. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	100
Gráfica 10. Deformación máxima (verde) y media(azul)	100
Gráfica 11. Deformación máxima (verde) y media(azul)	101
Gráfica 12. Itinerancia de datos	101
Gráfica 13. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	102
Gráfica 14. Itinerancia de datos	102
Gráfica 15. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	103
Gráfica 16. Deformación máxima (verde) y media(azul)	103
Gráfica 17. Itinerancia de datos	104
Gráfica 18. Deformación máxima (verde) y media(azul)	104
Gráfica 19. Tensión máxima (verde) y media(azul).....	105



1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y FASES DEL TFG

1.1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTUDIO

La aeroelasticidad es aquella disciplina que se centra en el estudio de la interacción de fuerzas de inercia, elásticas y aerodinámicas presentes en un sólido deformable expuesto a un flujo de aire. Basándonos en las disciplinas que explican la aeroelasticidad y tomando como referencia diferentes estudios y documentación de diversos autores, en este TFG se procederá a la simulación numérica *FSI (Fluid-Solid Interaction)* para la resolución de un problema aeroelástico, que consistirá en una placa plana inclinada respecto de un flujo de aire en el que se encuentra sumergida. Para ello, crearemos un modelo computacional que nos permita obtener datos precisos usando el software de elementos finitos *ANSYS*, una herramienta muy extendida entre las más potentes empresas del campo de la ingeniería y muy utilizada en proyectos de este ámbito que requieran simulaciones con alto nivel de detalle y precisión. Dicho modelo computacional estará constituido por simulaciones en el módulo *Fluent*, normalmente utilizado para simulaciones de fluidos en flujos externos e incompresibles (nuestro caso), y en el módulo *Mechanical*, usado para simulaciones estáticas o dinámicas de sólidos. Finalmente, se acoplarán ambos módulos para así simular la situación de interacción fluido-sólido y, por ende, del problema aeroelástico real objeto de estudio en este trabajo.

Asimismo, en el seno de este acoplamiento de módulos mencionado anteriormente, conviene destacar que las simulaciones pueden realizarse usando dos tipos de modelos o análisis, unidireccional o bidireccional, u originalmente llamados en inglés *one-way* análisis, donde la interacción fluido estructura no se retroalimenta, y *two-way analysis*, donde sí lo hace.



1.2. OBJETIVOS DEL TFG

En este trabajo se tiene como objetivo principal desarrollar un método computacional mediante el software *ANSYS* que permita calcular la magnitud las vibraciones y/u oscilaciones que se producen en una placa plana inclinada sometida a un flujo externo incompresible de aire, como consecuencia de la generación y desprendimiento de vórtices. Así, se obtendrá la frecuencia con la que oscila la placa en función de sus dimensiones, su geometría y de la velocidad del aire.

Para ello, se recogerá primero información de distintos estudios realizados anteriormente en este campo, así como también de bibliografía detallada sobre métodos de simulación numérica en el ámbito de la Mecánica de Fluidos y de la interacción fluido-estructura para poder realizar simulaciones con un criterio bien fundamentado. De este modo, se pretenderá cuantificar la magnitud de las vibraciones para saber si son estas suficientes en frecuencia y magnitud como para poder transformarlas en otro tipo de energía aprovechable como puede ser la eléctrica.

Asimismo, se realizará también una comparación con los resultados obtenidos en el TFG previo “Estudio sobre la interacción fluido-estructura producida por la acción del viento alrededor de una placa plana flexible alineada con el flujo mediante simulación numérica” (2018).

1.3. FASES DEL TFG

Este Trabajo de Fin de Grado se estructura en las fases que se enumeran a continuación:

- 1) **Revisión bibliográfica.** Se analizarán los trabajos publicados sobre la interacción fluido-estructura en el caso de flujo externo incompresible alrededor de placas planas inclinadas y otros estudios realizados con CFD que puedan servir de referencia.



- 2) **Contexto teórico/Planteamiento del problema.** Se definirá el modelo matemático que gobierna el problema aeroelástico objeto de estudio, planteando las distintas posibilidades u opciones de análisis de este en una simulación numérica.
- 3) **Modelado de las geometrías sobre las que se realizarán las simulaciones.** Se modelarán las geometrías en el software.
- 4) **Análisis modal.** Se realizará un análisis modal para estudiar el comportamiento mecánico de la placa sin flujo y obtener sus frecuencias naturales de oscilación.
- 5) **Validación.** Se procederá a la obtención de hipótesis válidas por separado en cada módulo antes de realizar el estudio completo (estudios de sensibilidad de malla). En el módulo Fluent, se hará contrastando con resultados experimentales, y en el módulo Mechanical, contrastando con datos teóricos.
- 6) **Análisis completo.** Se ejecutará una simulación completa realizando el acoplamiento de módulos en el software para ver la interacción entre fluido y estructura.
- 7) **Conclusiones.** Se evaluarán los resultados y datos obtenidos a lo largo del trabajo para valorar si es posible el aprovechamiento energético y qué aplicaciones podría tener en vehículos.



2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN. LA AEROELASTICIDAD.

Fue definida por primera vez por Arthur Collar quien habló de ella en 1947 como “*el estudio de la interacción mutua que ocurre dentro del triángulo de las fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas actuando sobre miembros estructurales expuestos a una corriente de aire, y la influencia de este estudio en el diseño*”. En su definición, empleó el triángulo de la *Figura 1* como esquema visual de cuáles son las disciplinas que intervienen en una interacción sólido-fluido(aire).

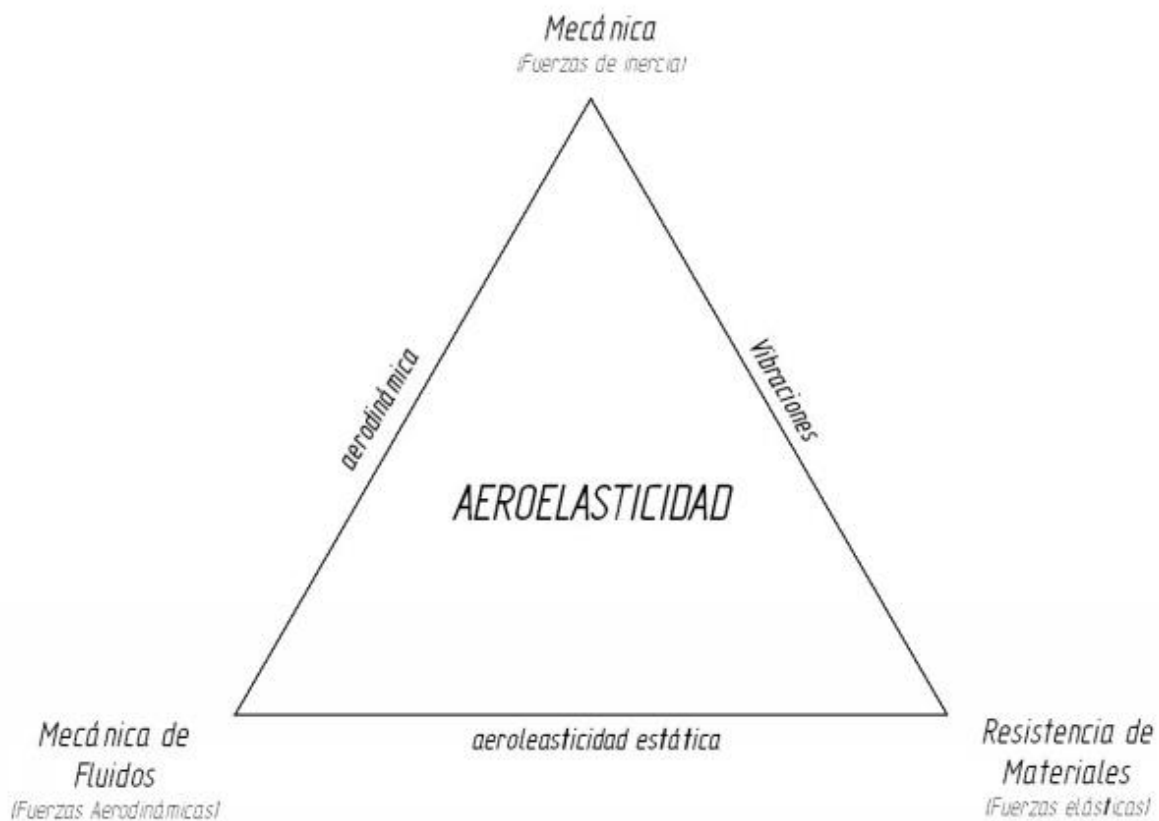


Figura 1. Triángulo de Arthur Collar



De este modo, la naturaleza de un problema aeroelástico está basada en la conjunción de tres materias o disciplinas que son: Mecánica de Fluidos, la cual determina el origen y magnitud de las cargas aerodinámicas que actúan sobre el sólido por la acción del aire; Mecánica, que explica la acción de las fuerzas de inercia; y Resistencia de Materiales, que cuantifica las deformaciones en el sólido debidas a la acción conjunta de todas las cargas existentes y que por tanto explica los cambios en su geometría entre otros fenómenos. Todos estos fenómenos pueden tener un carácter oscilatorio y en consecuencia dar lugar a inestabilidades de carácter aeroelástico, pudiendo ser estas crecientes a lo largo del tiempo.

2.2. ESTUDIOS NUMÉRICOS Y COMPUTACIONALES.

El aleteo es un fenómeno dinámico de naturaleza aeroelástica originado por una interacción entre fuerzas de naturaleza aerodinámica, elástica y de inercia en una estructura. Este fenómeno puede ser perjudicial para una estructura si se acopla junto con los modos naturales de vibración del material, pero a su vez, si se usa correctamente, puede aprovecharse para obtener energía de las vibraciones de forma más eficiente. Por ello, en un problema aeroelástico se han de comprobar cuáles son y qué frecuencia tienen estos modos naturales de vibración en el modelo de estudio para así poder determinar en qué rango de velocidades se podrá trabajar. Esto último es lo que hicieron Sopan Rahtika, Wardana, Sonief y Siswanto en la primera parte de su estudio *“Numerical and experimental investigation on the flutter of cantilevered plates with free leading edge in axial flow”* en 2017, cuyo modelo de estudio tiene gran similitud con el de este TFG al tratarse también de una placa plana. Es por eso, que este estudio ha servido como referencia para la correcta realización del análisis modal del modelo de estudio en este trabajo y, también, para una mejor comprensión de la influencia del fenómeno de los modos naturales de vibración en un problema aeroelástico.

Un artículo que ha resultado de gran ayuda para la comprensión de los efectos de un flujo de aire sobre una placa plana inclinada ha sido *“Numerical Simulation of Vortex Shedding from an*



Inclined Flat Plate (2010)” de K. M. Lam & C. T. Wei. En él, los autores evaluaron la formación de vórtices producida al someter a flujo de aire, primero un cilindro y más tarde una placa plana inclinada a diferentes ángulos de inclinación entre 20º y 30º. Es en este último, en el que pondremos el foco al tratarse de un caso de estudio muy parecido al de este trabajo. Para la realización del análisis de la placa, los autores utilizan un modelo *RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)*, en concreto el *k-ε* con la extensión *RNG*, que produce una mejora en la resolución de flujos recirculantes y con líneas de corriente con curvas pronunciadas. Y, aunque este modelo no es el que se utilizó finalmente para la resolución del problema de estudio de este TFG, pudimos extraer interesantes conclusiones como las siguientes:

- La formación de vórtices en el flujo es periódica por lo que se trata de un caso no estacionario. Esto, explica que el campo de presiones sufra variaciones con arreglo a esos vórtices y, por lo tanto, que los coeficientes de sustentación (C_l) y de resistencia (C_d) oscilen. Además, debido a la inclinación de la placa, los vórtices no guardarán simetría respecto a la línea media que pasa por el centro de gravedad de la placa en la dirección del flujo, lo que causará que el valor medio de C_d aumente y que el valor medio de C_l disminuya conforme aumenta el ángulo de inclinación y viceversa.
- La frecuencia de formación de vórtices aumenta con la disminución del ángulo de ataque, aunque por otro lado el tamaño de estos también disminuye con arreglo a la disminución de del ángulo. En el artículo, los autores cuantifican estas variaciones en la frecuencia a través del número de Strouhal, el cual se calcula como $St=fB/U$, donde f es la frecuencia de generación de vórtices, B es la longitud característica del cuerpo y U es la velocidad del flujo. Este parámetro es de muy extendido uso en el cálculo de flujos turbulentos con periodicidad en formación de vórtices.

En la última parte de este TFG se realizarán dos análisis para evaluar los efectos del viento en nuestra placa. Como ya se mencionó en la introducción, estos dos tipos de análisis representan dos formas diferentes de cálculo cuando se acoplan los módulos *Fluent* y *Mechanical* en *ANSYS*, uno es el análisis *One-way* donde la itinerancia de datos durante el proceso de cálculo es unidireccional y el otro es el análisis *Two-way* donde la itinerancia es bidireccional. Es por la



importancia de estos conceptos en este trabajo, que el TFM *“Two-way fluid-structure coupling in vibration and damping analysis of an oscillating hydrofoil. Université de Montréal (2014)”* de Tahereh Liaghat, ha sido crucial a la hora de abrir la posibilidad a analizar nuestro problema de dos formas diferentes y también para comprender bien en qué consisten cada uno de estos dos tipos de análisis que expone el autor. Además, de este TFM también se ha obtenido la idea de la validación previa de las condiciones de cálculo y de mallado en cada módulo de forma independiente, pudiendo así obtener resultados más fiables y veraces una vez ya en el cálculo con los módulos acoplados.

Un artículo que también trata sobre FSI, pero esta vez con un modelo en 2D es *“Dynamic Behaviour of a Flexible Plate behind a Circular Cylinder: Numerical Study on the Effects of Blockage and Cylinder Size”* de R.K.B. Gallegos y R.N. Sharma. En esta ocasión estamos ante un caso de estudio más diferente al nuestro si lo comparamos con los de otros estudios comentados en este TFG. Aquí, los autores realizan una evaluación del comportamiento dinámico de un cilindro con una placa plana flexible adherida detrás y todo ello contenido entre dos paredes, poniendo el foco del estudio en los efectos que causan en la vibración de la placa, el cilindro y el bloqueo del flujo en el canal. Sin duda, se trata de un caso peculiar y es por ello por lo que resulta atractivo su comentario. Además, en el artículo se expone también un estudio de sensibilidad de la malla del modelo y una validación previa del método de resolución de los cálculos finales, lo cual ha sido tomado como idea para realizarlo en este TFG.

Otro artículo en el que también se habla del estudio de un modelo compuesto por un cilindro con una placa detrás adherida es *“Numerical FSI investigation based on LES: Flow past a cylinder with a flexible splitter plate involving large deformations (FSI-PfS-2a)”* de G. De Nayer y M. Breuer, aunque en este caso el fluido utilizado es el agua. En este caso, los autores realizaron tanto una simulación mediante *CFD*, como un análisis experimental sumergiendo el modelo en un canal. Una particularidad de este estudio es que la placa lleva adherida en la punta una masa de acero, lo que hace que las oscilaciones se produzcan prácticamente en sólo dos dimensiones. Por otro lado, cabe destacar que esta vez no sólo estamos ante una simulación 3D de *FSI*, sino que además esta simulación está realizada con el modelo de



turbulencia *LES* (Large Eddy Simulation), el segundo modelo de cálculo más potente que existe en la actualidad para flujos turbulentos. Es por ello, que este artículo no es una referencia en cuanto al modelo de cálculo utilizado, ya que éste tiene un coste computacional muy muy alto.

Uno de los aspectos más interesantes del estudio de los efectos del viento sobre placas planas, además de poder usarlo en un posible aprovechamiento energético, es la posibilidad de aplicarlo para ganar seguridad en estructuras con geometrías de ese tipo ante la acción del viento. Es el caso de los paneles solares, los cuales pueden sufrir cargas aerodinámicas que pueden poner en riesgo su estructura. Es justo eso lo que Robert N. Meroney y David E. Neff ponen a prueba en su estudio "*Wind effects on roof-mounted solar photovoltaic arrays: CFD and wind-tunnel evaluation*". En él, los autores sometieron una matriz de paneles solares a estudio, primero mediante *CFD* y luego mediante un experimento, recreando así la situación real de una matriz de placas solares sobre un tejado y poniendo el foco del cálculo en los momentos de torsión derivados de la acción del viento. Para la simulación numérica, Meroney y Neff utilizaron los modelos *k-ε*, *RNG* y *k-ω* para comparar la desviación en los resultados, lo que les hizo concluir que mientras con los modelos *RNG* y *k-ω* se obtenían resultados con una baja tasa de error, los resultados derivados del modelo *k-ε* presentaban las mayores desviaciones en los valores de *lift*, *drag* y momento de torsión. Esto último en concreto, nos ha servido para tomar el modelo *k-ω* como referencia para nuestros cálculos, debido a que es un modelo que ha obtenido buenos resultados en una situación parecida a la de estudio en este TFG.

Por último, quería incluir en este apartado el trabajo de final de estudios o *Bachelor Thesis* de Matthias Kortleven "*Simulation Verification and Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine using CFD*". Este trabajo ha resultado de gran ayuda en la comprensión de diversos conceptos que podemos encontrar a lo largo del proceso de una simulación *CFD*, en concreto con *ANSYS*. Y, aunque la simulación que realiza Matthias es para una turbina axial de aire, la explicación para conceptos como *Pressure based solver*, *First Order Upwind Scheme*, *Second Order Upwind Scheme*, *Coupled Algorithm* y *Under-Relaxation Factors* entre otros, ha servido para configurar con criterio el módulo Fluent. Además, el autor también aporta un diagrama de



bloques donde se puede ver a groso modo la secuencia que sigue Fluent cuando está realizando los cálculos.

2.3. ESTUDIOS DE MALLADO.

En este apartado, quiero mencionar de nuevo el trabajo de Matthias Kortleven, ya que en él también se detalla el procedimiento de mallado, tanto en 3D como en 2D, para su turbina. Es por ello y porque Matthias usó también en el cálculo el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, el mismo que utilizaremos nosotros en este TFG, que se ha tomado como referencia para ajustar los parámetros de la malla, ya que es muy importante que una malla sea adecuada para el modelo de turbulencia con el que se harán los cálculos.

Por otro lado, aunque no se ha encontrado tal nivel de detalle sobre la malla como en el de Matthias, cabe mencionar otros artículos y trabajos de donde también se han obtenido datos o se han tomado como referencia en cuanto al número de celdas utilizado, tamaño del espacio computacional o estructura de la malla. Estos artículos son: *“Nonlinear aerodynamic forces on thin flat plate: Numerical study”* de Lin Huang, You-Lin Xu, Haili Liao; *“Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Inclined Flat Plate (2010)”* de K. M. Lam y C. T. Wei; *“Dynamic Behaviour of a Flexible Plate behind a Circular Cylinder: Numerical Study on the Effects of Blockage and Cylinder Size”* de R.K.B. Gallegos y R.N. Sharma; *“Numerical FSI investigation based on LES: Flow past a cylinder with a flexible splitter plate involving large deformations (FSI-PfS-2a)”* de G. De Nayer y M. Breuer.

2.4. ESTUDIOS DE PROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.

Uno de los aspectos más interesantes del estudio del aleteo de placas ante los efectos de un fluido, es la posibilidad de utilizar esto como un método de generación de energía. Un ejemplo puede de esto puede ser el que nos presentan Liaosha Tang, Michael P. Paidoussis y Jin Jiang en su artículo *“Cantilevered flexible plates in axial flow: Energy transfer and the concept of flutter-mill”*. En él, los autores nos presentan un completo desarrollo teórico para un método



de generación de energía eléctrica al que llaman “*flutter-mill*”, que consiste en introducir en someter a un flujo a una placa hecha de un material flexible con unos conductores incrustados entre dos paneles magnéticos. Cuando se produce el aleteo, el movimiento de los conductores en el interior de la placa hace que se genere en ellos una diferencia de potencial entre sus extremos, dando lugar así a la circulación de una intensidad que se recoge a través de un circuito cerrado. Esta intensidad se pasa por unos rectificadores consiguiendo así una corriente continua.

Otro artículo sobre aprovechamiento energético en el aleteo de placas es “*Supersonic Flutter Utilization for Effective Energy-Harvesting Based on Piezoelectric Switching Control*” de Kanjuro Makihara y Shigeru Shimose. Aquí, los autores realizan una simulación numérica para una placa plana con parches piezoeléctricos adheridos sometida a un flujo supersónico, ya que exponen como idea que se podría usar en las alas de la cola de un cohete. En este caso, el estudio está más enfocado en la parte eléctrica que en la aerodinámica.



3. EL PROBLEMA AEROELÁSTICO. MODELO NUMÉRICO Y MÉTODOS COMPUTACIONALES PARA SU RESOLUCIÓN.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. MODELO MATEMÁTICO.

Como ya se dice en el apartado 2.1 de este TFG, un problema aeroelástico está gobernado por tres materias esenciales que aparecen en el triángulo de Arthur Collar: Mecánica de Fluidos, Mecánica y Resistencia de Materiales. Para nuestro caso, agruparemos las dos últimas en una: Dinámica de estructuras. Así, en este apartado se va a proceder a la exposición del modelo matemático de la interacción fluido-estructura, compuesto a su vez por dos modelos: Uno basado en la Mecánica de Fluidos y otro basado en la Dinámica de Estructuras.

En Mecánica de Fluidos todas las ecuaciones se pueden obtener por aplicación a un volumen fluido los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica. Para expresar estas ecuaciones de forma más sencilla utilizaremos la formulación euleriana, aplicando para ello el Teorema del Transporte de Reynolds y el Teorema de la Divergencia de Gauss.

Las tres ecuaciones fundamentales en las que se basa el comportamiento dinámico de un fluido son:

- *La ecuación de continuidad o de conservación de la masa.*

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0$$

- *La ecuación de cantidad de movimiento.*

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p \vec{n} dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS$$



- *La ecuación de conservación de la energía.*

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k(\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS$$

Si aplicamos estas ecuaciones correctamente a nuestro caso, obtenemos la fuerza sobre la placa, la cual se deberá al campo de presiones y al campo de velocidades del flujo, los cuales debido al efecto de la capa límite darán lugar también a un tensor de esfuerzos superficiales de naturaleza viscosa que actúa sobre la placa. Así, la ecuación para la fuerza del fluido sobre la placa es:

En cuanto a la dinámica estructural, nuestro problema estará basado en la Ley de elasticidad de Hooke, que se puede considerar a la placa como un resorte tridimensional dinámico. La ecuación en forma matricial para un movimiento viene dada como:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F$$

En el caso de existir amortiguación, se trataría de un problema de valor propio. Sin embargo, ese no es nuestro caso, ya que en los análisis modales de vibraciones (nuestro caso) la amortiguación no es tenida en cuenta. Así, la ecuación quedaría como:

$$M\ddot{x} + Kx = F$$

Además, si ahora tenemos en cuenta que para un movimiento armónico la aceleración \ddot{x} es asumida como $x\lambda$ (donde λ es un valor propio con unidad de tiempo elevado al cuadrado recíproco), podemos expresar la ecuación de la siguiente forma:

$$Mx\lambda + Kx = F$$



3.2. FEM. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Finite Element Method o Método de los Elementos Finitos es un método numérico para la resolución aproximada de problemas continuos normalmente basados en ecuaciones diferenciales con derivadas parciales muy complejas.

El Método de los Elementos Finitos se caracteriza por lo siguiente:

- Consiste en dividir el “continuo” en un número acotado de partes llamadas “elementos”, cuyo comportamiento vendrá dado por un conjunto de parámetros que están asociados a ciertos puntos característicos llamados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con los que tiene a su alrededor de forma adyacente. Al conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se le llama “malla”
- La solución del problema se obtendrá aplicando las reglas de resolución de problemas discretos a cada elemento de forma individual, ensamblando después las soluciones obtenidas para cada uno de ellos para obtener el sistema completo.
- Las funciones matemáticas dejan de serlo, convirtiéndose en el valor de estas funciones en cada nodo.
- Cómo se comporten los elementos quedará definido por el comportamiento de los nodos gobernados por las “funciones de interpolación” o de funciones de forma”.

De este modo, el *FEM*, se basa en la transformación de un modelo naturaleza continua en uno discreto al dividirlo en elementos, proceso al que se le puede llamar discretización. Así, lo que ocurra en el modelo discretizado vendrá dado por la interpolación de las condiciones impuestas en cada nodo. Podemos concluir entonces que este método es entonces una forma de aproximar los valores de una función continua a partir de un número acotado de puntos.

El método de los elementos es muy usado en la ingeniería debido a que, aunque nació como un método para el cálculo de estructuras, es fácil mente adaptable a problemas de transmisión



de calor, mecánica de fluidos o electromagnetismo. Además, dada la imposibilidad de encontrar una solución analítica para algunos problemas, se convierte en la única alternativa.

3.3. FSI. INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA

La interacción fluido-estructura o *Fluid-Structure Interaction* (FSI) es la interacción de un sólido deformable o movable con un flujo de fluido interno o externo. Esta interacción puede dar lugar a un comportamiento de la estructura y de las cargas aerodinámicas estable u oscilatorio (en un sólido deformable), caso de estudio en este TFG. Este comportamiento oscilatorio se debe a que las cargas aerodinámicas varían con arreglo a la deformación del sólido y viceversa. Es por ello, que en ingeniería es esencial la consideración los efectos de esta interacción, que puede darse desde en puentes o aeronaves hasta en las propias arterias del cuerpo humano.

Un caso de una aeronave que sufrió un accidente porque no se tuvo en cuenta este fenómeno para su diseño, es la *Lockheed L-188 Electra*, que en su vuelo 542 con la compañía *Braniff International Airways* se desintegró en el aire. Al parecer, el fallo empezó en una de las alas, que a pesar de estar testadas para soportar las vibraciones por la interacción fluido-estructura, no se tuvo en cuenta que estas vibraciones se pudieran acoplar de forma armónica con el modo de vibración natural del material de las alas, lo que provocó la rotura del ala y, en consecuencia, del resto del avión. De este modo, se puede ver que el no considerar los efectos de la interacción fluido-estructura puede ser catastrófico.

En general, los problemas que comprenden varias disciplinas de la física, como es el caso de la interacción fluido-estructura, son a menudo complicados de resolver de forma analítica y requieren de experimentos o simulación numérica. Este último método está aún en desarrollo, pero ya se disponen de medios para la realización de simulaciones en el ámbito del *FSI*. Principalmente existen dos métodos u enfoques para la simulación de sistemas este campo:

- Enfoque escalonado o dividido. En este tipo de enfoque, las ecuaciones del movimiento de la malla del sólido y del fluido son resueltas de forma secuencial en un acoplamiento



parcial. Esto permite que se puedan usar los más contrastados solucionadores para fluidos y estructuras de forma separada, lo que representa su principal ventaja.

- Enfoque monolítico. En este caso, las ecuaciones del movimiento de la malla son resueltas de forma simultánea de manera completamente acoplada. La mayor ventaja de este modo de simulación es que es muy robusto y muchos de los problemas que se pueden encontrar en una simulación dividida suelen evitarse.

En el caso de este TFG, el enfoque utilizado será el escalonado, que se llevará a cabo mediante el acoplamiento de los módulos *Fluent (CFD)* y *Transient Structural (CSD)* del software ANSYS.

3.3.1. MODELO CFD.

La dinámica computacional de fluidos o *CFD* es la ciencia que, con la ayuda de ordenadores, genera predicciones cuantitativas de los fenómenos relacionados con los flujos de fluidos basándose en las ecuaciones de conservación (conservación de la masa, de cantidad de movimiento y de la energía) que gobiernan el movimiento de un fluido. Estas predicciones normalmente ocurren bajo unas condiciones dadas en términos de la geometría del flujo, las propiedades del fluido y las condiciones de contorno e iniciales de un campo fluido. Tales predicciones, normalmente comprenden un conjunto de valores para las variables del flujo, como, por ejemplo, la velocidad, la presión o la temperatura en determinados puntos del dominio computacional y para unos determinados instantes de tiempo. Estas predicciones también pueden suponer evaluaciones generales del comportamiento del flujo, como es el caso del flujo másico o la fuerza aerodinámica sobre un objeto expuesto al flujo.

Durante muchas décadas, se han desarrollado métodos numéricos para la simulación de flujos fluidos, lo que ha conllevado un amplio rango de aplicaciones. Entre estos métodos podemos encontrar el método de las diferencias finitas, el de los elementos finitos, el de los volúmenes finitos o métodos espectrales.

Conforme ha pasado el tiempo, la dinámica computacional de fluidos ha crecido en importancia y fiabilidad, sin embargo, sus predicciones nunca son completamente exactas. Debido la implicación de numerosas fuentes potenciales de error que pueden estar



involucradas, se han de extremar las precauciones al interpretar los resultados obtenidos mediante cálculos con *CFD*. Entre las fuentes más comunes de error podemos encontrar: error en la discretización, error en la introducción de datos, error en las condiciones iniciales o en las condiciones de contorno y error en el diseño del modelo.

3.3.2. MODELO CSD.

Similar al *CFD*, la dinámica computacional de estructuras, normalmente abreviado como *CSD*, es una rama de la dinámica estructural que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas de dinámica de sólidos que implican uno o varios cuerpos, incluyendo los rígidos y los flexibles con comportamiento lineal o no lineal. La base fundamental de las simulaciones *CSD* son las ecuaciones de Cauchy.

En las últimas cinco décadas se han propuesto una amplia variedad de métodos numéricos para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales con derivadas parciales en dinámica de sólidos. Entre estos métodos, se encuentra el método de los elementos finitos, que se ha establecido como el método estándar para problemas en mecánica computacional de sólidos (*CSM*), especialmente en relación con problemas de deformaciones que conllevan el análisis de un material no lineal. Este método, ha sido desarrollado a partir del método de las diferencias finitas y se ha establecido dentro del campo del *CSD*. Los dos tipos de métodos integran las ecuaciones que gobiernan el problema sobre unos volúmenes de control predefinidos, los cuales forman el dominio computacional. Además, ambos están clasificados como métodos residuales en cuanto al peso donde difieren en las funciones adoptadas para el cálculo del peso.

Por otro lado, además del modelado de fenómenos no lineales y del material en sólidos y mecánica estructural, en el *CSD* subyace el origen de la resolución de problemas multifísicos o de acoplamiento, como es el caso de la interacción fluido-estructura.



3.4. MÉTODOS DE ACOPLAMIENTO DE LOS MODELOS FLUIDO Y ESTRUCTURAL

Como ya se dijo previamente en la introducción de este TFG, la resolución de un problema que comprende dos sistemas físicos se aborda mediante el acoplamiento de dichos sistemas en uno. Esto, en nuestro caso, se llevará a cabo acoplando el módulo *Fluent* y *Transient Structural* de *ANSYS*, pudiendo hacerse de forma unidireccional (*one-way*) o bidireccional (*two-way*). A continuación, se presentan ambos métodos de análisis.

3.4.1. ANÁLISIS ONE-WAY.

En FSI, se dice que un análisis es *one-way* o unidireccional si el movimiento de un flujo fluido está afectado por la deformación de la estructura y viceversa. En este método de acoplamiento, el flujo fluido es calculado primero hasta alcanzar la convergencia deseada para después transferir y aplicar estos datos como cargas en el modelo estructural. De este modo se alcanzarán unos resultados para los desplazamientos o temperaturas en la interfase, no retornándose estos datos al modelo fluido. Los análisis *one-way* son apropiados cuando los diferenciales de los desplazamientos y de la temperatura calculados no son suficientemente grandes como para tener un impacto significativo en el análisis fluido.

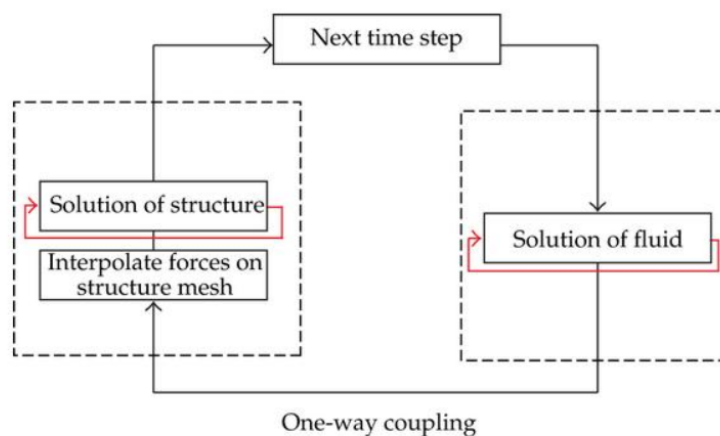


Figura 2. Análisis One-way



3.4.2. ANÁLISIS TWO-WAY.

En un análisis *two-way* o bidireccional, el flujo fluido está afectado por la deformación estructural y al mismo tiempo la deformación estructural está afectada por el flujo fluido. Aquí, las soluciones ya convergidas del flujo fluido afectan a la deformación del cuerpo sólido desde el primer instante de tiempo. Así, el resultado del cálculo del flujo fluido se interpola a la malla del modelo estructural en la interfase como en un análisis *one-way* y el resultado para el modelo estructural se obtiene a partir de la solución del flujo fluido considerando esto como las condiciones de contorno. De este modo, la malla de la estructura se desplaza y los valores del desplazamiento son interpolados a la malla del flujo fluido. El proceso se iterará hasta obtener la fiabilidad deseada en los cálculos.

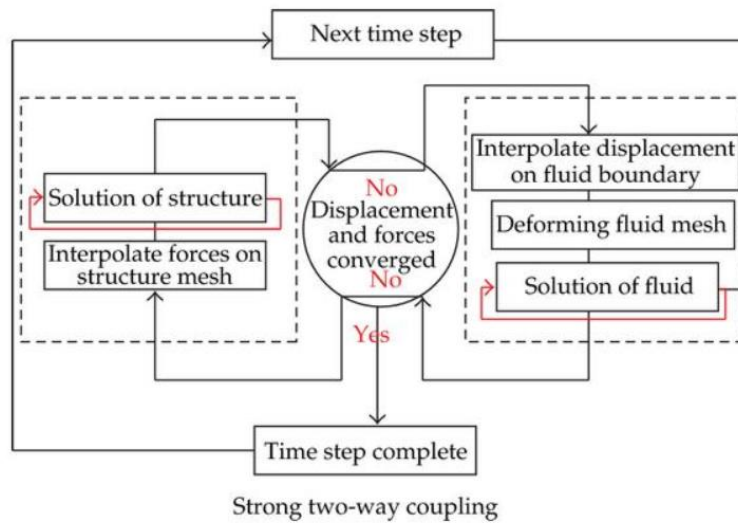


Figura 3. Análisis two-way



4. DOMINIO COMPUTACIONAL.

4.1. EL FENÓMENO TURBULENTO.

La turbulencia es un fenómeno que se inicia por inestabilidades causadas por los gradientes de velocidades medias. Estos gradientes, generan unos esfuerzos en el fluido llamados “Esfuerzos de Reynolds” que provocan la formación de vórtices. Los vórtices, en su movimiento, generan nuevas inestabilidades provocando, a su vez, vórtices más pequeños. Este proceso se va repitiendo hasta que los torbellinos tienen un tamaño lo suficientemente pequeño como para que el efecto viscoso del fluido tome importancia y se disipe la energía turbulenta en forma de calor. Este proceso (la generación continua de energía proveniente de grandes torbellinos y la transferencia de esta hacia vórtices cada vez menores hasta disiparse por fricción por el efecto de la viscosidad), es denominado “cascada de la intensidad turbulenta”.

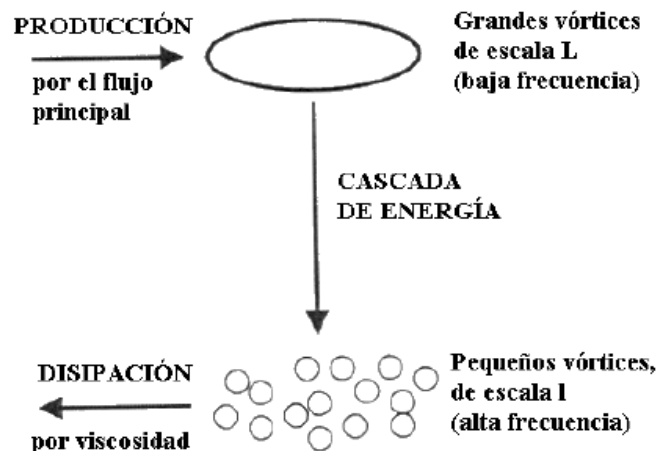


Figura 4. Cascada de energía turbulenta

4.1.1. MODELOS DE TURBULENCA.

Dar solución a las ecuaciones que rigen el comportamiento de un fluido en un flujo laminar o no viscoso es una tarea relativamente sencilla. Sin embargo, no es así en el caso de los flujos turbulentos, donde se encuentran problemas considerables a la hora de predecir su



comportamiento. Es por ello, que existen los modelos de turbulencia, que pueden ser descritos como un conjunto de relaciones y ecuaciones que sirven para predecir de forma aproximada el comportamiento de un flujo turbulento.

Los modelos de turbulencia pueden ser clasificados según su coste computacional asociado a y la precisión que obtienen en su empleo. Cuanto mayor sea el nivel de detalle en cuanto a la resolución de pequeños vórtices, más costosa será la simulación y, en consecuencia, mayor será el coste computacional. Asimismo, cuando baja el nivel de detalle, sólo se podrán capturar aquellos vórtices más grandes, lo que tiene un coste computacional menor, pero también menor precisión. Así, según el método de clasificación mencionado, los modelos de turbulencia se pueden ordenar de la siguiente manera:

- *DNS o Direct Numerical Simulation.* Este no es un modelo de turbulencia como tal, sino que consiste en resolver de forma completa las ecuaciones de Navier-Stokes. Es por ello, que este sistema resulta inabordable en problemas con números de Reynolds altos, dado que se necesitarían resolver todas las escalas del movimiento. Para ello, debe crearse previamente un número de elementos muy elevado, del que muchos autores hablan de que debe ser del orden de $Re^{9/4}$. Aun así, se tiene conocimiento de que ha habido algunos superordenadores con los que se han podido obtener resultados con este método para flujos simples.
- *LES o Large-Eddy Simulation.* En este modelo, los grandes torbellinos son calculados directamente mientras que los de más pequeña escala son modelados utilizando una escala de subgrid, lo que resulta en una reducción significativa del coste computacional comparado con el método *DNS*. *LES* es, por otro lado, más fiable que los modelos *RANS* (que se expondrán más adelante), ya que los vórtices más grandes contienen la mayor parte de la energía turbulenta que es responsable de la transmisión de la cantidad de movimiento y de la mezcla turbulenta del fluido.
- *DES o Detached Eddy Simulation.* Este método es un híbrido entre los modelos *RANS* y *LES* que combina los beneficios del modelo *LES* para resolver los grandes vórtices que están más alejados de las paredes del sólido, con los beneficios de los modelos *RANS*



en las zonas cercanas a las paredes donde los torbellinos son demasiado pequeños como para ser resueltos.

- *RANS* o *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*. La familia de los modelos *RANS* es la más amplia en el campo de los modelos de turbulencia. Estos modelos se centran en el cierre del sistema de ecuaciones del flujo turbulento usando términos viscosos. Una variable comúnmente calculada en estos modelos es k , o energía cinética de las fluctuaciones turbulentas por unidad de masa. Ya que el modelo de turbulencia que se usará en la resolución del problema de estudio de este TFG está dentro de esta familia, en el siguiente apartado se darán algunos detalles más acerca de la procedencia de estos modelos y cuáles son.

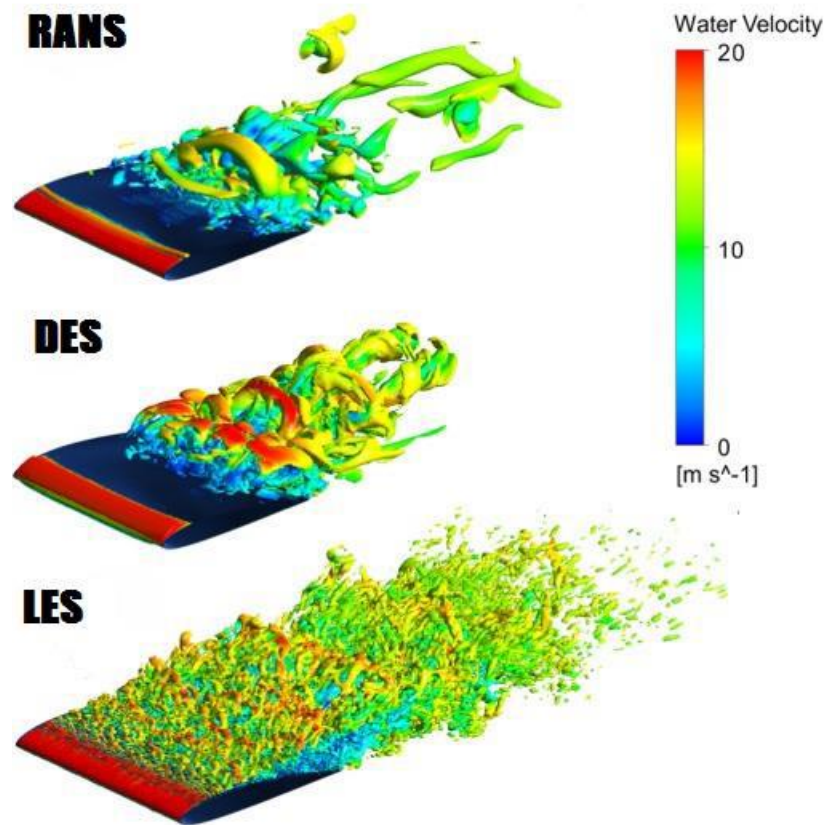


Figura 5. Nivel de detalle de los modelos de turbulencia



4.1.2. MODELOS DE TURBULENCIA RANS.

El modelo del promediado de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes o RANS es una aproximación propuesta por Reynolds en 1895 y está basada en descomponer las variables del flujo en una componente media y otra fluctuante. De este modo, lo que se obtiene no es más que una reformulación del sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, pero esta vez con unas variables medias y otras fluctuantes y con un término adicional desconocido que hace falta modelar.

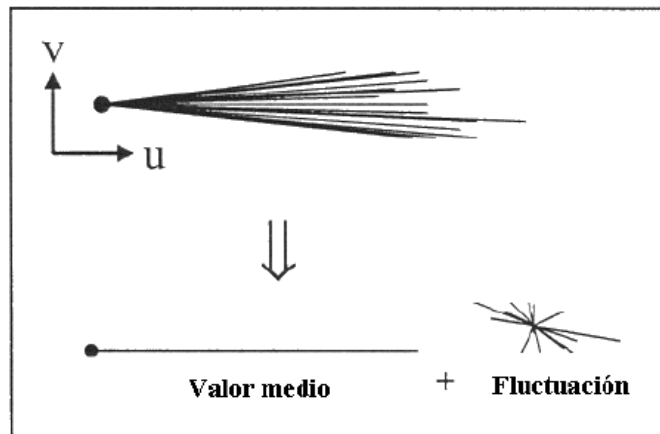


Figura 6. Promediado de Reynolds

Si el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible y densidad constante en forma diferencial es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} &= k \nabla^2 T \end{aligned}$$



Ahora aplicando el promediado de Reynolds en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento obtenemos:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

Podemos observar que las ecuaciones son prácticamente idénticas a excepción del término

$$\tau_{ij}^R = \overline{\rho u'_i u'_j}$$

, que es lo que se conoce como *tensor de esfuerzos de Reynolds* y representa la transferencia de cantidad de movimiento debido a las fluctuaciones turbulentas.

Entre los principales de turbulencia *RANS* (*Figura*) podemos encontrar los siguientes:

Spalart-Allmaras

Es un modelo de turbulencia de una ecuación que ha sido desarrollado específicamente para flujos aerodinámicos como flujos transónicos sobre perfiles aerodinámicos. Este modelo está basado en la viscosidad cinemática de vórtices y la longitud de mezcla. Esta longitud de mezcla define el transporte de la viscosidad turbulenta. Es un modelo popular debido a su robustez y su rápida implementación cuando se modelan flujos muy específicos. Además, Spalart-Allmaras tiene importantes ventajas en su utilización, ya que no tiene un coste computacional muy alto y su convergencia es buena. Un inconveniente que presenta este modelo es que no incluye funciones de pared.

k - ε. Standard, Realizable y RNG.

El modelo *k - ε* (*Standard*) es un modelo de dos ecuaciones, las cuales se resuelven para encontrar el valor de dos variables, la energía cinética turbulenta *k*, y la tasa de disipación de energía cinética *ε*. Este modelo usa funciones de pared para dar solución a la velocidad del



fluido en la subcapa viscosa cerca de la pared. Esta técnica ofrece buena convergencia y no tiene un coste computacional muy alto y es usada normalmente para flujos externos alrededor de geometrías complicadas, aunque también es una buena opción para otros casos en general.

Este modelo tiene dos variantes que introducen algunos cambios en él, estos son:

Realizable. Esta variación del modelo estándar es la recomendación por defecto en los paquetes de software comerciales de *CFD*. Es por ello, que representa el modelo más testado, mejor cuantificado y más ampliamente documentado. El modelo estándar queda mejorado para superficies planas, chorros alrededor de cuerpos y para la rotación, recirculación y curvatura de flujos.

RNG. Otra popular modificación es la “renormalización de grupo” o *RNG*. El modelo fue originalmente obtenido en el intento de buscar una solución para ϵ usando las ecuaciones de Navier-Stokes. El resultado fue mucho más parecido al de la ecuación original. Sin embargo, una actualización del método añadió un término a la ecuación de ϵ que da una solución para la distorsión media del flujo en la disipación turbulenta. Como resultado, *RNG* produce menos niveles de turbulencia y puede restarle importancia al término k .

k – ω . Standard y SST.

Es otro popular modelo de dos ecuaciones que empareja k con la tasa específica de disipación de la energía cinética, u omega (ω). El principal objetivo de este modelo es modelar las interacciones en las zonas adyacentes a las paredes de forma más fiable que el modelo $k - \epsilon$. Sin embargo, $k - \omega$ puede sobreestimar los esfuerzos de cizalladura provenientes de gradientes de contrapresiones en la capa límite y además también tiene dificultades con los flujos libres. Otra desventaja, sobre todo con respecto al modelo k - ϵ , es que es muy sensible a las condiciones de contorno en la entrada.

SST. Una variación del modelo k - ω que ha ganado popularidad, especialmente en el área de la aeronáutica y que será la que usemos para el cálculo del problema de estudio de este TFG, es el modelo *SST* o *Shear Stress Transport* (transporte del esfuerzo de cizalladura). Éste



presenta una potenciación del modelo original abordando algunas debilidades específicas del modelo base, como la sensibilidad a los niveles de turbulencia en flujo libre. El modelo *SST* tiene la ventaja de que puede ser aplicado a la zona afectada por la viscosidad sin una gran modificación, lo que representa una de las principales razones por las que se ha convertido en una elección muy popular donde el flujo es muy complicado para *Spalart-Allmaras*.

Reynold Stress Model (RSM)

El modelo del esfuerzo de Reynolds o *Reynold Stress Model*, es la representación física más completa de los flujos turbulentos. Es muy útil para nuevos retos en la resolución de flujos y es capaz de capturar fenómenos complejos como flujos en remolinos y flujos secundarios. Para flujos en remolinos, como son los ciclones, *RSM* es la única alternativa fiable. Este modelo trata de modelar el flujo usando directamente las ecuaciones *RANS*. Está basado en seis ecuaciones que representan los esfuerzos turbulentos. El modelo *RSM* predice el flujo de una forma bastante precisa, aunque a un coste computacional alto, por lo que su uso se reserva normalmente para flujos que son extremadamente complicados o que no han sido estudiados con anterioridad.

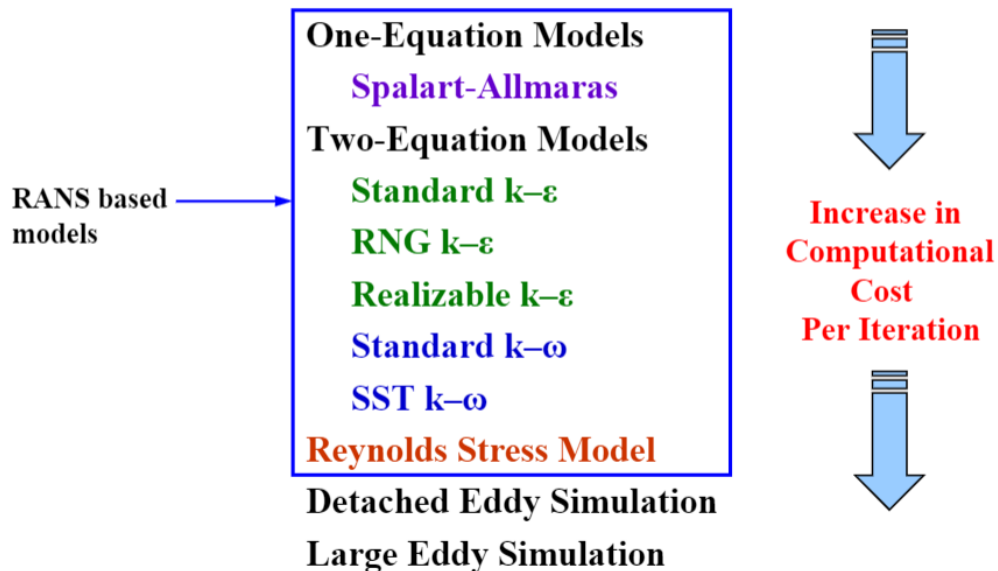


Figura 7. Coste computacional de los modelos de turbulencia



4.2. PARÁMETROS DEL ENTORNO COMPUTACIONAL

4.2.1. PARÁMETROS DE CÁLCULO.

A continuación, se procede a presentar algunos de los parámetros más significativos en el cálculo de un modelo computacional fluido.

***Y+* (Y plus)**

Es una medida de distancia adimensionalizada. Es usada normalmente para describir cómo de gruesa o fina debe ser la malla en las zonas adyacentes a una pared para un correcto funcionamiento de un modelo de turbulencia determinado. Se puede interpretar como un número de Reynolds local, lo que significa que con él se puede determinar la importancia relativa de los procesos turbulentos y viscosos en una determinada zona (adyacente a una pared sólida). Se calcula como:

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$$

donde u_τ es la velocidad de fricción, y es la distancia absoluta desde la pared y ν es la viscosidad cinemática.

Este parámetro es normalmente relacionado con la capa límite, ya que para el correcto cálculo una determinada subcapa capa límite mediante CFD, el valor de y^+ debe coincidir con el número de celdas adyacentes a la pared en dirección perpendicular. Es por ello que es importante tener claro hasta qué subcapa de la capa límite el modelo de turbulencia con el que estamos calculando el flujo la calculará de forma directa y a partir de qué punto empezará a calcularla de forma modelizada.

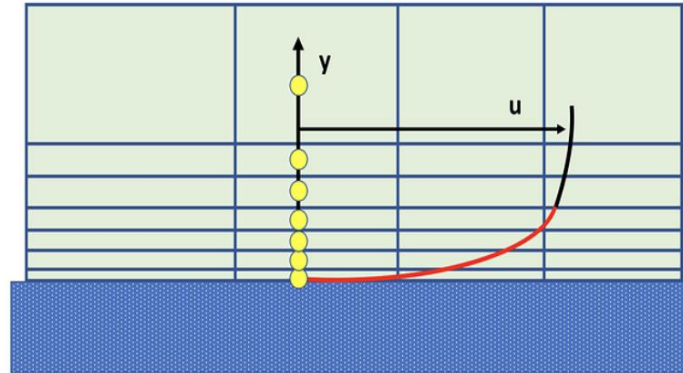


Figura 8. Influencia de y^+ en la capa límite

Los valores de y^+ están entre los siguientes rangos en función de la capa en la que nos encontremos:

- Subcapa viscosa: $y^+ < 5$
- Capa de amortiguamiento: $5 < y^+ < 30$
- Capa logarítmica: $y^+ > 30$

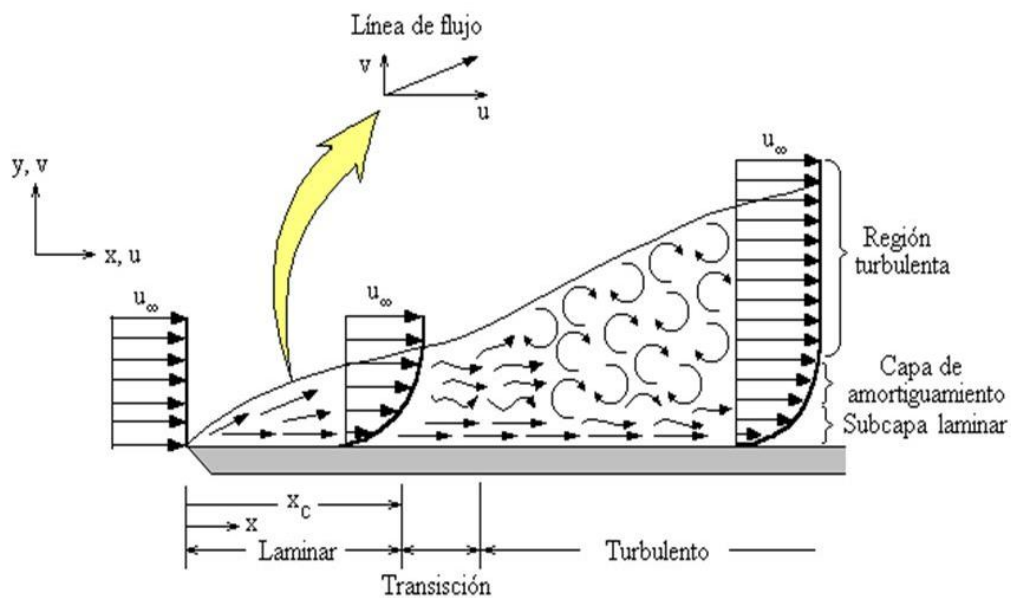


Figura 9. Esquema de la capa límite



Skin Friction Factor

Está generado por las componentes de la tracción producida por los esfuerzos de cizalladura que actúan en la superficie de un cuerpo. Esta tracción es directamente proporcional a la viscosidad y actúa tangencialmente en todos los puntos de la superficie del cuerpo. En cada uno de esos puntos, existe una componente alineada con el flujo, pero de sentido contrario al flujo principal. El efecto total de todas ellas, integrado para toda la superficie expuesta es el coeficiente o factor de fricción. Este factor representa a su vez una de las componentes del *drag* o arrastre de un cuerpo sometido a un flujo. Se calcula según las siguientes ecuaciones en función del número de Reynolds:

$$C_{f,x} \cong \frac{0,059}{(Re)^{1/5}} \quad 5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$$

$$C_{f,x} \cong \frac{0,664}{\sqrt{Re}} \quad Re \leq 5 \times 10^5$$

Wall Shear Stress

El esfuerzo cortante en la pared o *Wall Shear Stress* es el esfuerzo de cizalladura en la capa de fluido adyacente a la pared de un cuerpo sometido a un flujo. Cuando sobre un sólido se hace circular un flujo fluido, la velocidad del flujo no es la misma en todos los puntos en los alrededores del cuerpo, ya que esta es menor en las zonas cercanas a sus paredes. En estas zonas anexas a las paredes, el fluido toma un perfil parabólico de velocidades, el cual es el resultado de la fricción (debida a la viscosidad del fluido) entre las propias capas del fluido y entre el fluido y la pared del sólido. Esta fricción genera un esfuerzo tangencial ejercido por el fluido sobre el sólido, que es a lo que llamamos *Wall Shear Stress*.

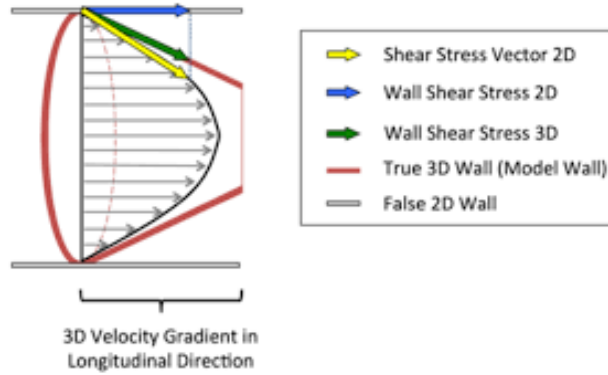


Figura 10. Esfuerzo cortante en la pared

Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es un número adimensional de la mecánica de fluidos cuyo papel es prominente en los patrones de comportamiento de un fluido. El número de Reynolds, abreviado como Re es usado para determinar si un flujo es laminar o turbulento. Es uno de los principales parámetros de control en todos los flujos viscosos donde se selecciona un modelo numérico de acuerdo con un número de Reynolds precalculado.

Aunque este número comprende ambas, propiedades estáticas y dinámicas de los fluidos, es normalmente especificado como una propiedad fluida cuando se estudian condiciones dinámicas. Técnicamente hablando, el número de Reynolds es la ratio de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Si las fuerzas inerciales son dominantes, el flujo será turbulento y si las dominantes son las viscosas, entonces el flujo será laminar.

$$Re = \frac{\textit{inertial force}}{\textit{viscous force}} = \frac{\textit{fluid and flow properties}}{\textit{fluid properties}}$$

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

donde ρ es la densidad del fluido, u es la velocidad del fluido, L es la longitud característica del cuerpo y μ es la viscosidad dinámica del fluido.



4.2.2. PARÁMETROS DE MALLADO.

Es importante crear una buena malla para el modelo en estudio cuando se trabaja con un software de elementos finitos. Si la malla no es adecuada para el modelo de cálculo escogido puede que los cálculos no sean fructuosos o que los resultados obtenidos no sean fiables. Es por ello, que en este apartado se van a comentar algunos de los parámetros más influyentes en la calidad de una malla.

Skewness

La asimetría o también llamada *skewness*, es un indicador de adaptabilidad y calidad en la malla. Un *skewness* alto compromete la fiabilidad de las regiones interpoladas en el cálculo. Hay tres métodos básicos de evaluación de este parámetro:

- Basado en el volumen de un tetraedro, para el caso 3D, o en el área de un triángulo equilátero, para el caso 2D.

$$\text{Skewness} = \frac{\text{optimal cell size} - \text{cell size}}{\text{optimal cell size}}$$



Figura 11. Volume-based skewness

- Basado en la desviación respecto del ángulo ideal de un cuerpo. Este método puede ser utilizado en celdas de cualquier forma. Un ejemplo sería el de un cuadrilátero, cuyos ángulos se compararían con los de un cuadrado para determinar el *skewness*.


$$\text{Skewness (for a quad)} = \max \left[\frac{\theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{min}}{90} \right]$$



- Basado en la igualdad de entre los ángulos de una celda.

$$\text{Equiangle Skew} = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

Así, en la escala de *skewness* (Figura) 0 es el mejor valor posible y 1 el peor, no siendo recomendable que el valor medio este parámetro en una malla supere 0.9, ya que se pueden encontrar problemas de convergencia en tal caso.




Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Tabla 1. Skewness level

Orthogonal Quality

La calidad ortogonal u *ortogonal quality* está relacionada con el ángulo entre el vector que une los centroides de dos elementos y el vector normal de la cara de cada elemento. En este caso la escala para este parámetro tiene como peor valor el 0 y como mejor el 1. Esta vez, una calidad ortogonal por debajo de 0.001 en una malla hará que tengamos problemas de convergencia casi con total seguridad.



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Tabla 2. Orthogonal quality level

Aspect Ratio

Es la ratio del lado más largo de una celda entre el más corto. Idealmente debe ser igual a 1 para asegurar los mejores resultados. Para flujo multidimensional, debe estar cercano a 1. Tener un alto *aspect ratio* puede conllevar a un error de interpolación de inaceptable magnitud.



5. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.

5.1. CREACIÓN DEL MODELO 3D EN CATIA V5

Para la creación del modelo 3D que se va a usar en el análisis modal, se optado por el software de diseño *Catia V5*, ya que es mucho más potente y sobre todo más ágil en su uso que el creador de geometrías *Design Modeler* de *ANSYS*.

Para crear la geometría en primer lugar seleccionamos *Part Design* desde el menú *Start*.

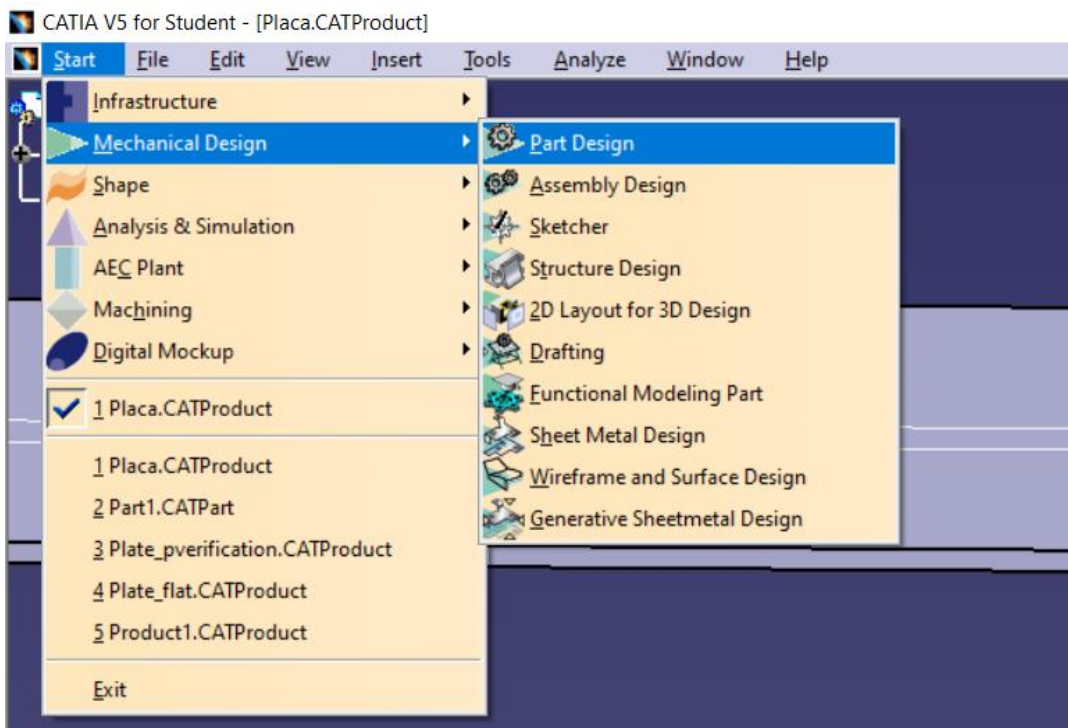


Imagen 1. Catia. Part Design



A continuación, seleccionamos un plano para hacer un y seleccionamos la opción *Sketch* en la barra de la derecha de la pantalla para dibujar el perfil de la placa, el cual extruiremos más tarde.

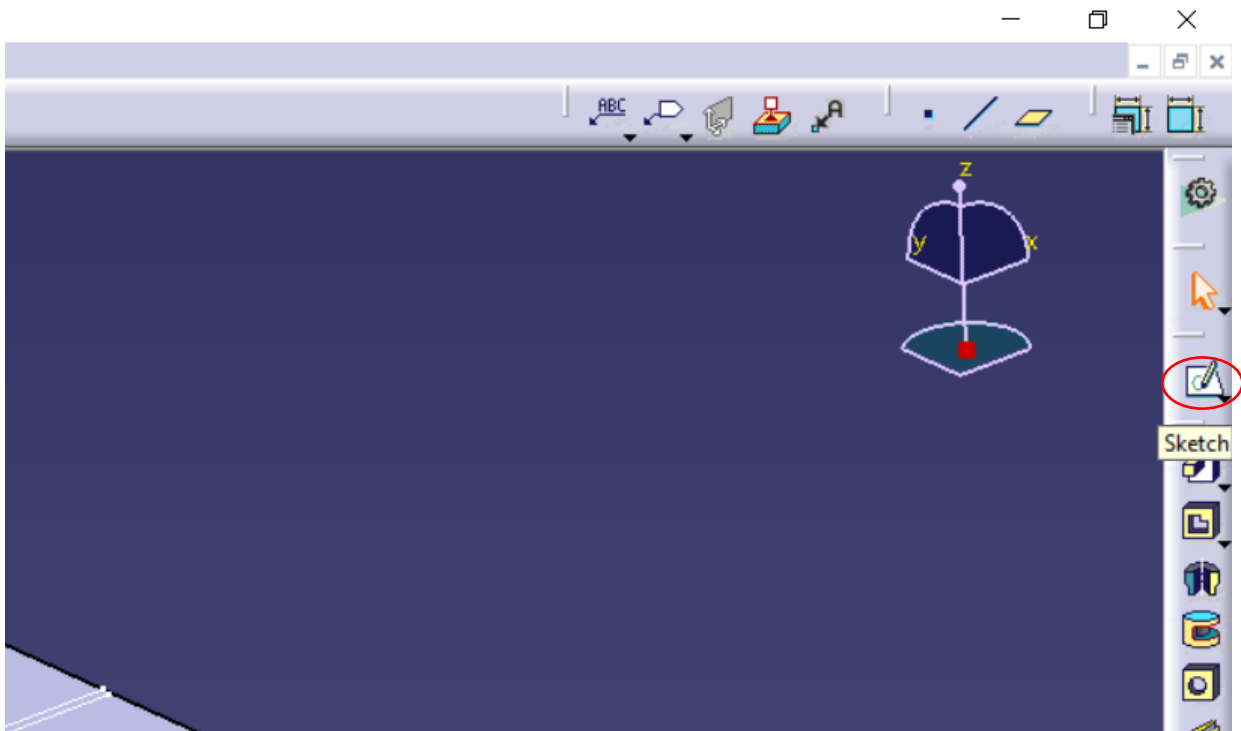


Imagen 2. Sketch mode

Una vez dentro del modo *Sketch*, seleccionamos el comando polilínea para dibujar la forma de la placa de modo manual. En este punto sólo nos interesa dibujar la forma, ya que las medidas y las restricciones de la geometría se definirán después.

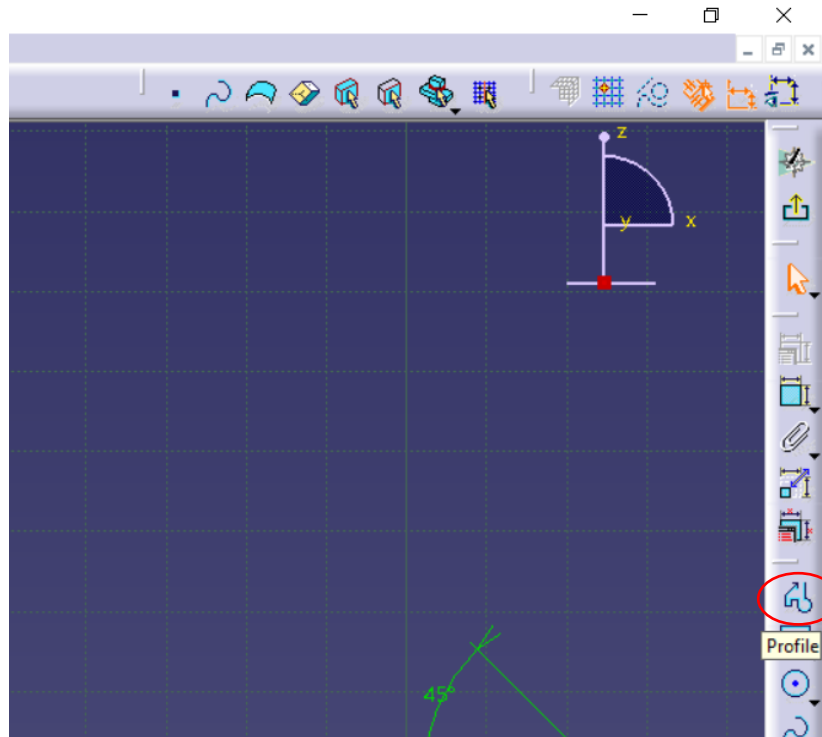


Imagen 3. Insertar polilínea

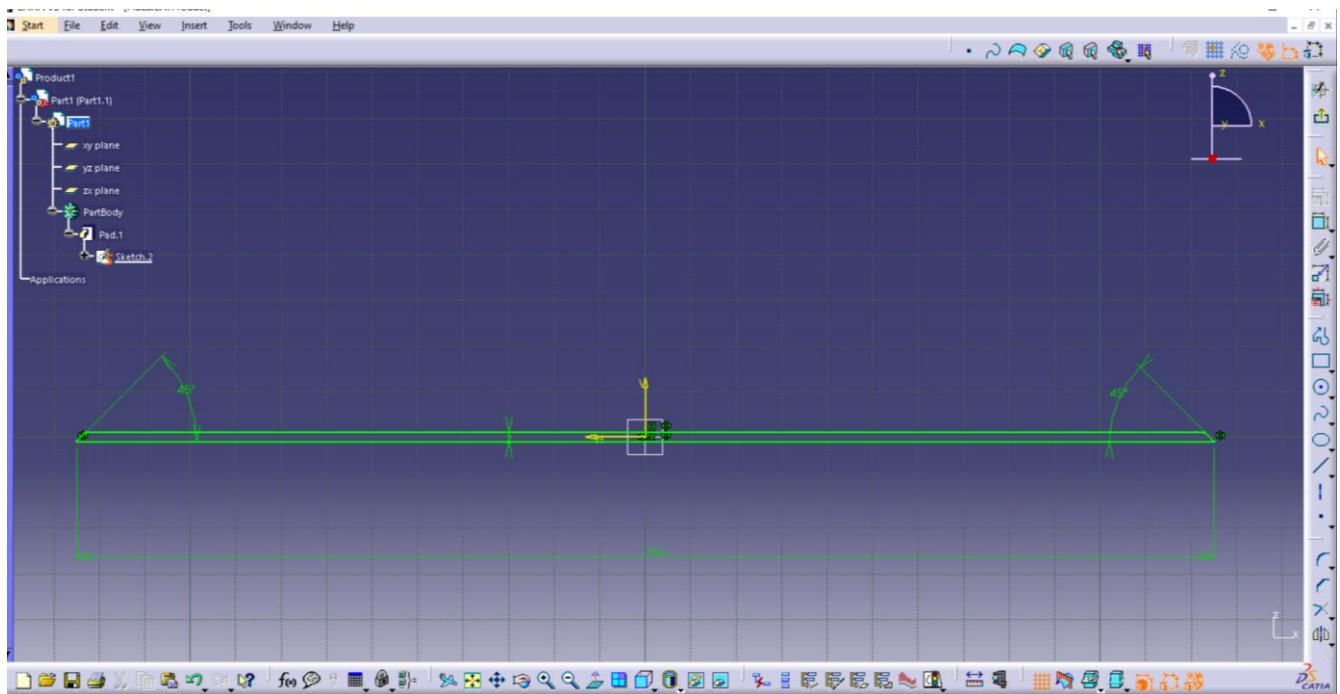


Imagen 4. Dibujo perfil de la placa



Una vez dibujado ya, pasamos a colocarle las medidas y las restricciones de ubicación respecto al origen de coordenadas para que el *sketch* quede completamente definido (muy importante), ya que si no es así podemos tener problemas al realizar operaciones 3D con él más tarde. Para restringir el dibujo respecto al origen, primero seleccionamos los dos puntos de los extremos del perfil y el eje vertical para establecer una relación de simetría de estos dos puntos respecto de él. Después seleccionamos la opción *symmetry* dentro del comando *constraint dialog box*.

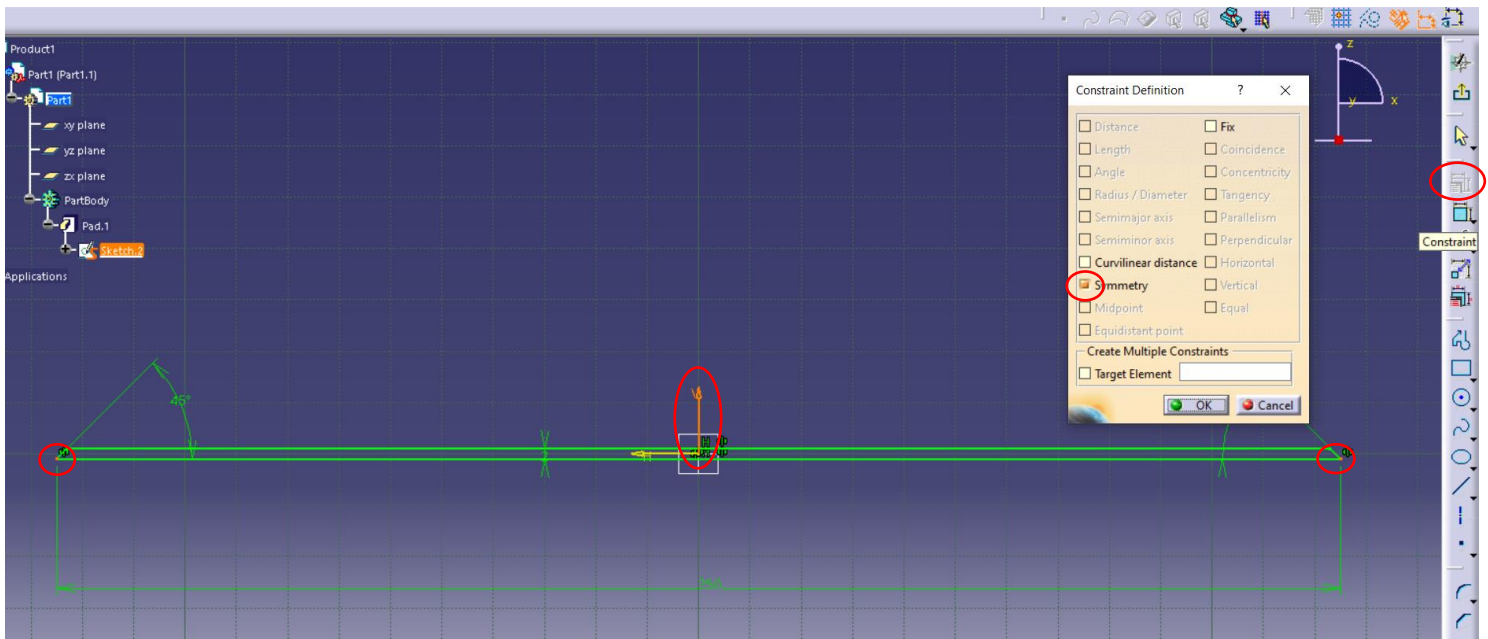


Imagen 5. Restricción de simetría

Ya con la relación de simetría establecida de estos dos puntos, hacemos lo mismo pero esta vez para las dos líneas horizontales del perfil y estableciendo la simetría respecto del eje horizontal. Hecho esto nuestro dibujo ya queda restringido respecto al origen y no podremos moverlo por el espacio.



Ahora, para establecer las medidas de los ángulos de los bordes y de las aristas, usaremos el comando *constraint*. Una vez seleccionado este comando, pincharemos sobre el elemento o elementos que queremos acotar y acto seguido seleccionamos la cota que hemos creado para ponerle la medida que queremos.

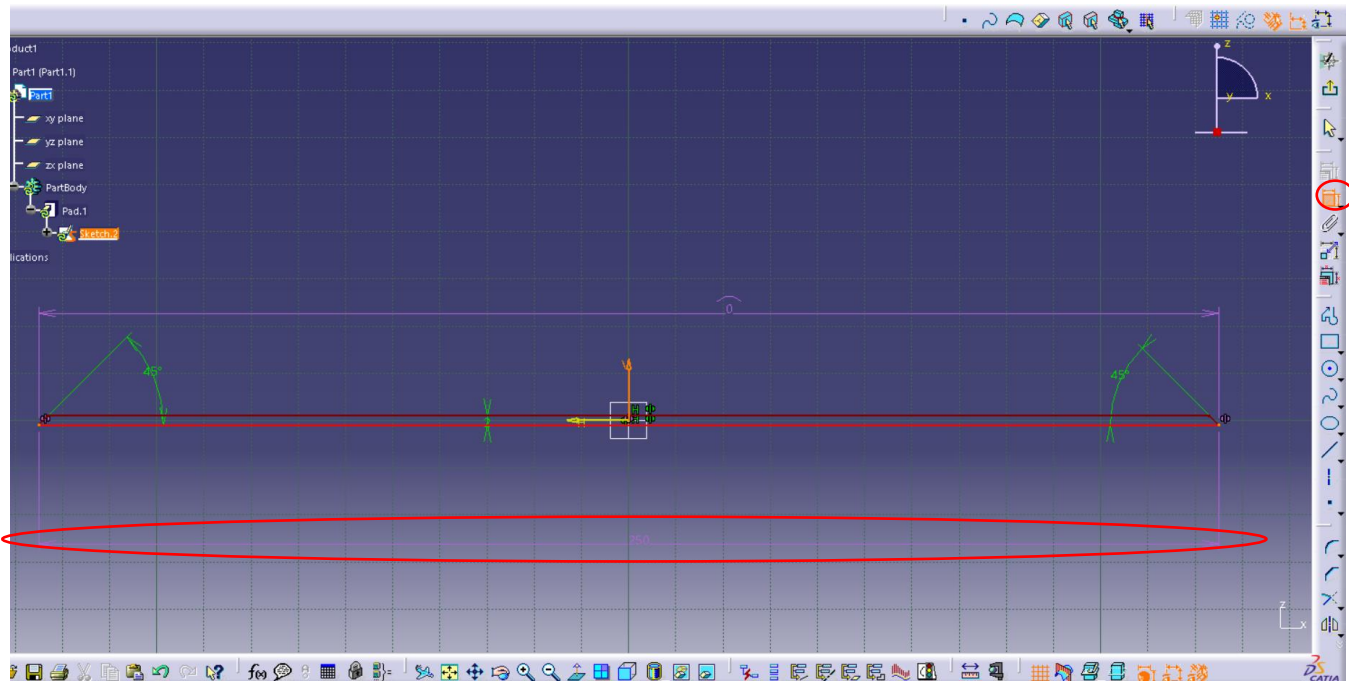


Imagen 6. Cotas

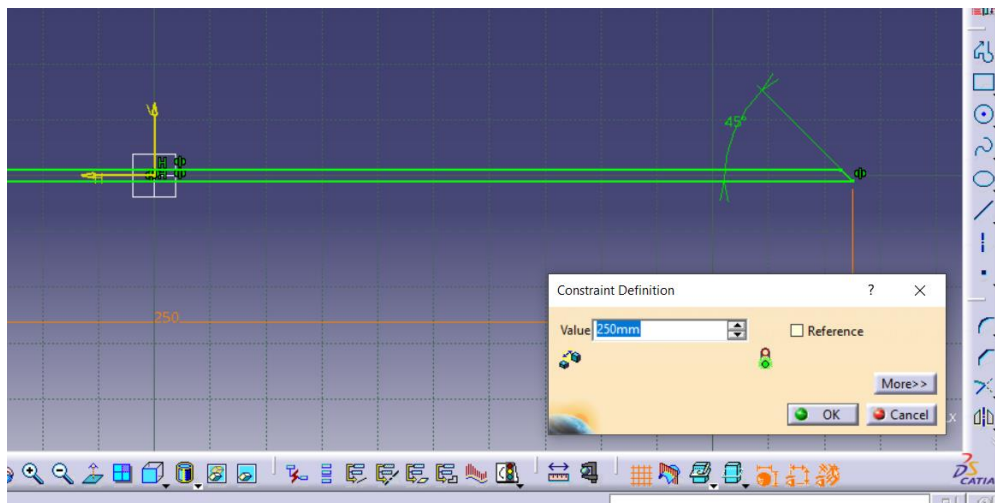


Imagen 7. Valor cotas



Por último, salimos del modo *sketch* y seleccionamos extruir o *pad*. Para extruir, vamos a hacerlo de forma simétrica seleccionando *mirror extent*, para que la pieza final quede centrada en el origen de coordenadas.

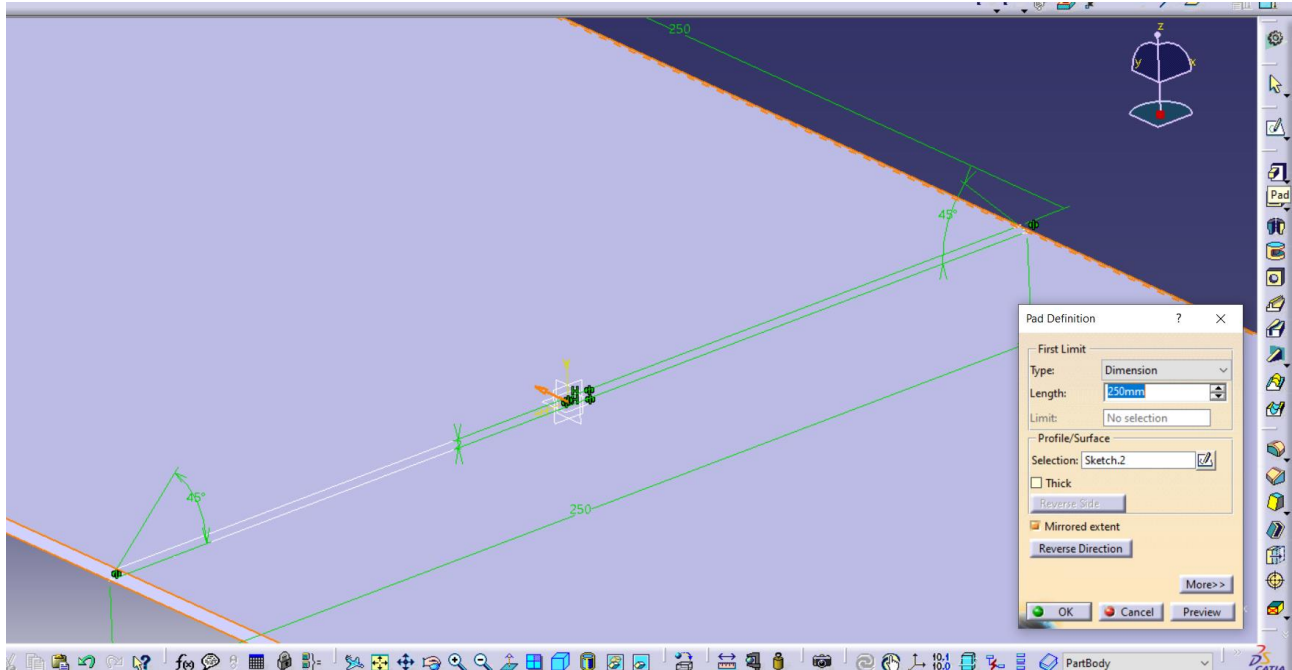


Imagen 8. Extrusión del sketch

Hecho esto solo queda guardar el archivo seleccionando *Save All*, para su posterior uso.

Como resultado tenemos una placa de 250mm de cuerda, 500mm de anchura y 2mm de espesor con bordes afilados a 45°.



5.2. ANÁLISIS MODAL.

La frecuencia natural de vibración un sólido elástico es aquella frecuencia a la que vibrará después de que se le altera (fuente excitadora) de su posición de equilibrio. Así, un cuerpo podrá tener varias frecuencias naturales en función del modo en que vibre. A estos modos se les denomina modos naturales de vibración, pudiendo un mismo cuerpo tener varios, tantos como grados de libertad tenga éste.

De esta forma, si un cuerpo es excitado de un modo concreto y de forma continua para vibrar a una frecuencia determinada, puede ocurrir que esta frecuencia coincida con la frecuencia natural de ese modo de vibración y ambas vibraciones se acoplen, entrando el cuerpo en resonancia. Esto quiere decir que las ondas de vibración natural y forzada se superpondrían teniendo como resultado una vibración de mayor amplitud.

Este fenómeno es muy interesante que debe tenerse en cuenta a la hora del diseño, pero que también puede utilizarse como una ventaja en un sistema de generación de energía mediante vibraciones. Es por esto, que el caso de estudio de una paca expuesta a los efectos del viento, que además se pretende usar para un posible aprovechamiento energético, requiere que se comprueben cuáles son estos modos naturales de vibración y cuáles son sus correspondientes frecuencias. Para ello, se ha de realizar un análisis modal, por lo que en este apartado se va a proceder con dicho análisis mediante el software ANSYS.

Para la realización de este análisis disponemos del módulo *Modal*, que podemos seleccionar en el *Workbench* arrastrándolo hacia el *Project Schematic*.

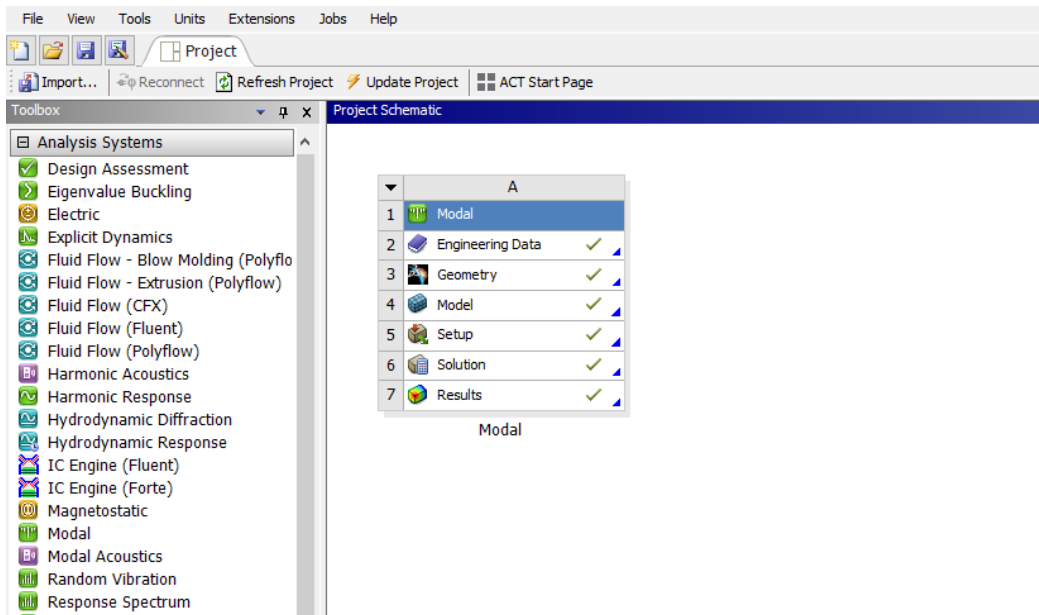


Imagen 9. Workbench. Modal.

En primer lugar, en el apartado *engineering data* debemos asegurarnos de que los datos del material de nuestra placa están incluidos entre los datos ya importados de la base de datos del programa para, si no es así, importarlos.

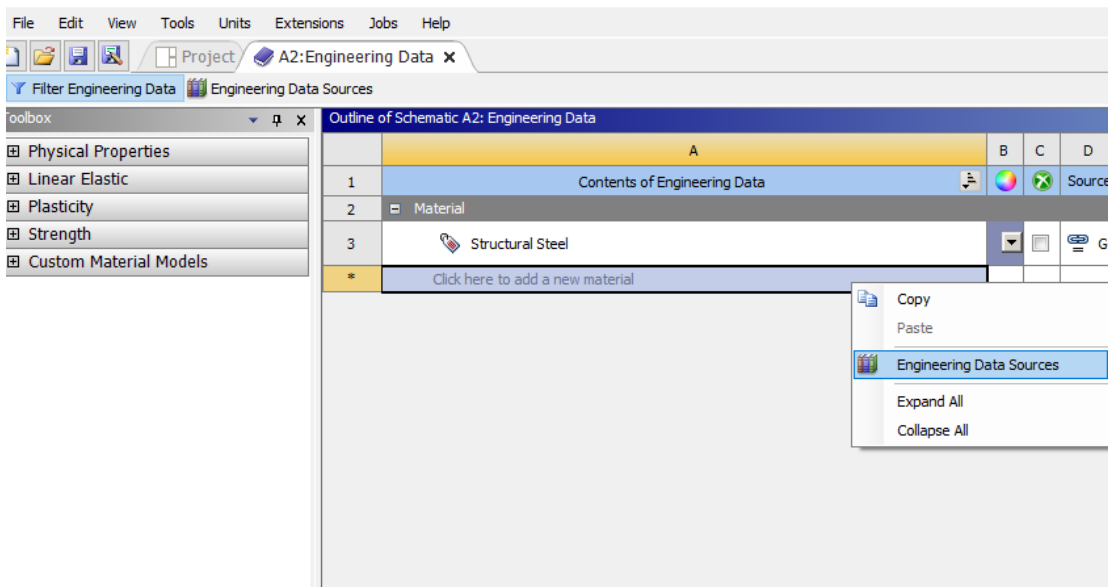


Imagen 10. Engineering Data



Hacemos clic derecho donde dice *Click here to add a new material* para añadir el material que queremos importar y, a continuación, seleccionamos arriba la lista *General Materials*. Después, clicamos sobre el símbolo “+” del material que queramos añadir a nuestro proyecto, en este caso, *Copper Alloy* o aleación de cobre.

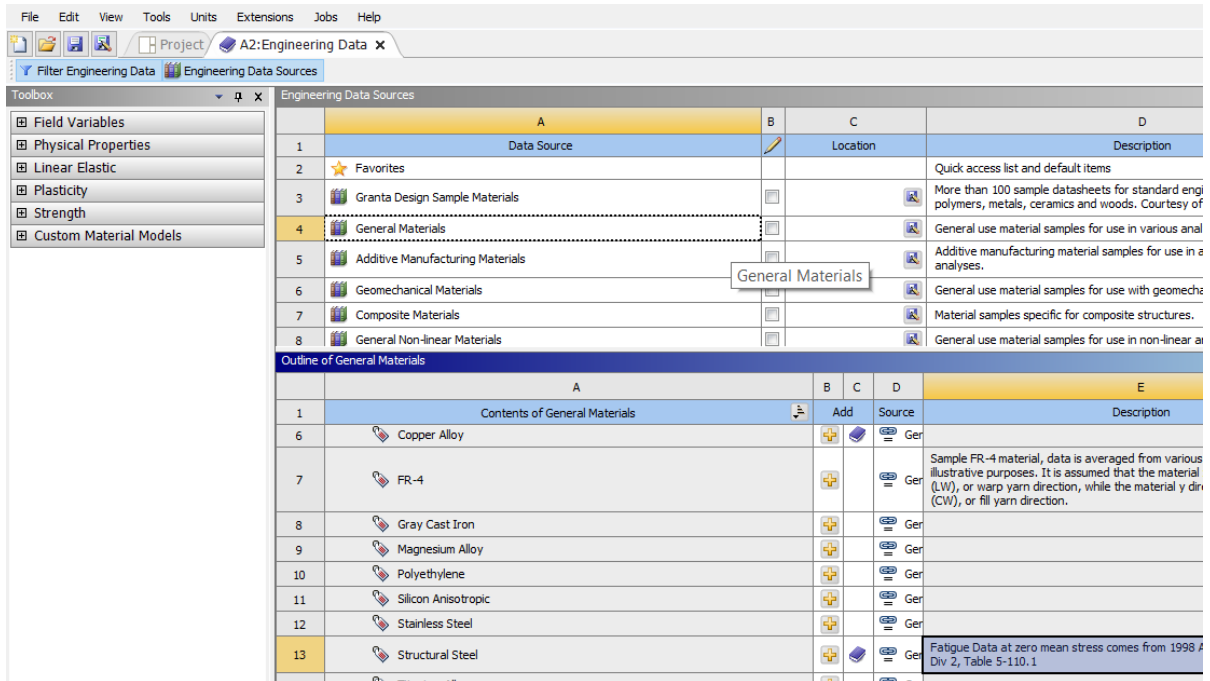
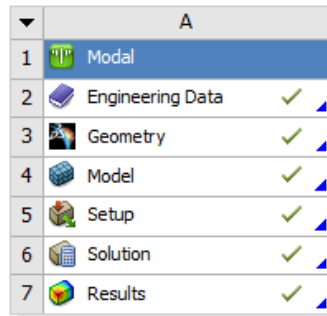


Imagen 11. Biblioteca de materiales

Una vez hecho esto, importamos la geometría anteriormente creada en *Catia V5* haciendo clic derecho en *Geometry* y seleccionando *Import*.



Modal

Imagen 12. Módulo Modal



Ahora ya podemos entrar al apartado *Model* para configurar el modelo haciendo doble clic. Ya dentro de este apartado, comenzamos a ajustar los parámetros necesarios para ejecutar el análisis.

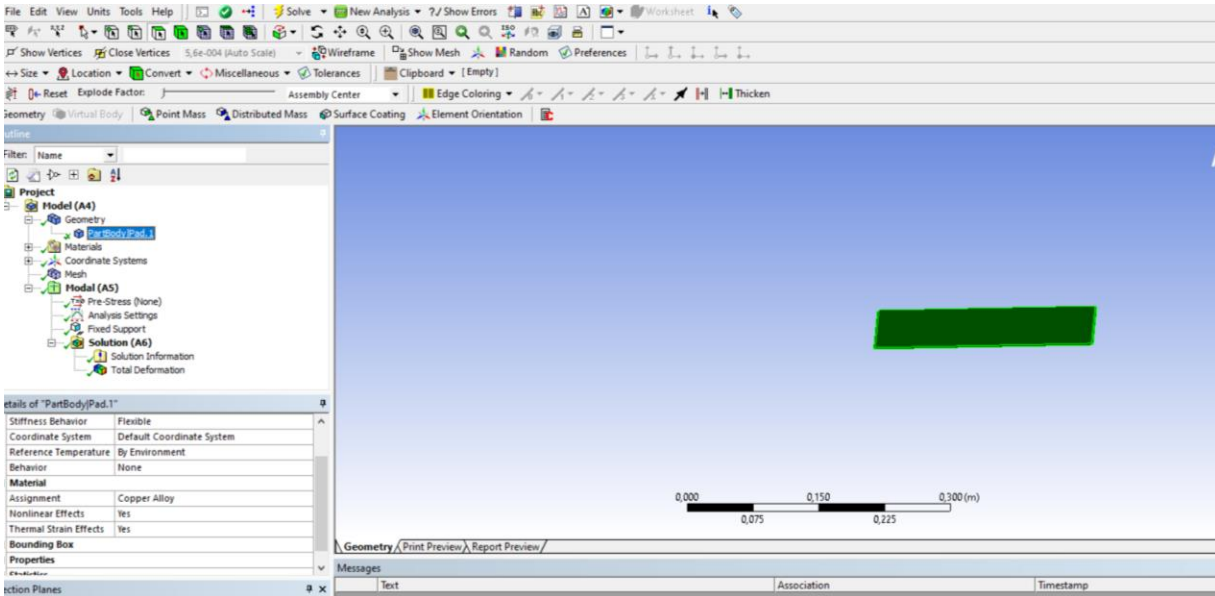


Imagen 13. Interfaz Modal

Cuando se abre la venta podemos ver que aparece nuestra placa a la izquierda y que en la derecha hay un árbol de componentes, los cuales tienen un menú que podremos ver debajo del árbol si pinchamos en uno de ellos. Entre ellos, desplegamos *Geometry* y seleccionamos *PartBody* que es el nombre del archivo que contenía nuestra placa y que habíamos importado anteriormente. En el menú de esta opción, lo que haremos será seleccionar el material que nos interesa y que habíamos importado también antes desde la biblioteca, en este caso *Copper Alloy*. Para seleccionarlo, vamos al apartado *Assignment* y pinchamos en el cuadro de su derecha donde viene por defecto el acero para seleccionar el material que queremos.

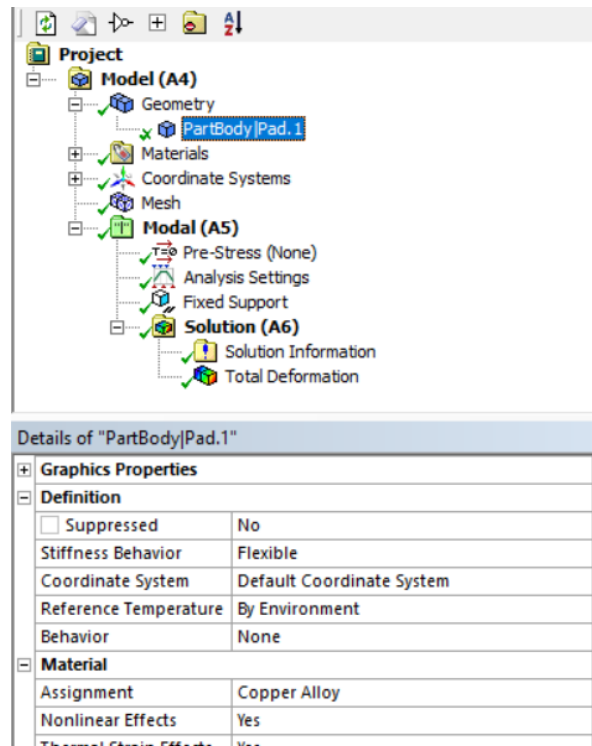


Imagen 15. Selección de material

Ahora nos vamos al apartado de *Mesh*, desplegamos *Sizing* y en *Resolution* elegimos 7. Esto es una forma de mallado automático adaptándose a la forma del cuerpo, de modo que 7 es el modo de resolución que va a crear los elementos más pequeños para un posterior cálculo más preciso.

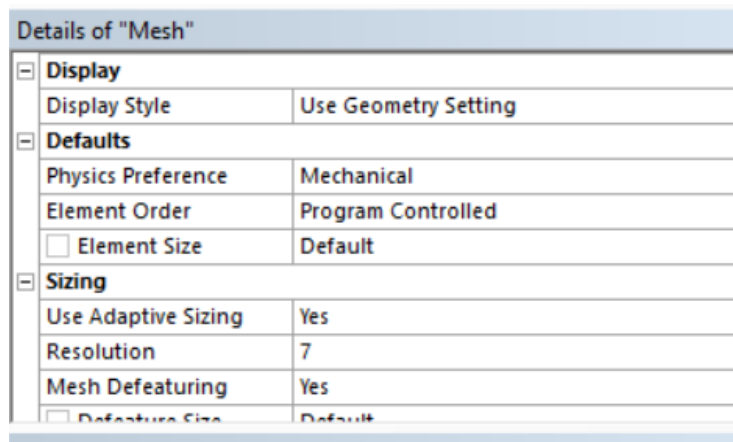


Imagen 14. Mesh resolution



Para crear la malla pinchamos en *Update*, que aparece sobre el árbol de componentes, y obtenemos una malla como la siguiente:

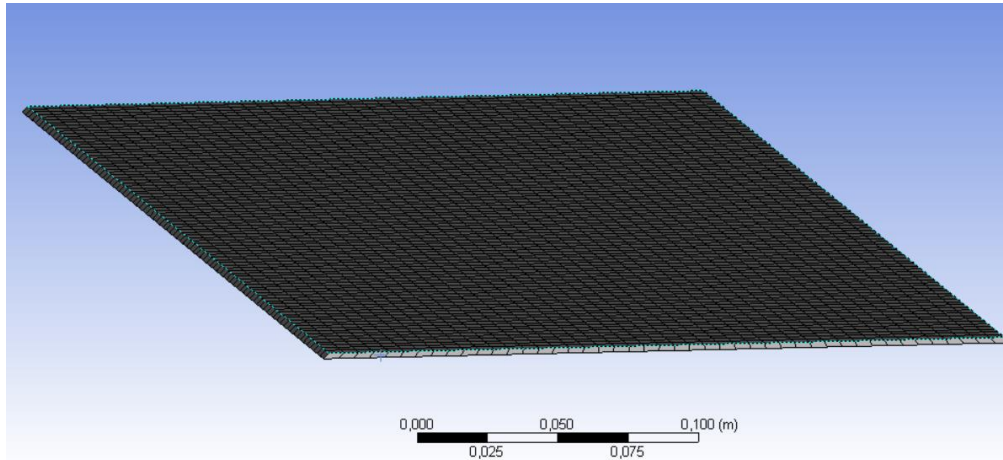


Imagen 16. Malla análisis modal

El siguiente paso es por dónde estará fijada nuestra placa para el análisis modal, para ello vamos al componente *Modal* en el árbol y hacemos clic derecho para insertar el soporte.

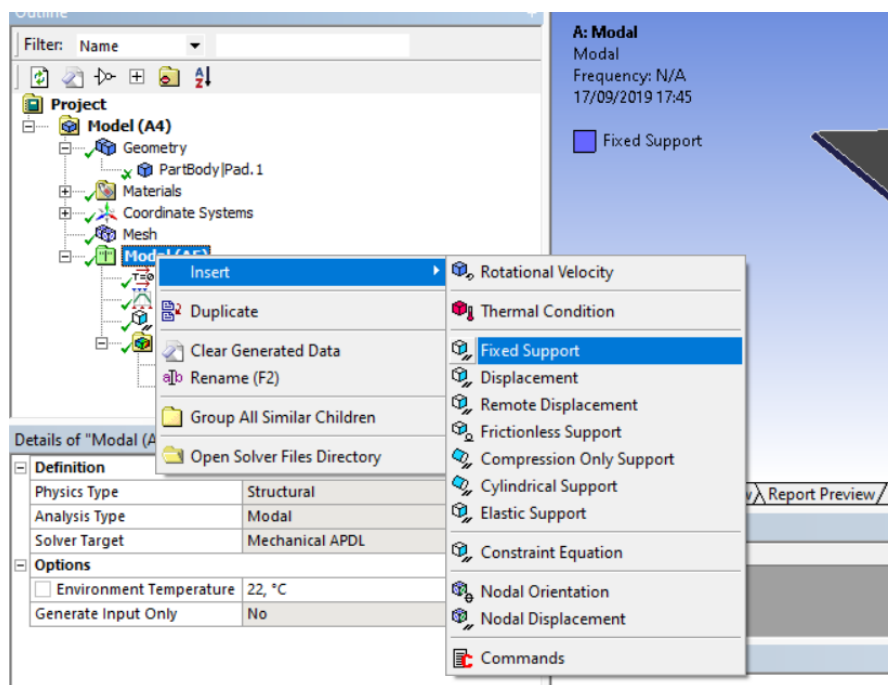


Imagen 17. Fixed support



Una vez nos aparece en el árbol *Fixed Support*, vamos a su menú y en *Scoping Method* seleccionamos *Geometry Selection*. Ahora en el apartado *Geometry* seleccionamos la cara o la arista por donde queramos sujetar la placa ayudándonos del comando “tipo de selección”, que nos permitirá seleccionar cuerpos, caras, aristas o puntos. En nuestro caso, hemos sujetado la placa por la cara del canto afilado izquierdo, que podemos ver que aparece indicada con una etiqueta azul sobre ella.



Imagen 18. Tipo de selección

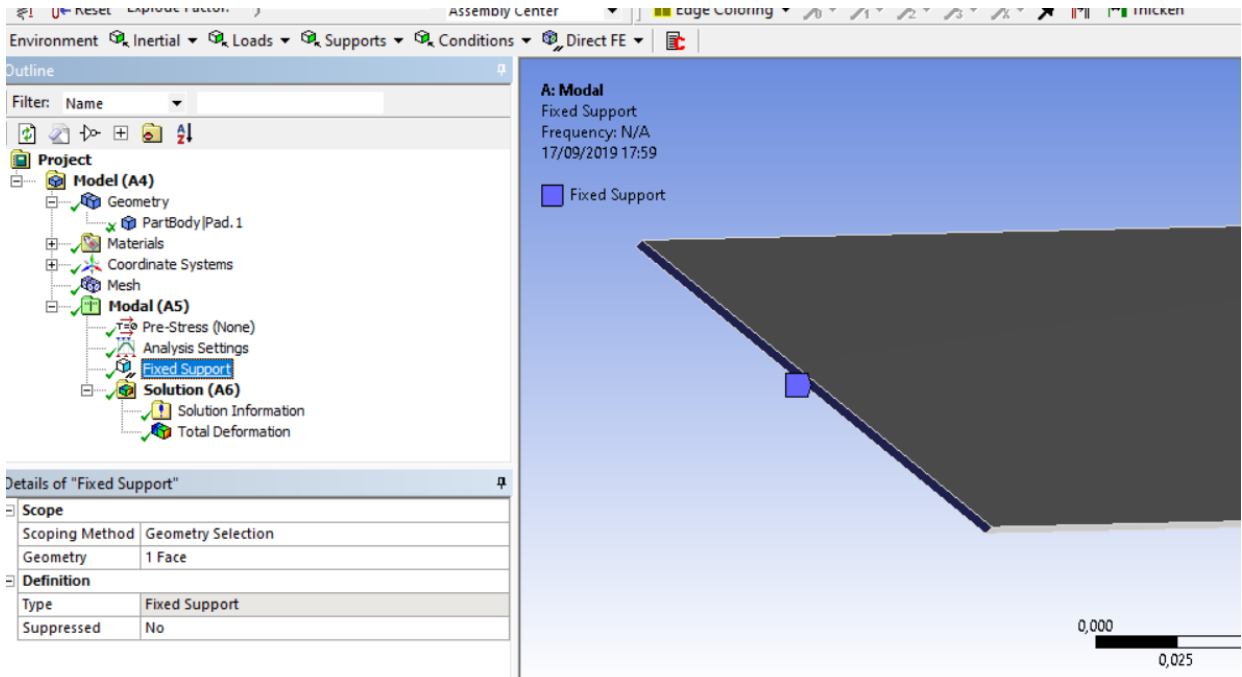


Imagen 19. Soporte fijo cara



El siguiente paso es crear un informe sobre la deformación, para que al realizar el análisis podamos saber como se deforma la placa en un determinado modo natural de vibración. Para ello, hacemos clic derecho sobre *Solution* e insertamos *Total deformation*.

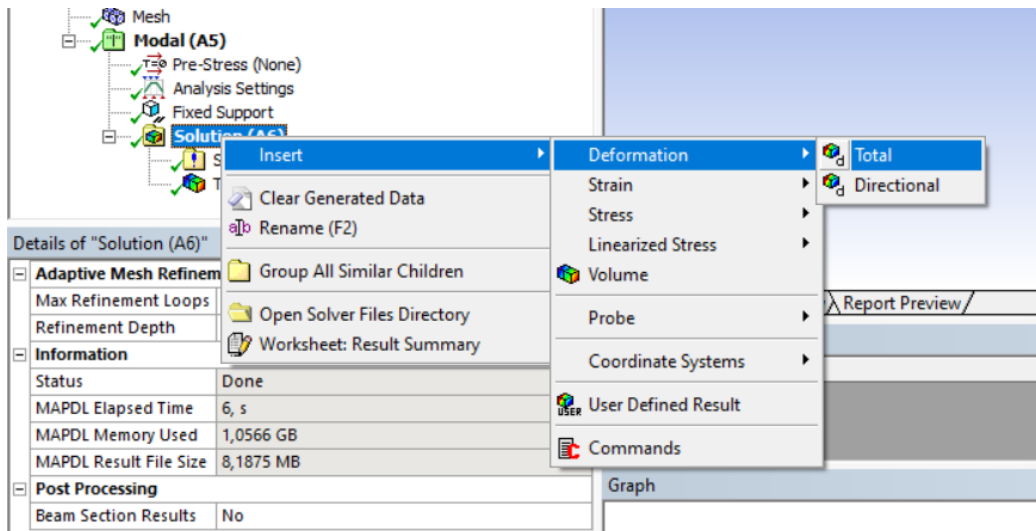


Imagen 20. Total deformation

Ya creado el apartado *Total deformation*, en su menú podremos seleccionar la deformación del modo natural de vibración que queremos represente. En el caso de nuestra placa, teníamos disponibles hasta 6 modos. Ya seleccionado el modo que queremos ver, hacemos clic en *Solve* para ejecutar el análisis. Cabe mencionar que, para ver los demás modos de vibración, hay que cambiar el número de modo en el menú de *Total deformation* y volver a ejecutar.

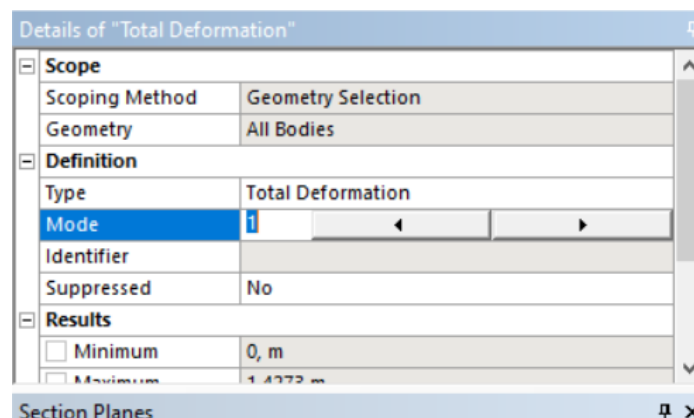


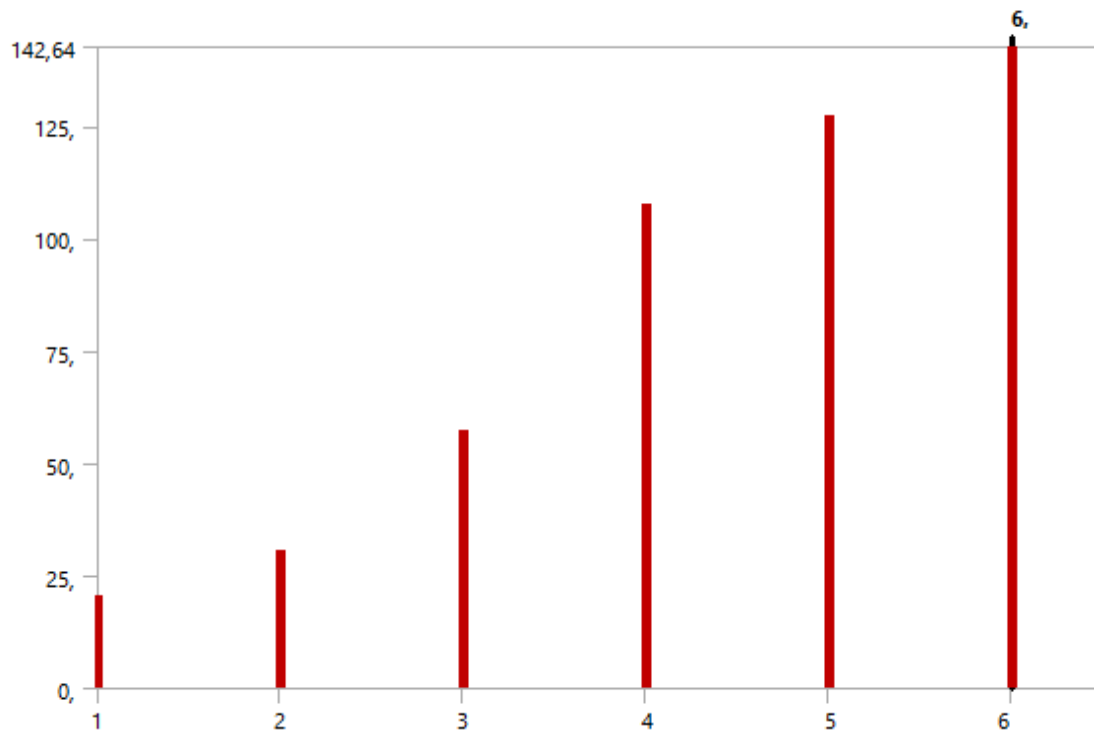
Imagen 21. Deformation mode



Los resultados obtenidos para las frecuencias naturales de vibración de nuestra placa según el modo son los siguientes:

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	20,364
2	2,	30,48
3	3,	57,474
4	4,	107,47
5	5,	127,13
6	6,	142,64

Tabla 3. Frecuencias naturales de vibración



Gráfica 1. Frecuencias de vibración



Y los modos naturales de vibración:

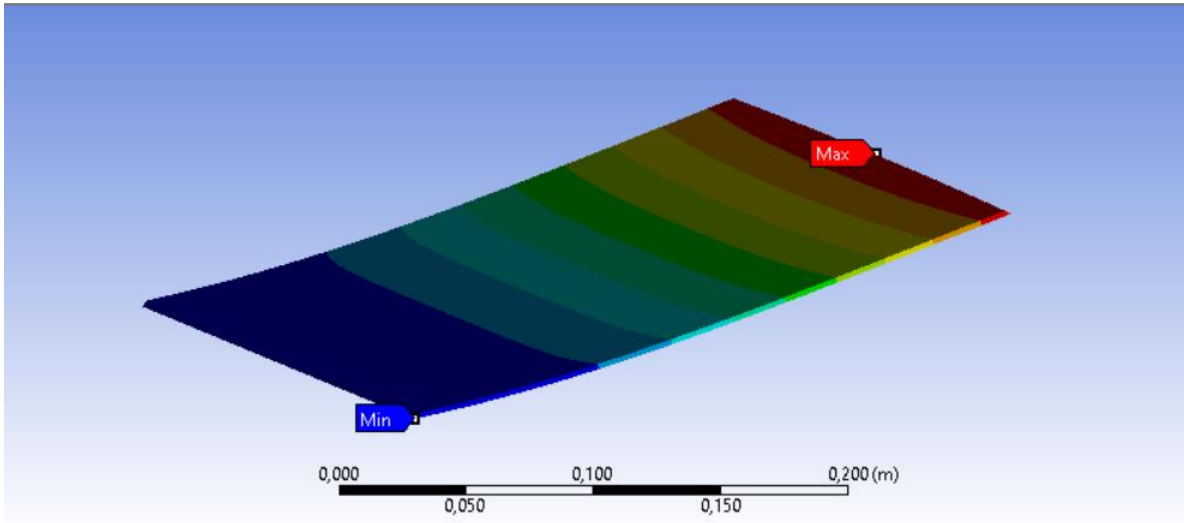


Imagen 22. Modo natural de vibración 1

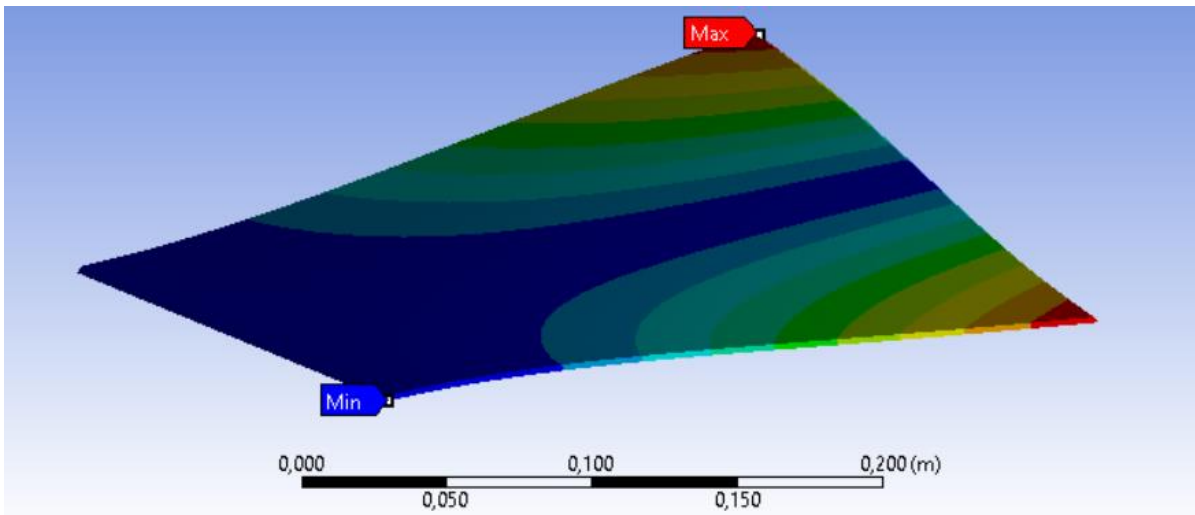


Imagen 23. Modo natural de vibración 2

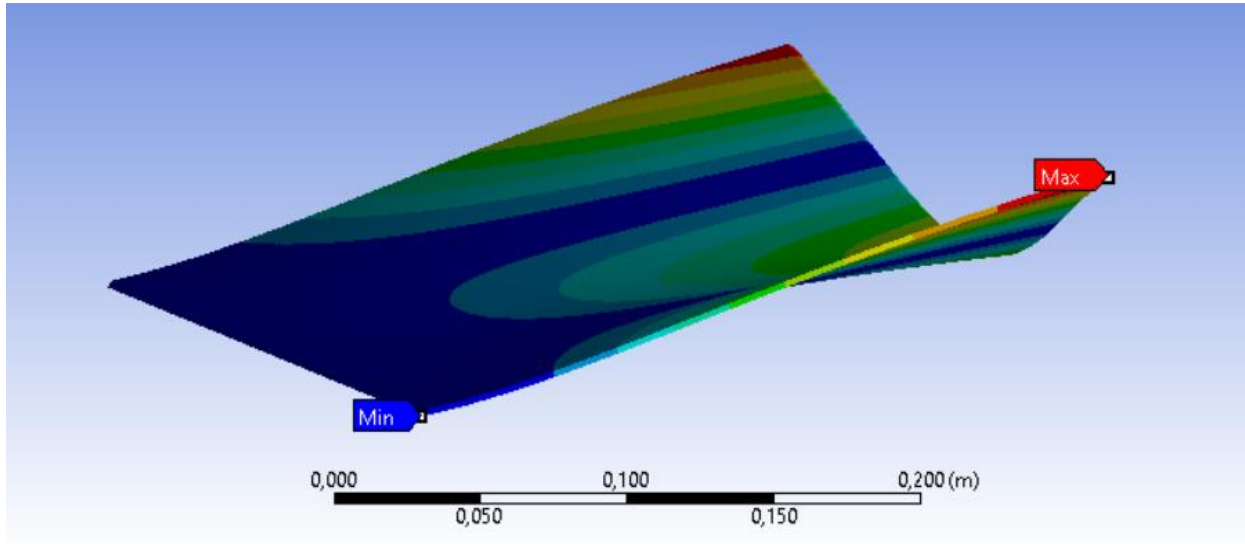


Imagen 24. Modo natural de vibración 3

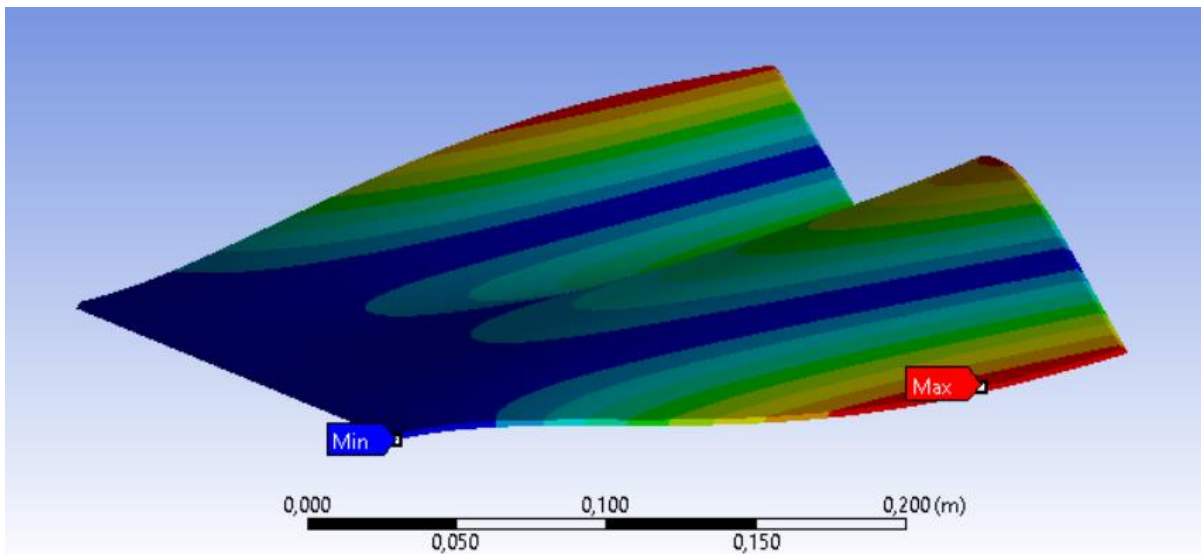


Imagen 25. Modo natural de vibración 4

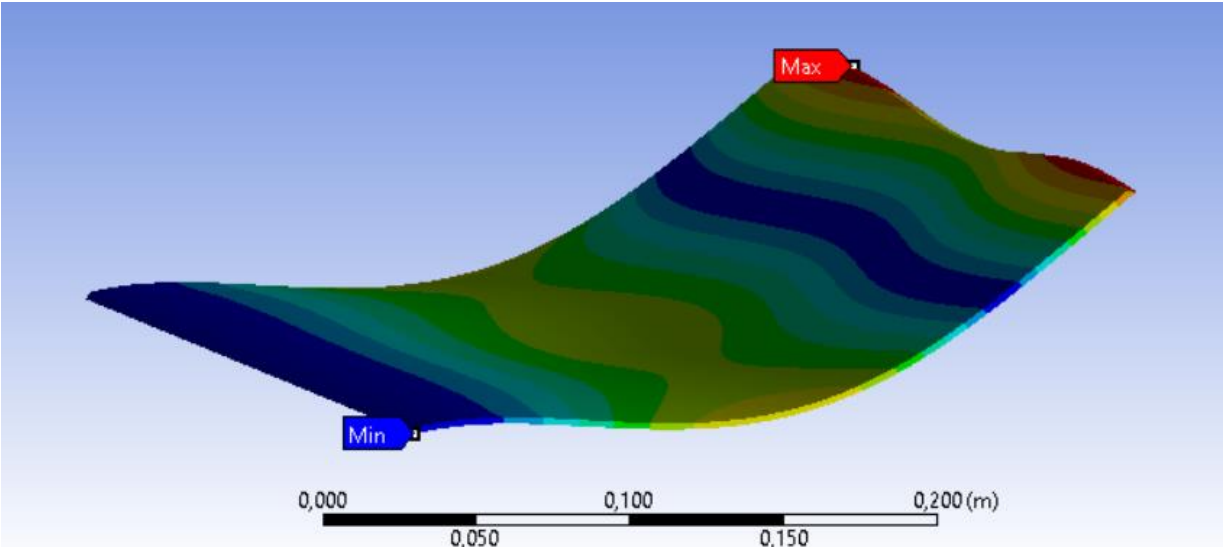


Imagen 26. Modo natural de vibración 5

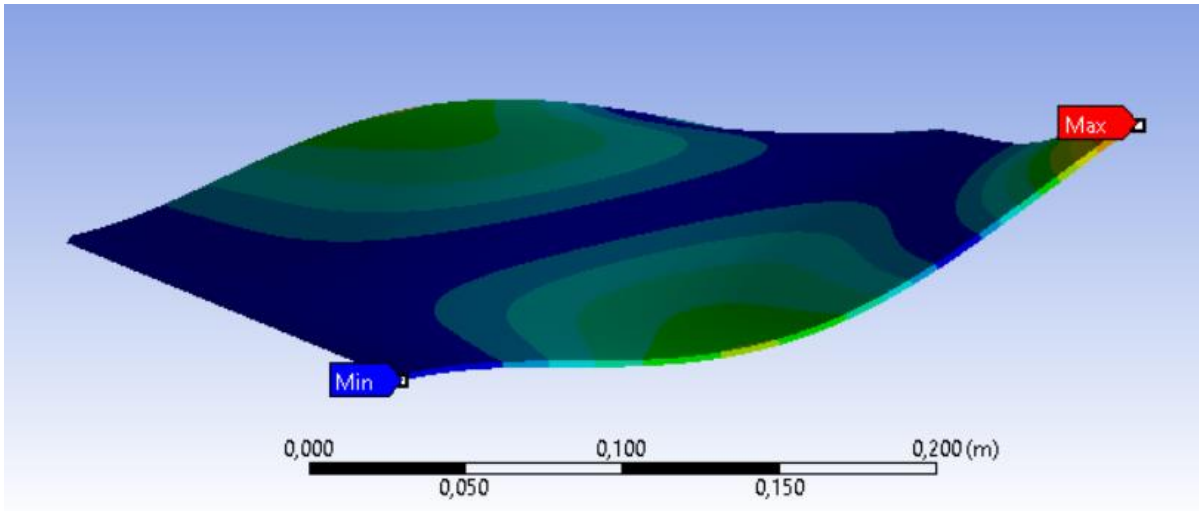


Imagen 27. Modo natural de vibración 6



5.3. VALIDACIÓN DEL MÓDULO FLUENT EN 2D.

5.3.1. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL MODELO Y DEL ESPACIO COMPUTACIONAL. DESIGN MODELER.

Ya que la validación de este módulo se ha realizado para tres ángulos diferentes de inclinación de la placa respecto del flujo, y esto hace que el diseño del modelo cambie, se ha tomado como referencia el modelo de 8° de inclinación como ejemplo para la explicación del método. Por otro lado, como se han realizado mallas de dos tipos en el proceso de simulación, estructuradas y no estructuradas, cabe mencionar la geometría que aquí se presenta es para el caso de una malla no estructurada.

Para empezar a crear el modelo, en primer lugar, abrimos el *workbench* y arrastramos el módulo *Fluent* hasta el *Project Schematic*. En la ventana del módulo hacemos clic derecho sobre el apartado *Geometry* y seleccionamos *Design Modeler*. Ya dentro de esta interfaz, seleccionamos el plano XY y seleccionamos la opción *Sketch* para crear uno. Para orientar la vista de forma perpendicular pinchamos sobre el eje Z abajo a la derecha.

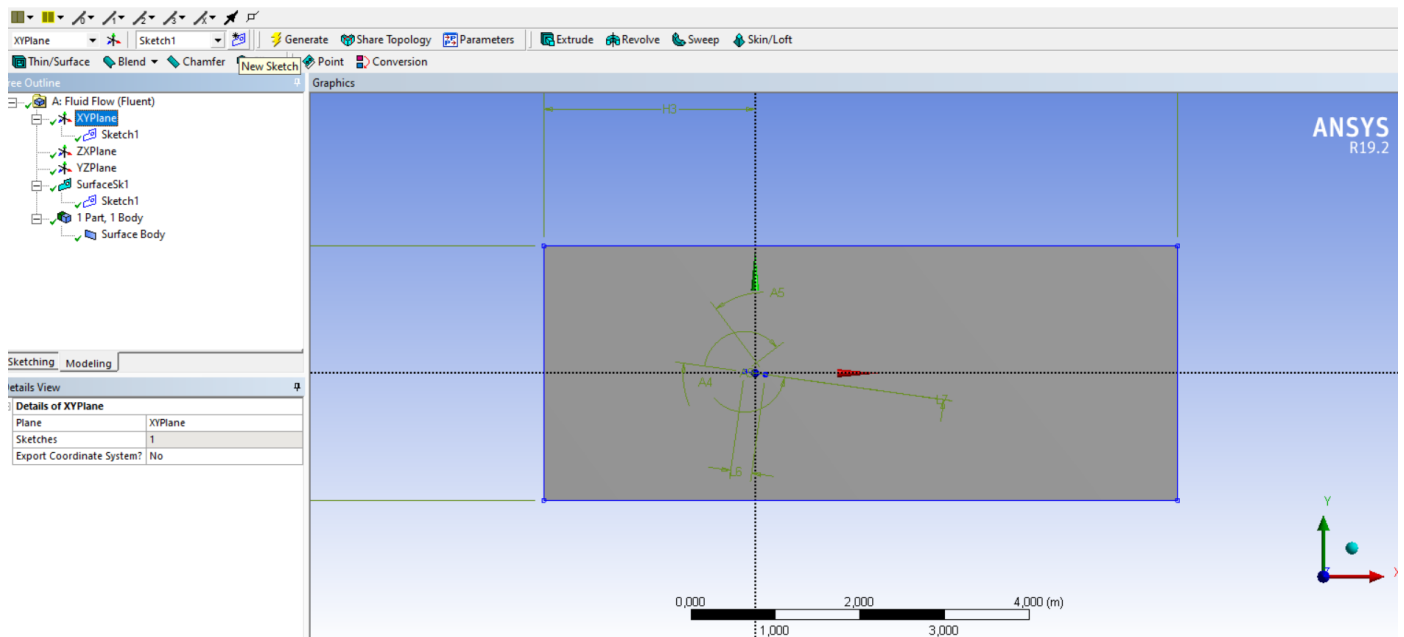


Imagen 28. Entorno Design Modeler

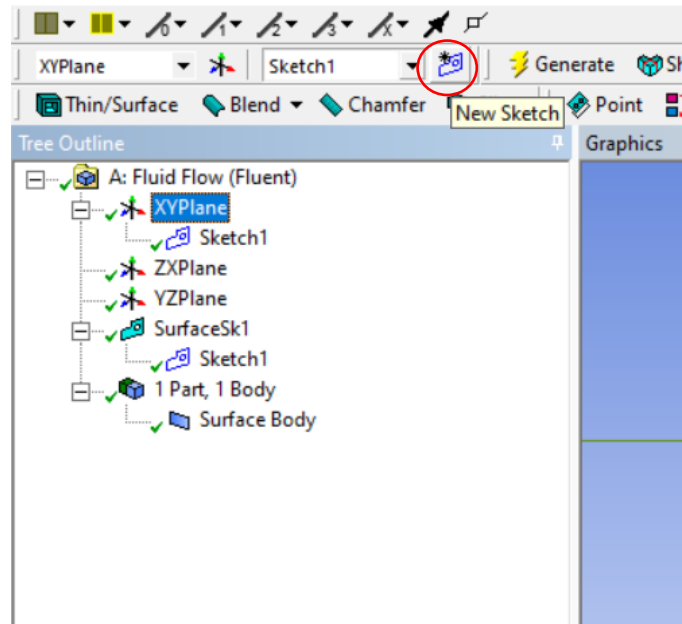


Imagen 29. Selección de plano y sketch

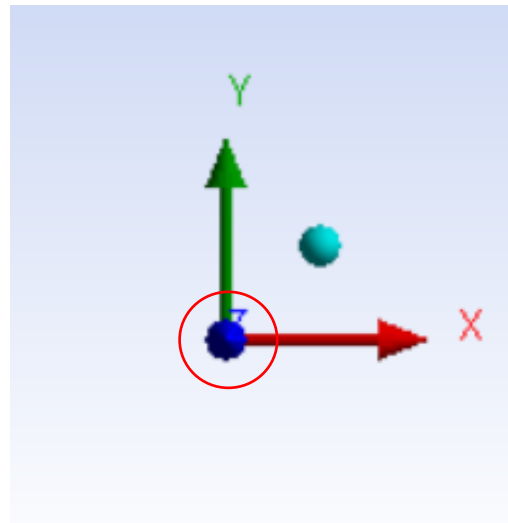


Imagen 30. Orientación de vista



Ahora, seleccionamos el *sketch* que hemos creado en el árbol y pinchamos en *Sketching* para comenzar a dibujar nuestro modelo y nuestro espacio computacional haciendo uso de los distintos apartados de este módulo para dibujar y restringir las geometrías respecto del origen. Puesto que el proceso es bastante similar al de crear una geometría en *Catia V5*, no se va a detallar este proceso.

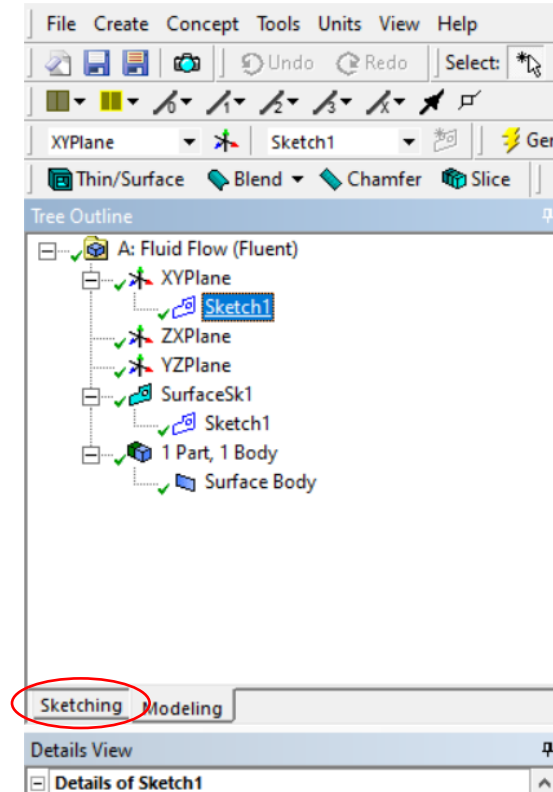


Imagen 31. Sketching

Para este proceso, se deberá dibujar en 2D la geometría de la placa y enmarcar esta en un cuadrado/rectángulo que será a lo que llamemos dominio computacional y que representará el espacio de fluido que va a rodear a nuestra placa. Para establecer las medidas del dominio computacional, deberemos tener en cuenta el criterio del esquema que se presenta a continuación, donde se referencian las dimensiones del dominio a las dimensiones de la placa. Esto es importante, porque si el dominio computacional no es suficientemente grande, los



resultados que se obtendrán en la simulación no serán fiables. B , representa la longitud de la cuerda de la placa, es decir, la longitud de la placa en la dirección del flujo.

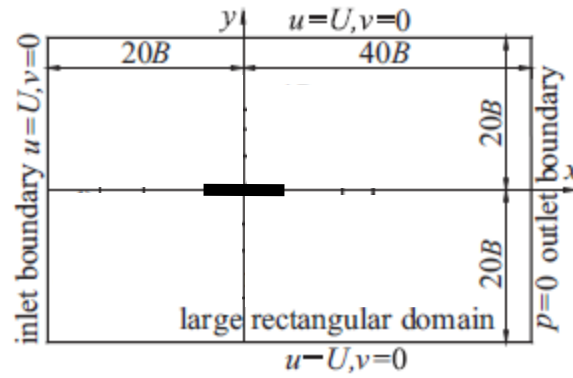


Figura 12. Esquema dominio computacional

Nuestra geometría queda entonces de la siguiente forma:

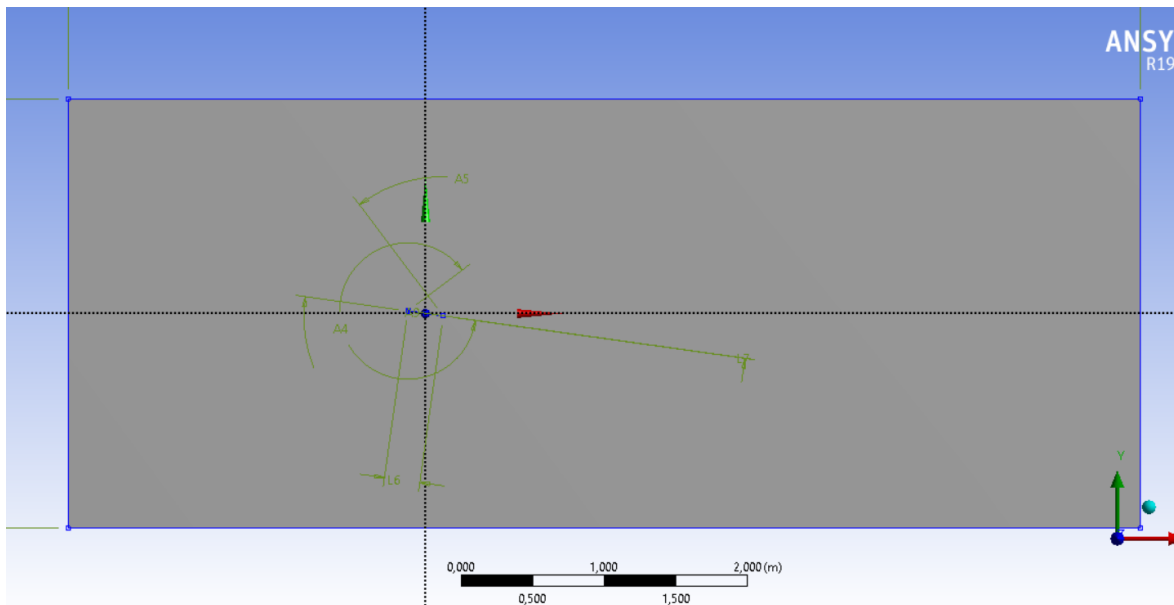


Imagen 32. Dominio computacional



El espacio entre los límites del dominio y la geometría de la placa debe quedar definido como una superficie y el espacio de dentro de la placa como un hueco vacío, ya que los límites de la placa serán como muros. Para hacer esto, utilizamos el comando *Surfaces from Sketches*, seleccionando en este caso el *sketch* que habíamos creado.

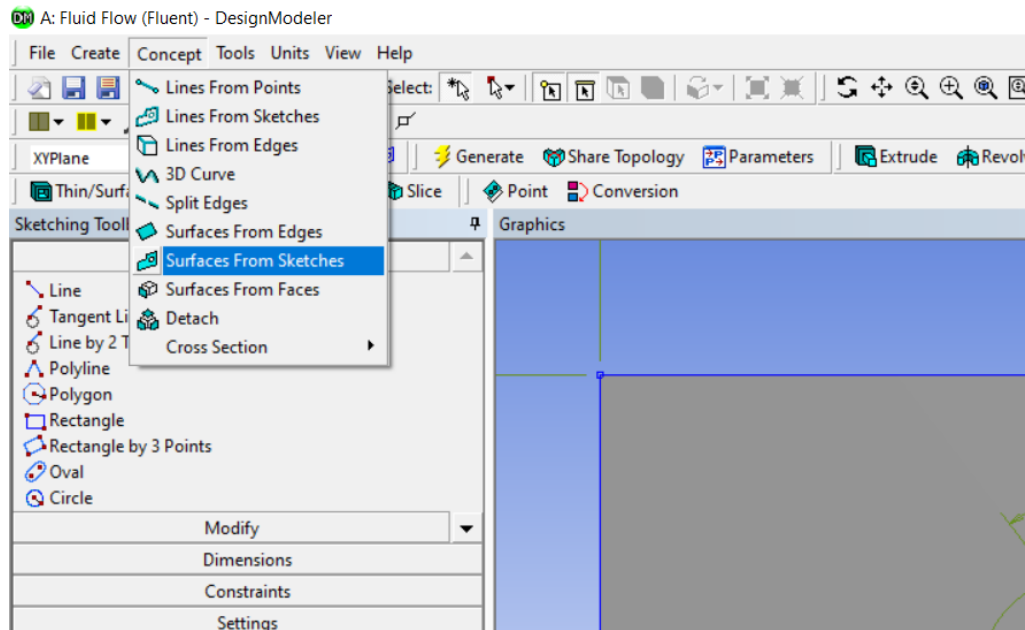


Imagen 33. Surfaces from Sketches

Hecho esto, ya tenemos definido y nuestro espacio computacional, quedándonos en este caso un dominio computacional de dimensiones 10m de alto x 22.5m de largo para nuestra placa de 250mm de cuerda. Así, se puede cerrar esta ventana para pasar al siguiente paso.



5.3.2. METDODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN DE LA MALLA. ANSYS MESH Y GAMBIT.

En este apartado se va a explicar de forma resumida la metodología para la creación de la malla. Como a lo largo del proceso de validación se utilizaron mallas de dos tipos, aquí se van a presentar dos métodos para crear mallas: uno con el software *Gambit*, para mallas estructuradas, y otro con *ANSYS Mesher*, para mallas no estructuradas.

ANSYS Mesher. Malla no estructurada

Este es el mallador que lleva por defecto ANSYS. Para acceder a él, hacemos doble clic en *Mesh* desde el *Workbench*.

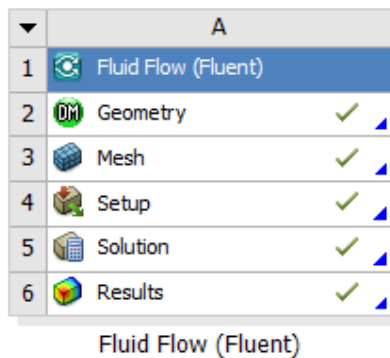


Imagen 34. ANSYS Mesher

Una vez hemos accedido al entorno del mallador, hacemos clic en *Update* o en *Generate Mesh* para que se nos cree una malla por defecto y a partir de ahí, ir refinándola.

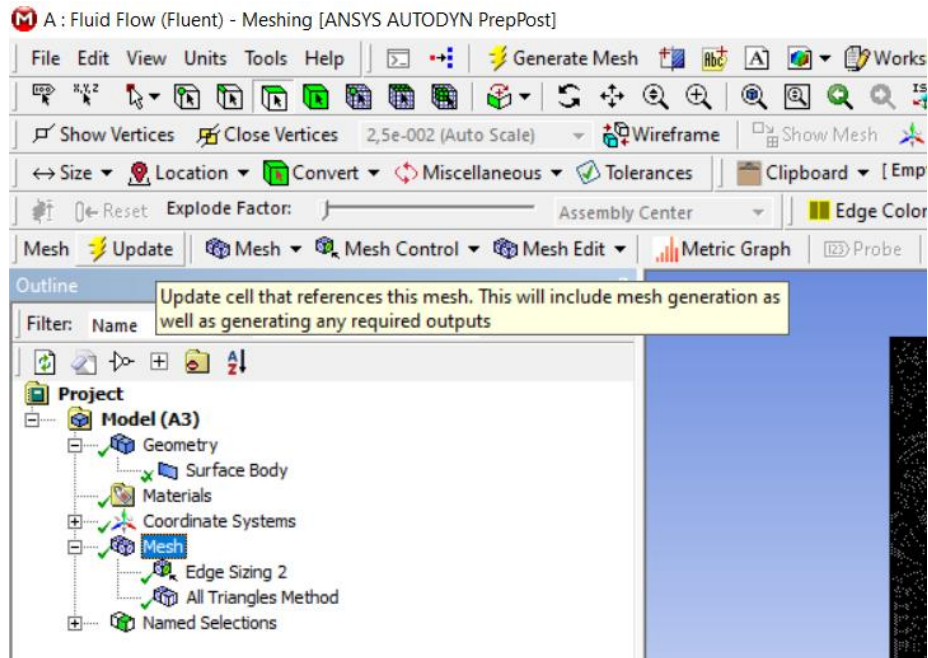


Imagen 35. Generate Mesh

Ahora, refinaremos la malla cambiando algunos ajustes. En primer lugar, vamos a *Mesh control* y seleccionamos *Sizing*, con esto refinaremos la malla de forma local. Una vez seleccionado esto, el comando nos pedirá que donde queremos hacer este refinamiento local, así que seleccionaremos todas las aristas de la placa. Cuando los hayamos seleccionado, en el menú de *Edge Sizing*, ponemos que el tipo de refinamiento sea por tamaño. En este caso hemos colocado 5mm, de manera que todos los elementos adyacentes a la placa tendrán 5mm de lado como máximo.

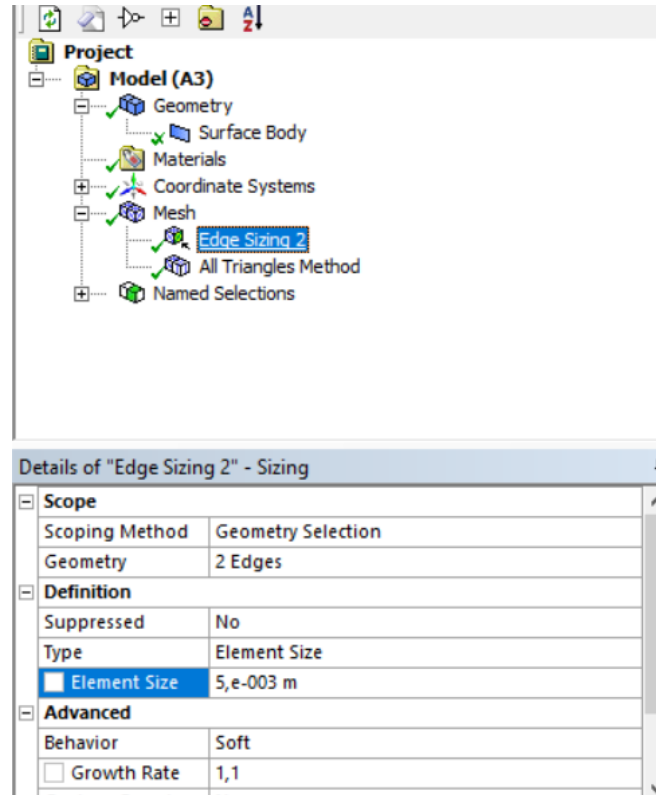


Imagen 36. Edge Sizing

Ahora, por último, vamos al menú del componente *Mesh* del árbol, donde vamos a ajustar ciertos parámetros generales de la malla. Aquí pondremos el *Element Size* como 50mm para que los elementos en general en la malla midan eso. También ajustamos el parámetro *Growth Rate* a 1.1 para que el crecimiento desde los elementos más pequeños a los más grandes sea un poco más lento que el que viene por defecto. En *Defeature Size* seleccionamos la misma medida que hemos puesto para los elementos, para que así el programa la tome como referencia para establecer la tolerancia en cuanto a la deformación de las celdas. También seleccionamos "No" en *Adaptive Sizing*, con lo que haremos que el programa no intente adaptar la geometría a las zonas pequeñas más pequeñas, como las paredes de la placa, de forma automática y así no pueda interferir con el tamaño de *Growth Rate* que hemos puesto y de un error en el mallado.

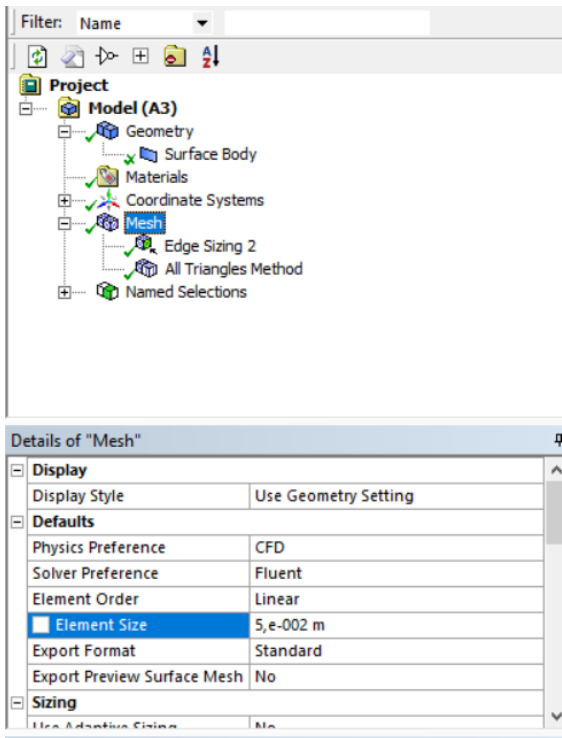


Imagen 37. Element Size Mesh

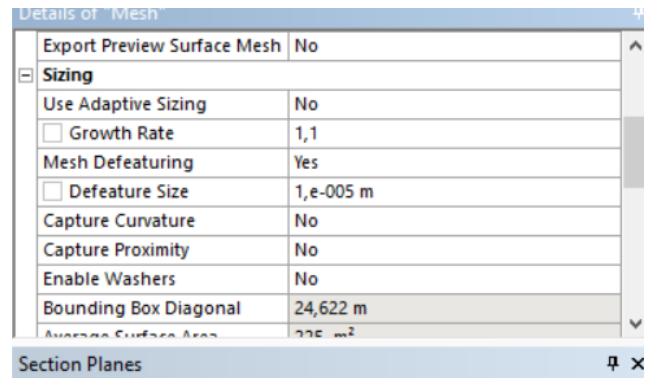
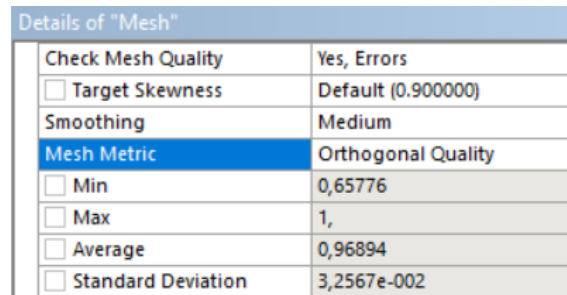
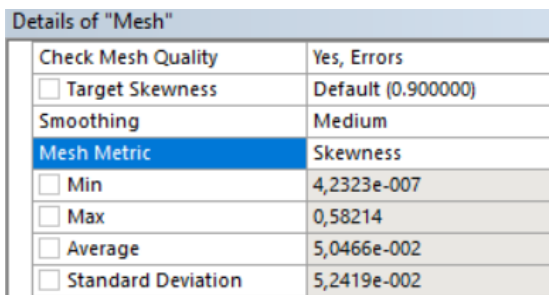


Imagen 38. Growth Rate y Adaptive Sizing

Hecho esto, presionamos en *Generate Mesh* y por último, revisamos que el *Skewness* y el *Orthogonal quality* sean razonables.



Como vemos que el mínimo *Skewness* y el máximo *Orthogonal Quality* indican una calidad de malla media-buena, damos por creada la malla.



GAMBIT. Malla estructurada

En primer lugar, cabe destacar que en este software hay que crear la geometría que vamos a mallar de forma, es decir, no podemos importar la geometría desde otro software. Por ello, se va a explicar de forma resumida el proceso completo.

En primer lugar, vamos a crear el dominio computacional y la geometría. La geometría a conseguir es casi la misma que la que se creó en *Design Modeler*, la diferencia es que aquí la interfaz de dibujo es mucho más primitiva. Es por ello que se van a dar algunos detalles de cómo funciona.

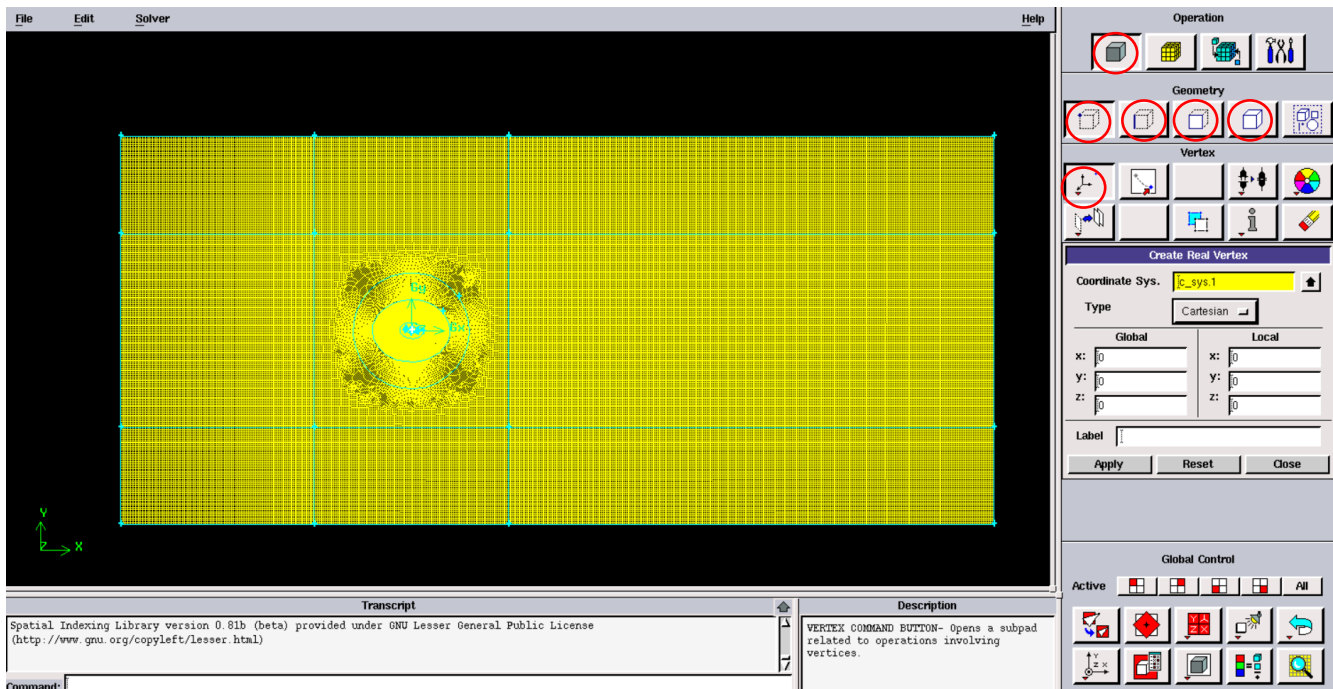


Imagen 41. Interfaz Gambit

En la zona del lado derecho disponemos de las opciones que nos permitirán crear la geometría y también la malla. En este caso, seleccionaremos *Geometry* entre las cuatro opciones de arriba para empezar a dibujar. Dentro de este comando podemos encontrar opciones para crear, vértices, líneas, caras, cuerpos y grupos. Para crear la geometría, iremos definiendo los puntos según coordenadas y más tarde uniremos los puntos con el comando *straight edge* para dibujar las formas.

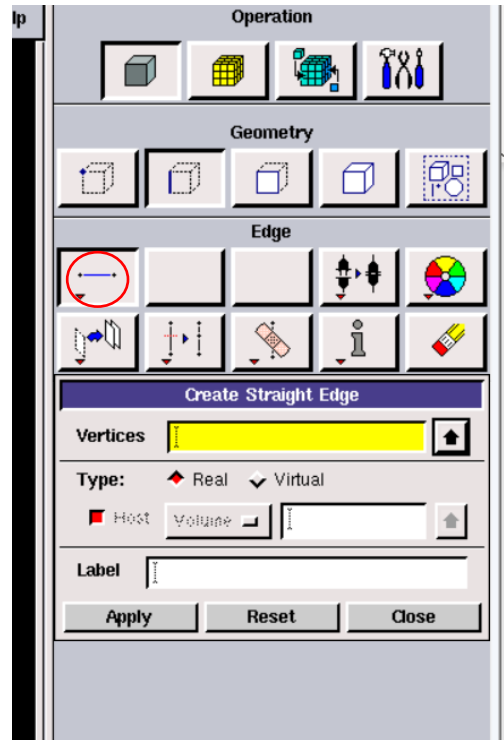


Imagen 43. Straight edge

Para las elipses y los círculos disponemos de una opción dentro del comando línea haciendo click derecho, sobre *Create Straight Edge*. Podremos definirlos con puntos que habremos de haber creado antes.

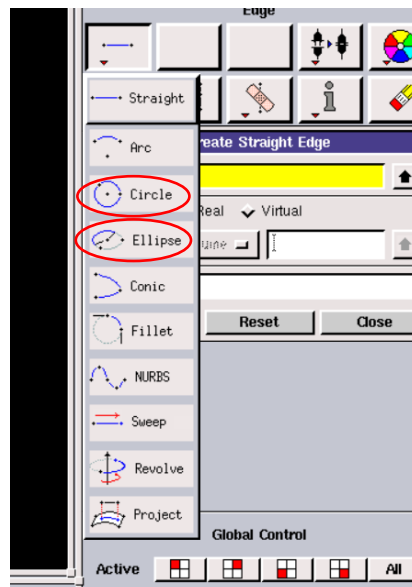


Imagen 42. Círculos y elipses



Una vez creada la geometría, debe quedar algo como lo que aparece resaltado en rojo:

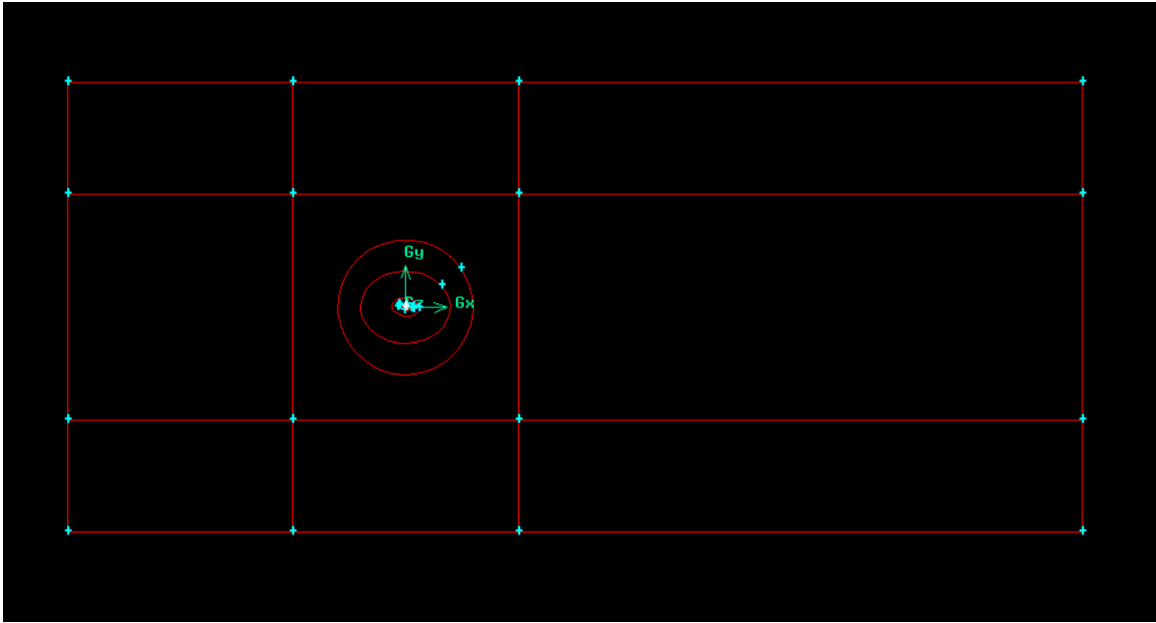


Imagen 44. Geometry Gambit

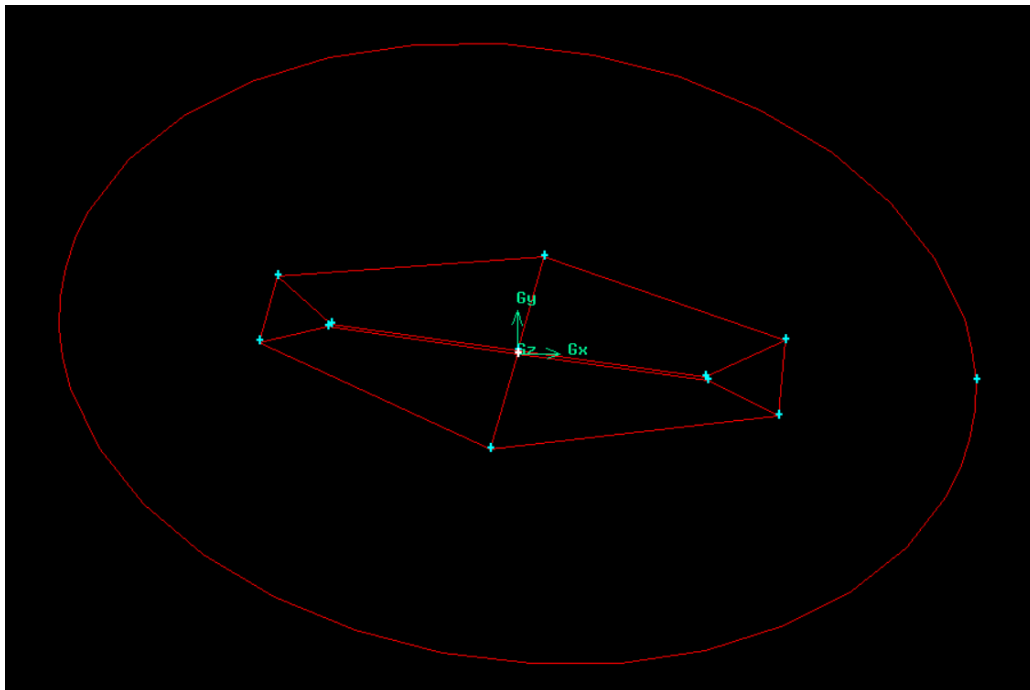


Imagen 45. Geometry Gambit



Como podemos observar, en este caso el espacio computacional está dividido en zonas, realizando una transición suave de formas desde la placa hacia a fuera.

En el siguiente paso, crearemos las caras que posteriormente vamos a mallar, para ello deberemos a ver cortado las líneas del espacio previamente de manera que todas las zonas queden delimitadas por líneas unidas puntos. Usaremos el comando *Split Edges* para este fin.

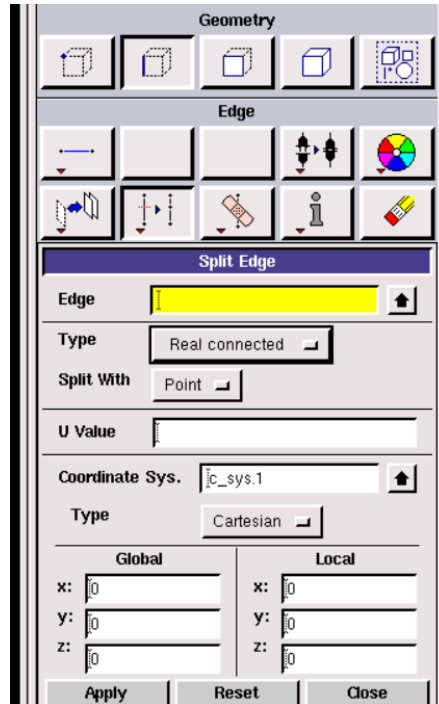


Imagen 46. Split Edges

Ya con todas las zonas definidas, crearemos las caras que posteriormente mallaremos usando el comando *face* y seleccionando las líneas que van a formar la cara que queremos crear.

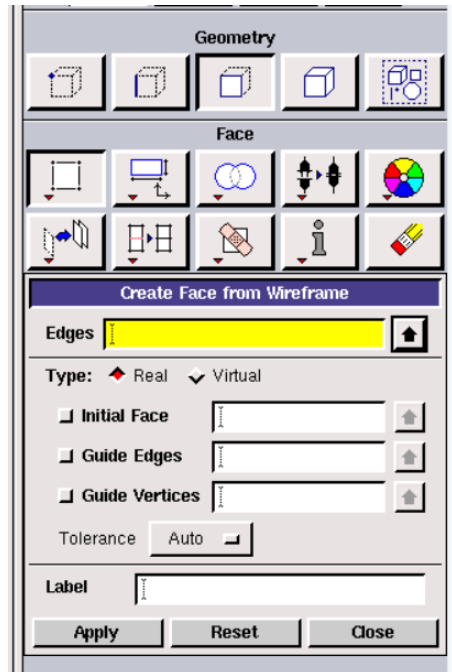


Imagen 47. Face

Con las caras creadas, pasaremos a mallar los ejes de las caras por número de divisiones para que las dimensiones de los elementos de la malla que crearemos después se guíen según estas divisiones. En este apartado es importante tener en cuenta que, para crear una malla del tipo *mapped* o estructurada, debemos establecer un criterio de número de divisiones que al programa le permita realizar una malla de este tipo. Por ejemplo, no tiene sentido si en un lado ponemos 40 divisiones y justo en el de enfrente 50.

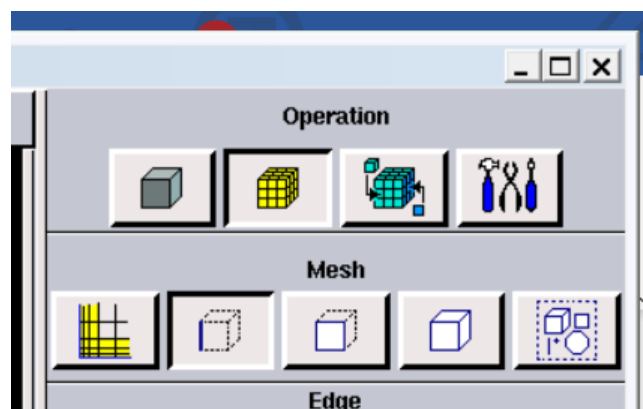


Imagen 48. Mesh edge

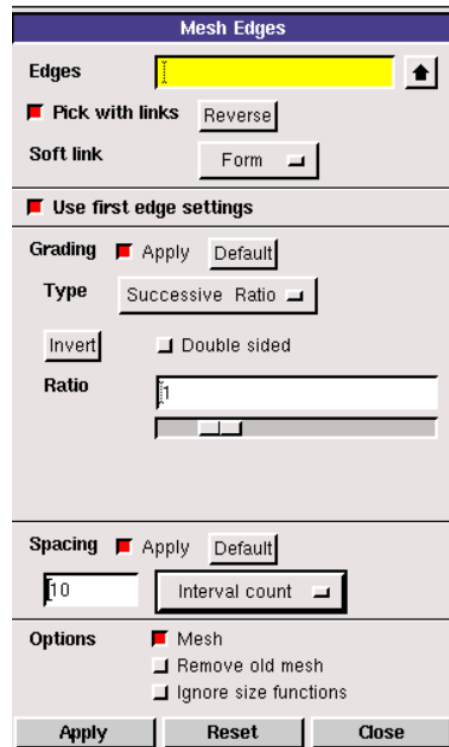


Imagen 49. Interval count

Para seleccionar el número de divisiones que queremos en un lado deberemos tener seleccionada primero la opción *Interval Count*. En caso, de que sobre una cara queramos crear una malla no estructurada, simplemente no mallaremos las aristas y pasaremos directamente a mallar esa cara

Para mallar las caras, usaremos *Mesh Faces*. Dentro de este comando, podremos seleccionar el tipo de elementos con el que queremos mallar: cuadriláteros, triángulos o mezcla de ambos. Dentro de la opción *Type*, podremos seleccionar el modo de mallado, siendo *mapped* el modo estructurado y *pave* el modo desestructurado.

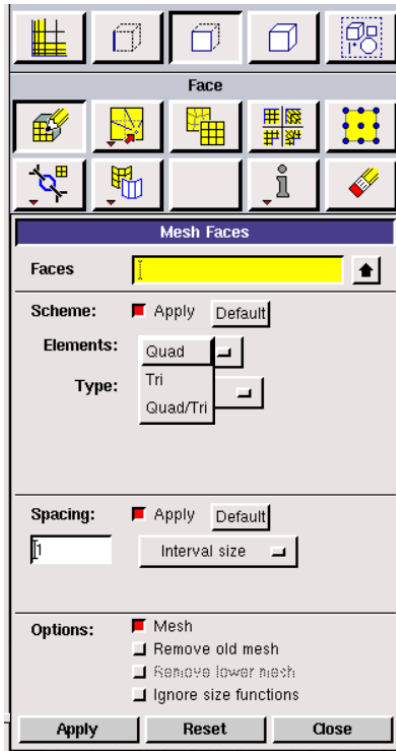


Imagen 51. Mesh faces. Elements

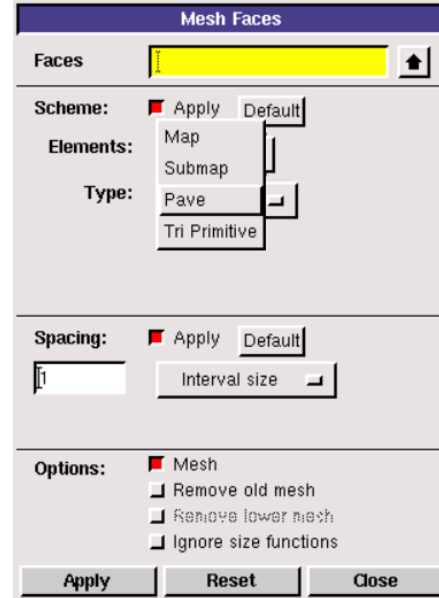


Imagen 50. Mesh faces. Type

Una vez creada la malla en todas las caras, debemos definir la entrada, salida y las paredes como se hizo en *Design Modeler*. Para hacer esto usaremos *Specify Boundary Types* y seleccionaremos cada entidad asignándole su clasificación: *velocity-inlet*, *pressure-outlet*, *wall*... Por último, vamos a *Specify Continuum Types* y seleccionamos todas las caras y las definimos como fluido. Hecho esto, ya sólo queda guardar el archivo como un archivo *.msh* para después importarlo a ANSYS como malla.

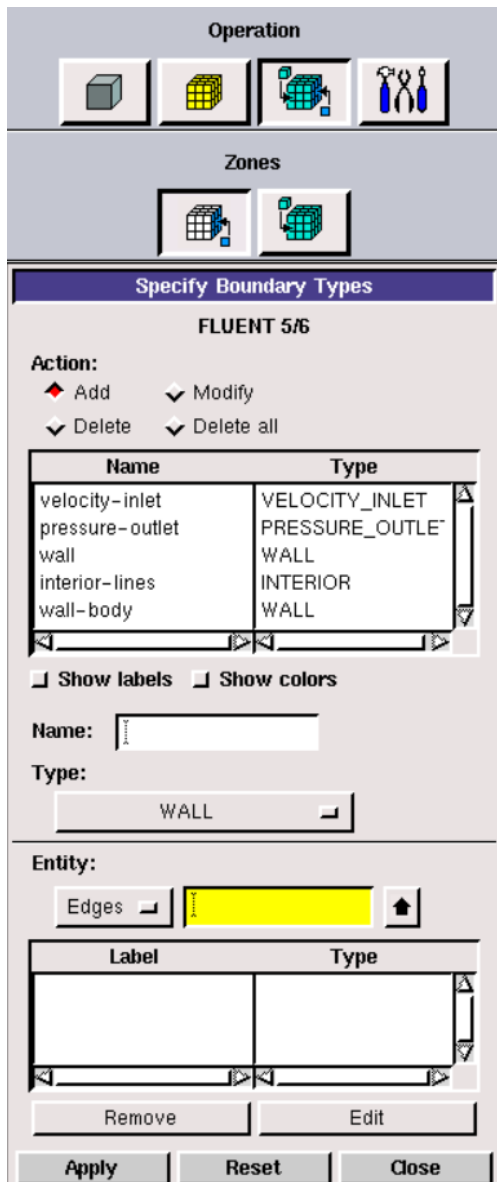


Imagen 53. Specify Boundary Types

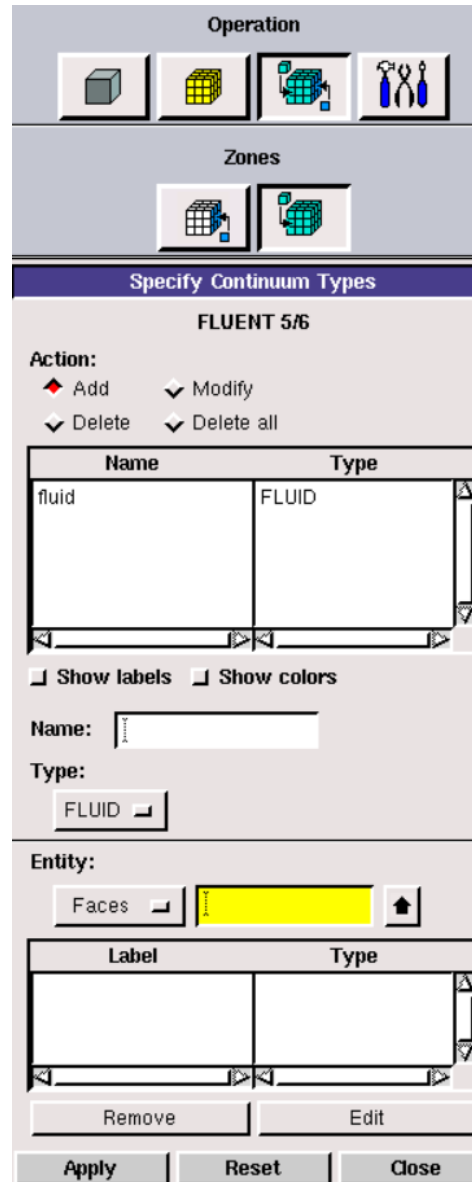


Imagen 52. Specify Continuum Types



5.3.3. CONFIGURACIÓN DEL *SETUP*.

Una vez creada la malla, tenemos que configurar nuestro modelo con ciertos ajustes como: las condiciones de contorno, modelo de turbulencia, método de resolución... Para ello abrimos el apartado *Setup* desde el *Workbench*.

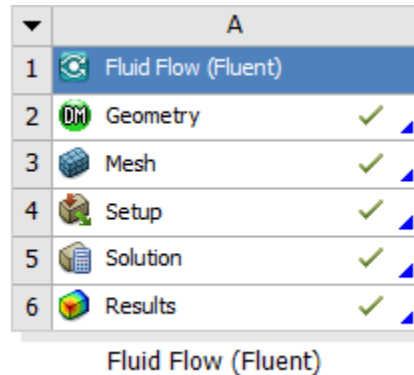


Imagen 54. *Setup*

Ya dentro, en el apartado *General* escogemos *Pressure based solver*, con lo que le estamos indicando al programa que base sus interpolaciones entre elemento y elemento en la presión. En *Time*, pondremos *Steady* para que la simulación sea estacionaria.

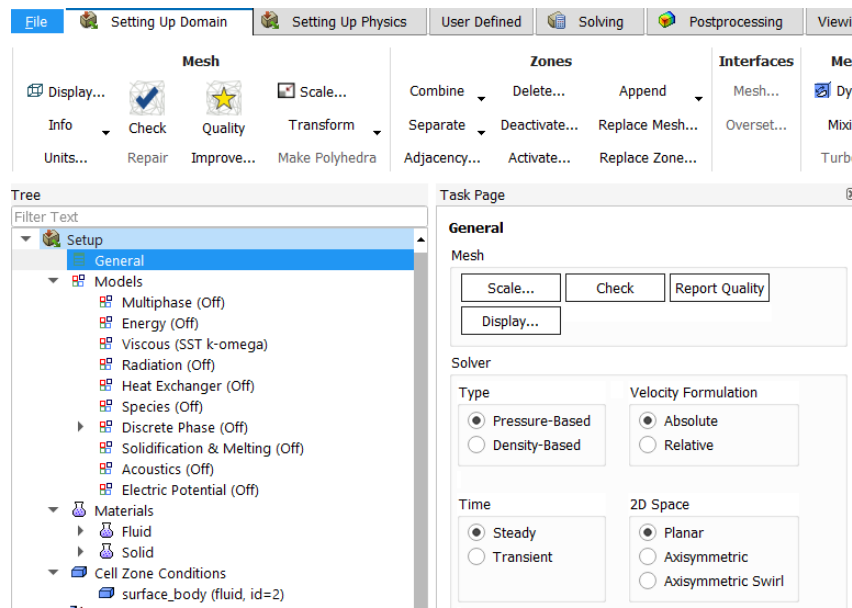


Imagen 55. *General. Pressure-Based.Steady*



En el apartado *Model*, seleccionaremos ahora el modelo de turbulencia que vamos a utilizar, el *k-omega SST*.

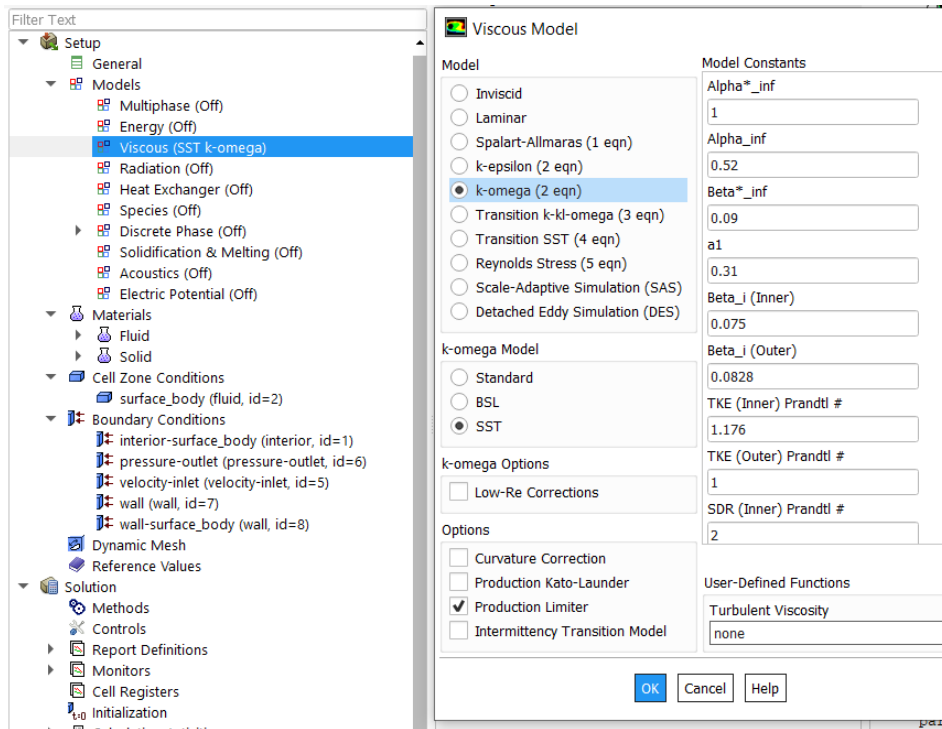


Imagen 56. Modelo *k-omega*

Seguidamente, pasamos a configurar las condiciones de contorno en el apartado *Boundary Conditions*. Aquí configuraremos *velocity-inlet* con la velocidad que queramos para la simulación. En *pressure-outlet* dejaremos 0. En *Specification Method* pondremos *Turbulence Intensity and Hydraulic Diameter* y colocaremos la intensidad de turbulencia para este caso basándonos en bibliografía de referencia y la longitud característica de nuestra placa en *Hydraulic Diameter*.



Velocity Inlet ✕

Zone Name
velocity-inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
Reference Frame: Absolute
Velocity Magnitude (m/s): 30 constant
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence
Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter
Turbulent Intensity (%): 0.2 [P]
Hydraulic Diameter (m): 0.25 [P]

OK Cancel Help

Imagen 57. Velocity-inlet

Pressure Outlet ✕

Zone Name
pressure-outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame: Absolute
Gauge Pressure (pascal): 0 constant
Pressure Profile Multiplier: 1 [P]

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary
Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Average Pressure Specification
 Target Mass Flow Rate

Turbulence
Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter
Backflow Turbulent Intensity (%): 0.2 [P]
Backflow Hydraulic Diameter (m): 0.25 [P]

OK Cancel Help

Imagen 58. Pressure-outlet



Después, colocamos las condiciones de referencia del estudio en *Reference Values*. La longitud será la de la cuerda de la placa (250mm), la profundidad se pone por defecto en 1m en un estudio 2D y el área es el producto de la cuerda por la profundidad, 250mm.

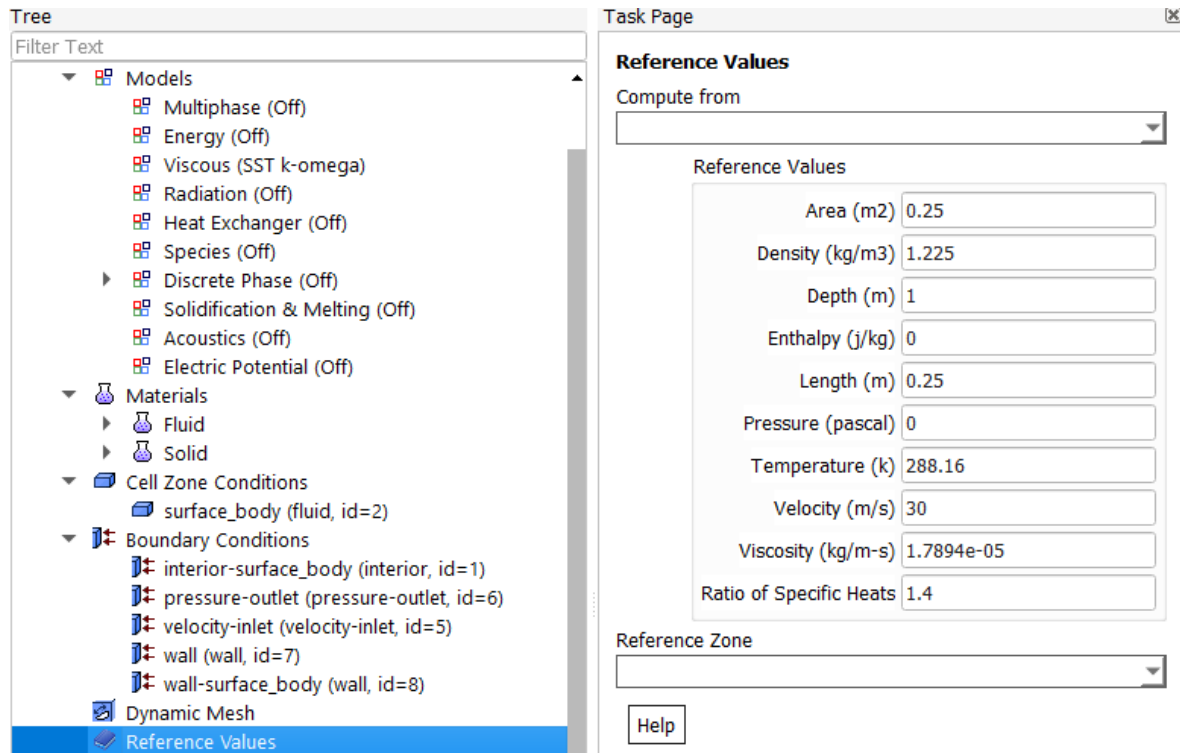


Imagen 59. Reference values

Pasamos ahora a configurar el apartado *Methods* donde podemos escoger el tipo de ecuaciones con las que queremos que el programa resuelva el caso. En nuestro caso colocamos *SIMPLE* en *Scheme* para que resuelva las ecuaciones seguida y no paralela. En cuanto a las demás opciones, colocamos todas las que podamos en *Second Order*, lo que hará que el cálculo de estas ecuaciones se haga estimando los valores de las aristas de las celdas aplicando una corrección en el valor del centro de las celdas adyacentes.

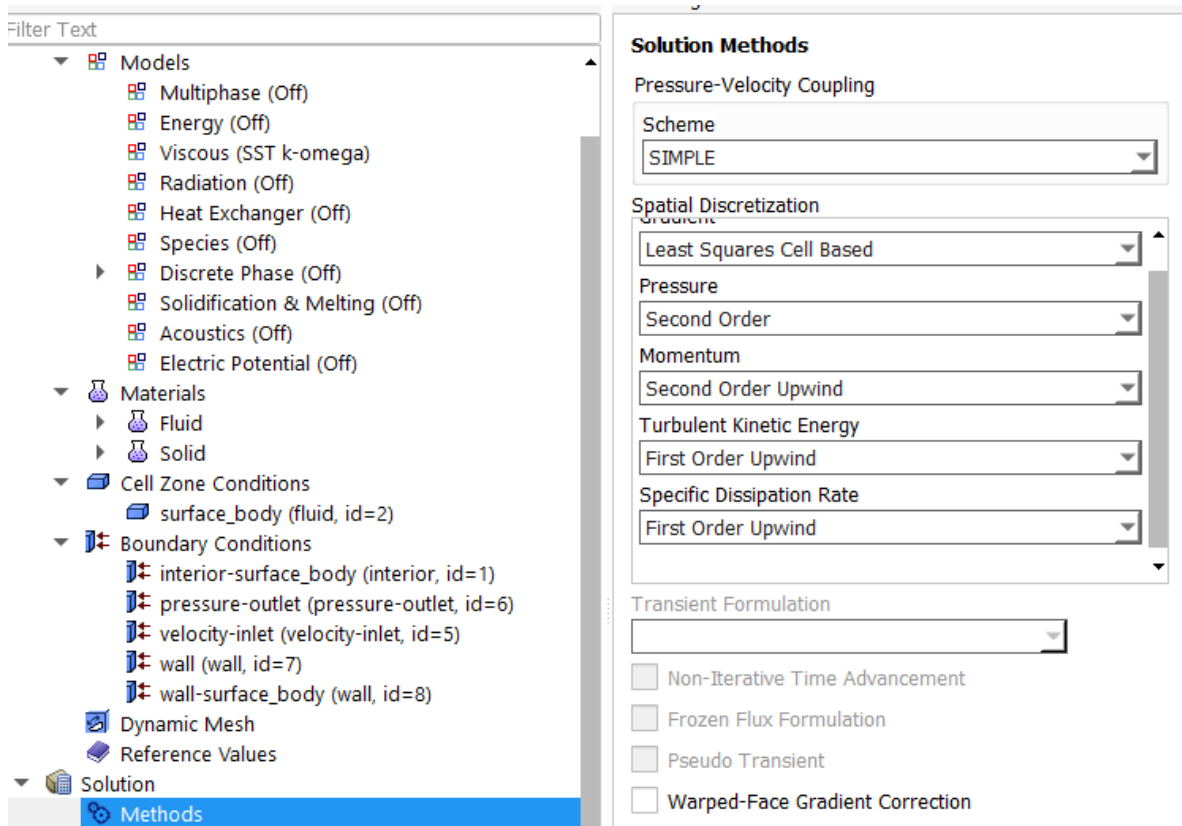


Imagen 60. Second order

Ahora, vamos a crear un informe de datos para el coeficiente de *drag* y otro para el coeficiente de *lift* para poder analizarlos después de la simulación, ya que en nuestro caso son estos datos son los que nos interesa estudiar más detenidamente.

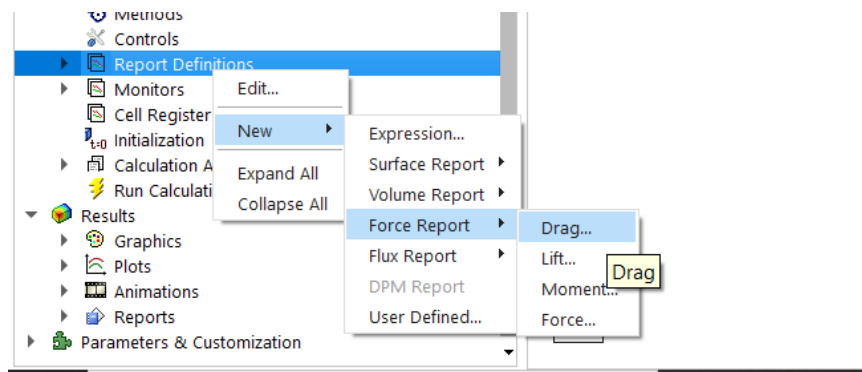


Imagen 61. Report definitions



Para configurar este apartado, marcamos la casilla *drag coefficient/lift coefficient*, marcamos también las casillas de *Report Plot* y *Report File* y seleccionamos *wall-surface_body* que es el conjunto que representa nuestra placa.

Drag Report Definition

Name
report-def-0

Options

Per Zone

Average Over(Iterations)
1

Report Output Type

Drag Coefficient
 Drag Force

Wall Zones

wall
wall-surface_body

Force Vector

X Y Z
1 0 1

Report Files [0/3]

cd-rfile
cl-rfile
report-file-0

Report Plots [0/2]

cd-rplot
cl-rplot

Create

Report File
 Report Plot

Frequency 1

Imagen 62. Drag Coefficient

Lift Report Definition

Name
report-def-0

Options

Per Zone

Average Over(Iterations)
1

Report Output Type

Lift Coefficient
 Lift Force

Wall Zones

wall
wall-surface_body

Force Vector

X Y Z
0 1 1

Report Files [0/4]

cd-rfile
cl-rfile
report-file-0
report-def-0-rfile

Report Plots [0/3]

cd-rplot
cl-rplot
report-def-0-rplot

Create

Report File
 Report Plot

Frequency 1

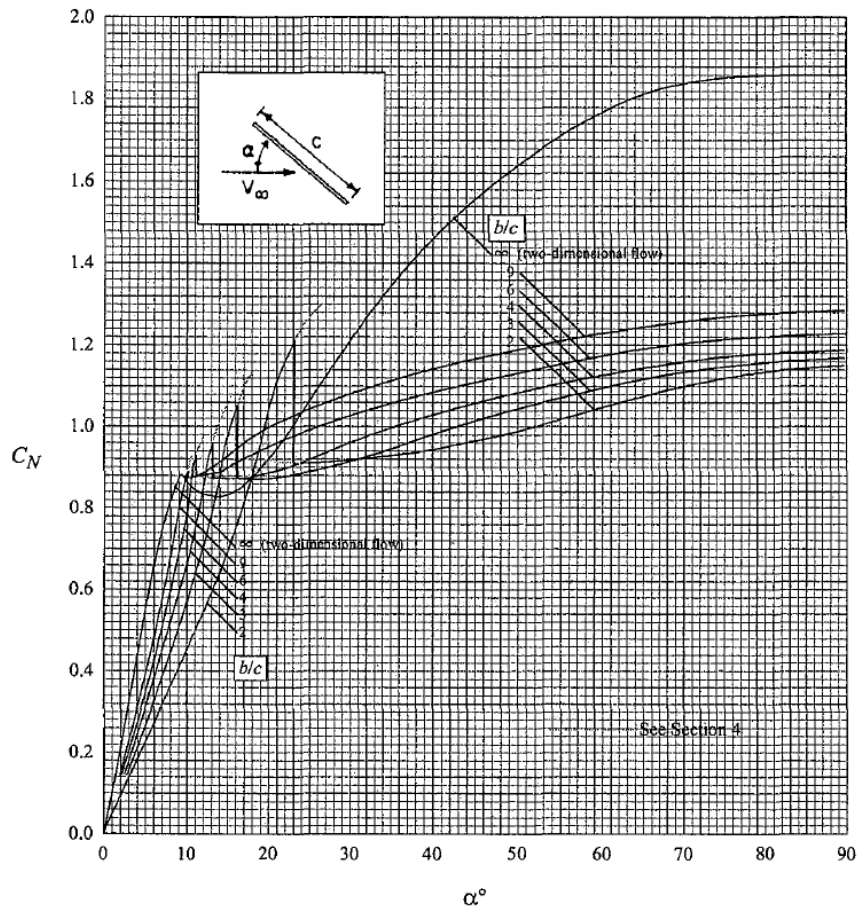
Imagen 63. Lift coefficient

Hecho esto solo queda inicializar la simulación con el comando *Initialize* y después *Hybrid Initialization*. Ahora ya podemos ir a *Run Calculation* y elegir el número de iteraciones que queremos en la simulación y comenzar la simulación.



5.3.4. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE MALLA Y RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN.

En este apartado se va a proceder a la presentación de los resultados del estudio de validación de la malla en 2D. Para la validación de la malla se ha tomado como referencia la norma *ESDU*. En esta norma, distintas gráficas para la obtención de fuerzas del aire sobre placas planas. En nuestro caso, nos hemos basado en la gráfica del coeficiente normal (C_N) en función del ángulo de inclinación. Esta gráfica es la siguiente:



Gráfica 2. Coeficiente normal



Basándonos en esta gráfica, se han realizado varios estudios a varios ángulos de inclinación de la placa y con mallas diferentes. En estos estudios se han obtenido los valores de C_d , o coeficiente de *drag*, y de C_l , o coeficiente de *lift*, para después calcular mediante la suma que vectorial el coeficiente normal. Cabe destacar, que los resultados que se exponen aquí son los más significativos que se han recogido, ya que, durante las distintas pruebas, se han obtenido más datos que no han sido recogidos porque no resultaron significativos. También, hay que mencionar que la diferencia entre el flujo másico de la salida y la entrada ha sido calculada, en algunos casos de estudio, para saber si el programa estaba resolviendo sin inconvenientes la ec. de continuidad.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de tres mallas diferentes con distintos ángulos de inclinación de la placa:

Malla 1. No estructurada.

8°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,112123356	0,1116407	0,111419615		
<i>Cl_promedio</i>	0,845654736	0,848233728	0,849197249		
CN	0,853055437	0,855549007	0,856475509	0,82	4,448232824
<i>Mass flow rate_diff</i>	0,000161676	0,000323352	0,000485028		
<i>Nº de elementos</i>	22099				

30°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,911006582	0,909748579	0,909552299		
<i>Cl_promedio</i>	1,566892481	1,565138105	1,564995582		
CN	1,812480356	1,810331397	1,810109543	1,22	48,36963463
<i>Mass flow rate_diff</i>	-0,00226798	-0,00074072	0,01725589		
<i>Nº de elementos</i>	22117				

80°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	2,952572299	2,95678088	2,959510143		
<i>Cl_promedio</i>	0,518492891	0,519194237	0,519740455		
CN	2,997752168	3,002018626	3,004801229	1,86	61,54845319
<i>Mass flow rate_diff</i>	-0,00307178	-0,000856591	0,01160819		
<i>Nº de elementos</i>	21817				



Malla 2. No estructurada.

La diferencia de esta malla con la anterior es que en esta se aumentaron las dimensiones del espacio computacional para mejorar los resultados, ya que la malla anterior no tenía el dominio suficientemente grande como para que las paredes de este no influyeran en los cálculos. Es por ello que podemos observar que en esta malla hay 10 veces más elementos.

8°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,11129808	0,110987671	0,11087692		
<i>Cl_promedio</i>	0,854840814	0,858134518	0,85953382		
CN	0,862055729	0,865282101	0,86665569	0,82	5,68971833
<i>Mass flow rate_diff</i>	0,000112605	0,000151274	0,00054492		
<i>Nº de elementos</i>	192305				

30°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,754496855	0,753020867	0,75461295		
<i>Cl_promedio</i>	1,302220853	1,301702075	1,3027191		
CN	1,50500653	1,503818047	1,50549585	1,22	23,4012991
<i>Mass flow rate_diff</i>	-0,00013349	0,000796824	0,01154239		
<i>Nº de elementos</i>	189953				

80°	10 m/s	20 m/s	30 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	2,985027761	2,988619865	2,99054524		
<i>Cl_promedio</i>	0,524092977	0,524944008	0,52528158		
CN	3,030687081	3,034372243	3,03632699	1,86	63,2433865
<i>Mass flow rate_diff</i>	0,000456836	-0,00094512	0,0033062		
<i>Nº de elementos</i>	191533				



Malla 3. Estructurada.

Para esta malla, se han realizado las simulaciones para una sola velocidad puesto que, en los otros casos, el valor de los parámetros a obtener era casi invariable al cambiar la velocidad. También, cabe destacar, que para esta malla primero se hizo una simulación y en vista de los resultados, se hizo un refinamiento *Boundary* en el propio módulo *Fluent*, mejorando el nivel de detalle en las zonas anexas a la placa.

8°	10 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,11709385		
<i>Cl_promedio</i>	0,79230208		
CN	0,800907957	0,82	2,32829792
Nº de elementos		19608	

30°	10 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	0,8058777		
<i>Cl_promedio</i>	0,9401914		
CN	1,238304783	1,22	1,500392062
Nº de elementos		20694	

80°	10 m/s	ESDU	Error %
<i>Cd_promedio</i>	1,8610007		
<i>Cl_promedio</i>	0,3307833		
CN	1,890169621	1,86	1,622022646
Nº de elementos		18837	

Análisis de resultados

Como hemos podido darnos cuenta, los mejores resultados se obtuvieron con la última malla. Esto se debió a que fue cuando nos dimos cuenta de que debíamos escalar la malla del modelo desde *Fluent* para hacerla más pequeña. Esto hizo que, en relación con la profundidad establecida en los valores de referencia, la malla fuera mucho más pequeña y que entonces el caso de estudio pasara a ser un caso 2D real, donde la profundidad del modelo tiende a infinito. De este modo, queda validado el módulo 2D de *Fluent* para nuestra placa.

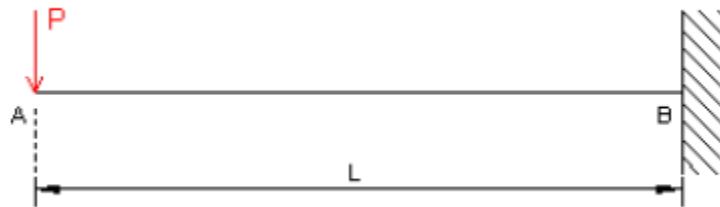


5.4. VALIDACIÓN DEL MÓDULO ESTRUCTURAL

Para la validación de este módulo, se van a comparar los datos obtenidos para la resolución de una viga en voladizo en el módulo estructural de ANSYS, con los obtenidos en la resolución del problema de forma analítica.

En primer lugar, se presentan los resultados del problema que hemos elegido para la resolución de forma teórica.

Dada la viga en voladizo de la siguiente imagen:



Calcular el desplazamiento de la sección correspondiente al punto A para los siguientes datos:

-
- Sección rectangular $\rightarrow b = 0.05\text{m}$ y $h = 0.1\text{m}$
-
-

Desplazamiento



Ahora pasamos a verificar los resultados como el módulo estructural de ANSYS. Para ello, en primer lugar, arrastramos el módulo *Static Structural* y entramos al *Design Modeler* haciendo clic derecho en *Geometry*. Ahí, siguiendo la metodología anteriormente vista para la creación de geometrías con esta interfaz, crearemos una viga que tenga las dimensiones del problema teórico. Hecho esto, entramos en *Model* y colocamos un empotramiento en una de las dos caras laterales de la barra y creamos un informe *Total Deformation* para saber la deformación en el extremo después de realizar el cálculo. En la otra cara, colocamos una fuerza desde el comando *Loads* que tenga el mismo valor que la del problema teórico.

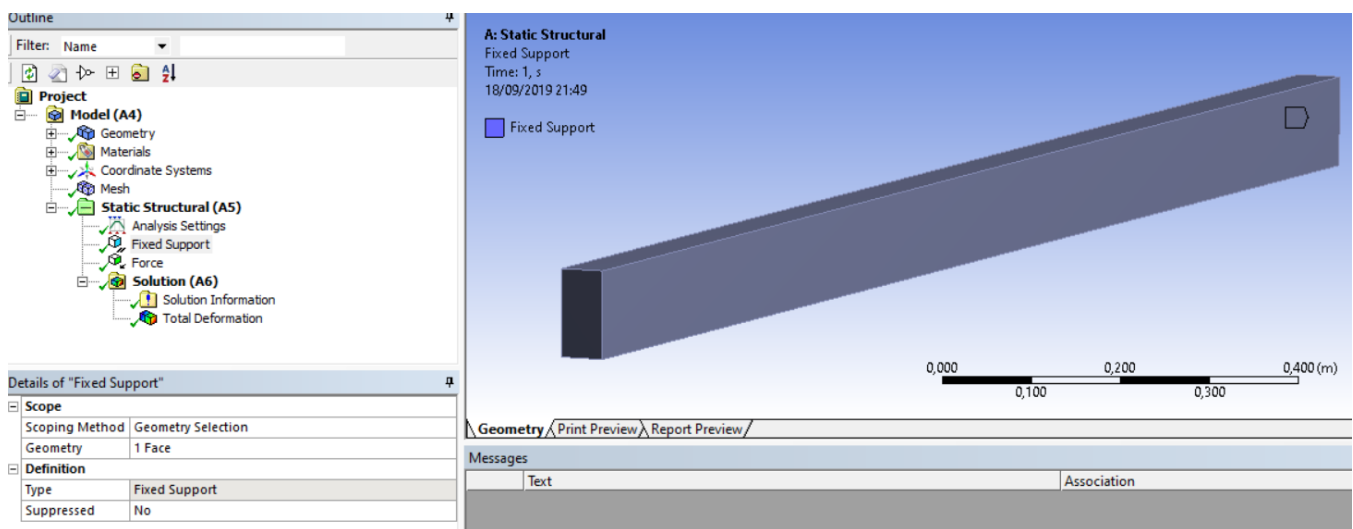


Imagen 64. Static Structural

Hecho, esto, le damos a *Solve* para resolver el cálculo y obtenemos los siguientes resultados

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [m]
1	1,	0,	1,5979e-002	6,0596e-003

Tabla 4. Resultados deflexión

Como vemos, los resultados coinciden, por lo que este módulo queda validado.



6. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ACOPLAMIENTO.

En este apartado se va a explicar cómo configurar la parte común a los módulos *Fluent* y *Transient Structural*.

En primer lugar, vamos al *Workbench* y, esta vez, arrastramos el módulo *Geometry* para crear una geometría que nos valga para los dos módulos y que así puedan luego compartir la información al acoplarlos.

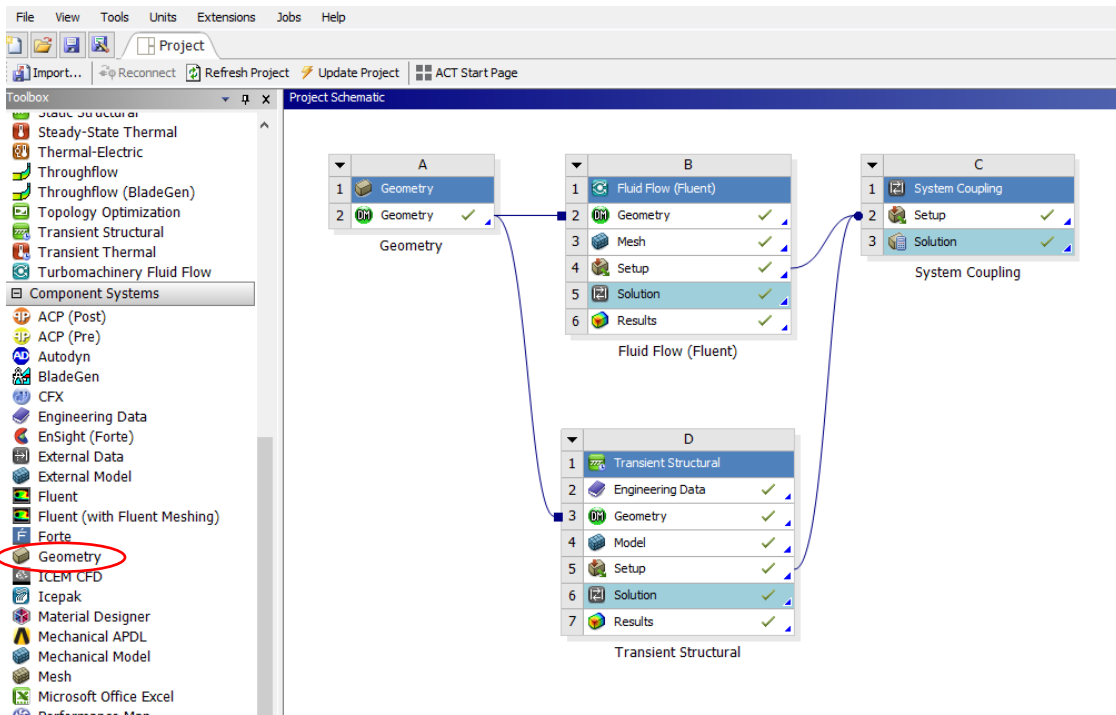


Imagen 65. Geometry acoplamiento

Hecho esto, accedemos al *Design Modeler* para crear una geometría como en anteriores apartados hemos visto. Ya dentro, deberemos crear una geometría 3D que contenga un espacio computacional fluido, y también un sólido. Para ello, primero creamos nuestra placa en 3D, pero esta vez inclinada 30° respecto del plano horizontal, ya que es el ángulo que hemos elegido para las simulaciones *FSI*. Puesto que este procedimiento ya se ha visto anteriormente, pasamos directamente a ver cómo crear un dominio fluido alrededor de la placa.



Para crear una envoltura llena de fluido alrededor de nuestra placa utilizaremos el comando *Enclosure* desde la pestaña *Tools*. En el menú de *Enclosure* colocamos las medidas adecuadas para que nos quede una caja de las dimensiones del dominio computacional. Estas serán 22.5m de largo, 10m de alto y 10m de profundidad.

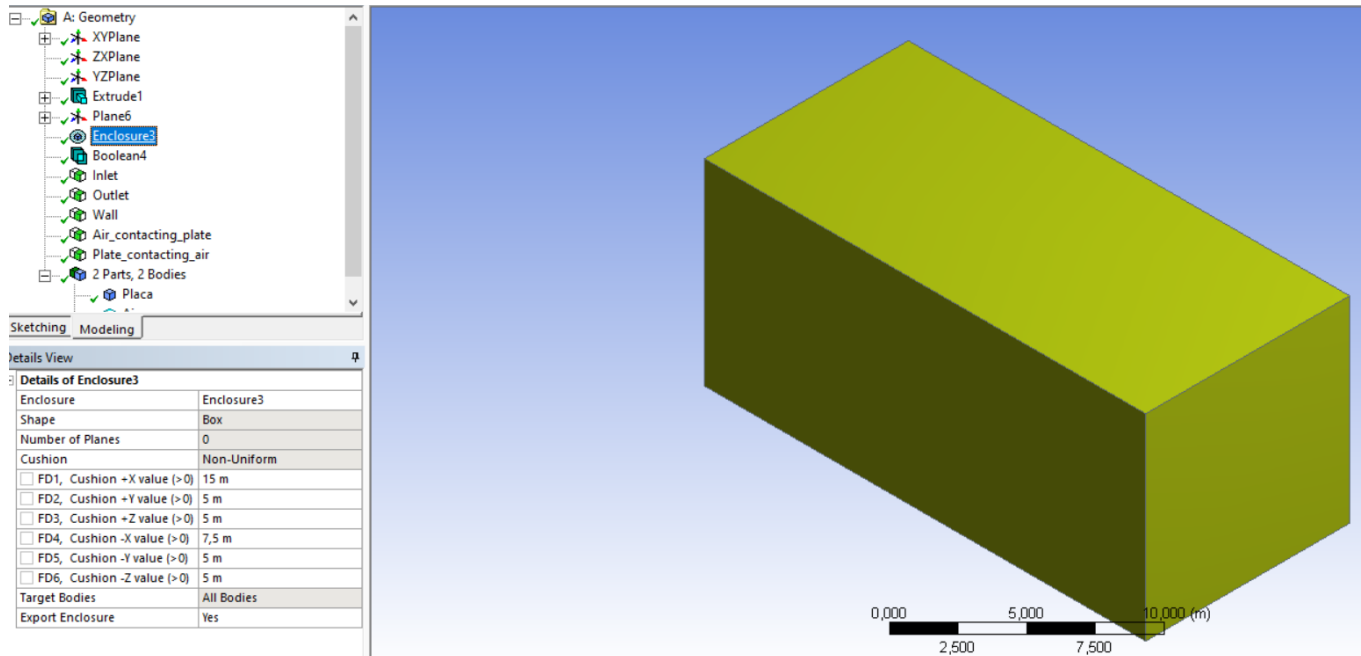


Imagen 66. Enclosure

Una vez creado nuestro dominio, tendremos que usar el comando *Boolean* desde la opción *Create* para “sustraerle” el cuerpo que representa la placa a la caja que representa el espacio computacional y que así el programa los pueda tomar como dos partes independientes. Para hacer esto, seleccionaremos la opción “*Subtract*” y elegiremos el cuerpo que representa la placa como *Tool body* y el que representa el dominio como *Target body*. Seleccionamos *Preserve Tool Body* para que conserve ambos cuerpos después de la operación y pulsamos en *Generate* para que realice la operación.

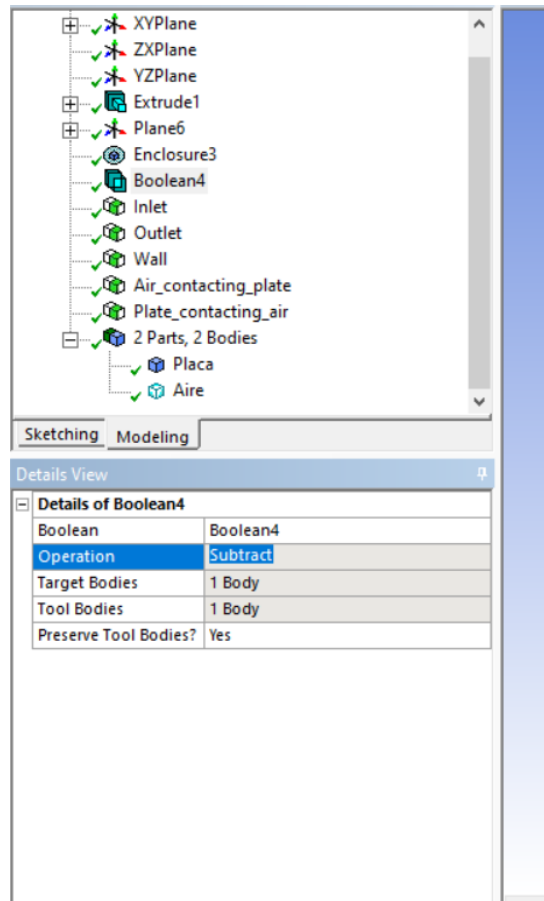


Imagen 67. Boolean

Una vez tengamos ya dos cuerpos individuales, lo que haremos será definir su condición de fluido o sólido. Para ello, seleccionamos cada uno y en sus menús escogemos *Fluid* para el dominio computacional y *Solid* para la placa.

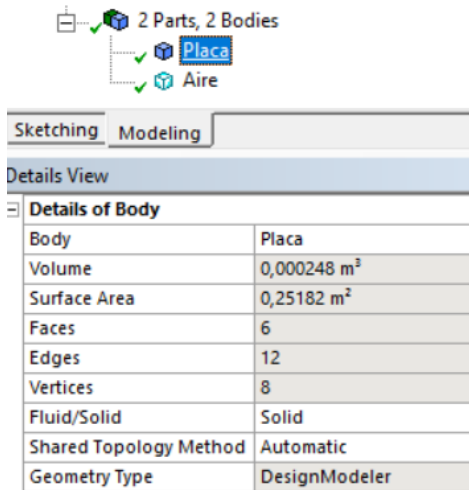


Imagen 69. Selección Fluid/Solid

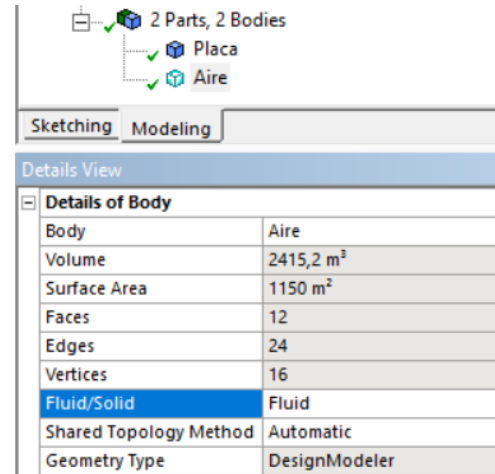


Imagen 68. Selección Fluid/Solid

Por finalizar con la geometría, al igual que hicimos anteriormente en *ANSYS Mesher* en el apartado de la validación 2D del módulo *Fluent*, crearemos *Named Selections* para la entrada, la salida y las paredes del dominio computacional. Sin embargo, esta vez crearemos algunos grupos de entidades más de cara al posterior acoplamiento de módulos. Concretamente, lo que haremos será crear un *Named Selection* para las paredes de la placa (*Plate_contacting_air*) y otro para las caras del hueco que ocupa esta en el dominio computacional (*Air_contacting_plate*). Para hacer esto, escondemos el cuerpo que representa la placa para crear primero la selección con las caras del hueco y después hacemos lo contrario para crear la selección con las caras de la placa.

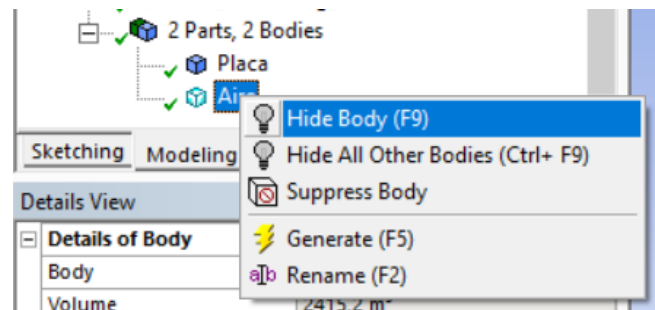


Imagen 70. Hide body

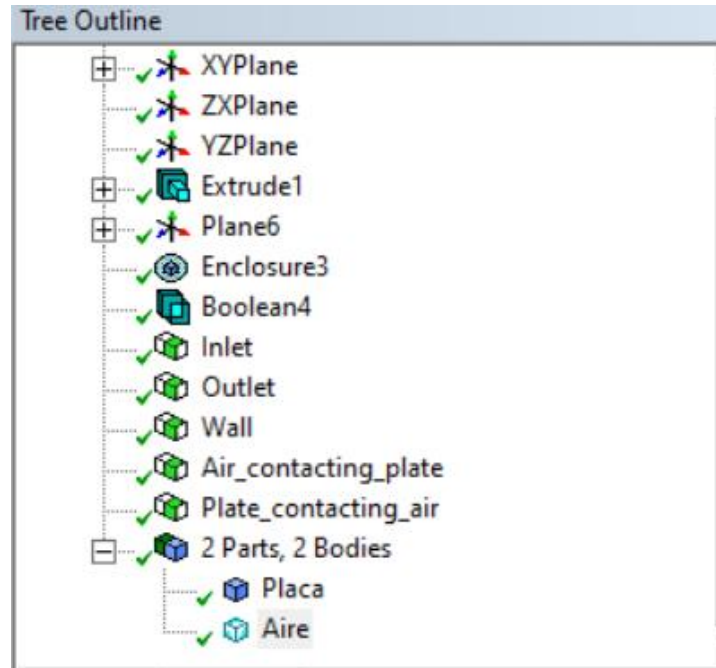


Imagen 71. Named Selections

Ahora ya, por último, salimos del módulo *Geometry* y en el *Workbench* arrastramos los módulos *Fluent* y *Transient Structural* al *Project Schematic*. Para vincular la geometría que hemos creado con cada uno, al arrastrarlos los soltaremos sobre el apartado *Geometry* quedando así unidos por una flecha.

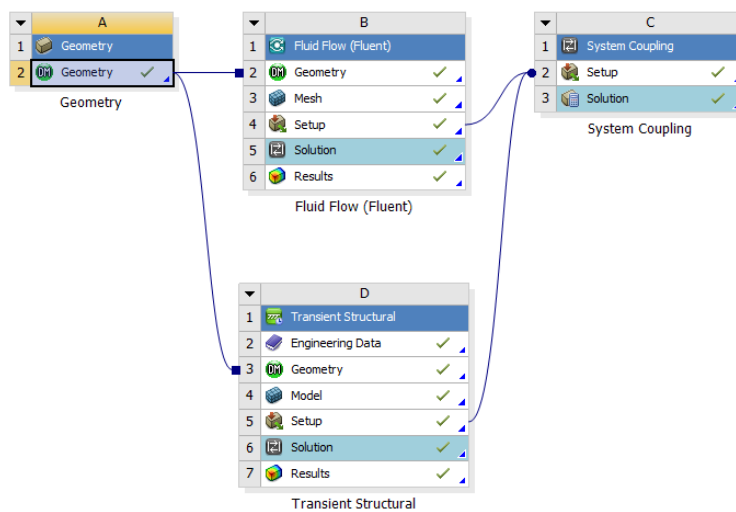


Imagen 72. Vincular módulos



6.1. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO *FLUENT* EN 3D

Mesh

Pasamos ahora a configurar el módulo *Fluent* para el modelo 3D de la placa. Para ello, primero abrimos el apartado *Mesh* para crear la malla. Aquí se van a dar sólo los detalles clave para crear la malla, ya que el proceso es muy similar al del caso 2D.

En este apartado, antes de mallar el fluido, suprimiremos el cuerpo que representa a la placa ya que no lo necesitamos utilizando *supress body*. Seguidamente, lo que haremos es crear una malla lo más homogénea posible a la que teníamos en 2D y que hemos validado. Lo que pudimos ver allí, era que los resultados buenos se obtenían con un número de celdas no muy alto, es decir, sin un refinamiento excesivo, mallas sencillas. Aquí crearemos una malla de tetraedros ya que se adapta mucho mejor al modelo 3D. Como los tetraedros los crea por defecto, lo único que haremos será configurar algunos ajustes generales de la malla en el apartado *Mesh*: tamaño general de elemento 0.5m, *Growth Rate* de 1.1, *Capture Proximity* "Yes" con tamaño de 1mm y *Capture Curvature* "Yes" con tamaño de 5mm. Hecho esto, obtenemos una malla de 4054965 elementos como la siguiente:

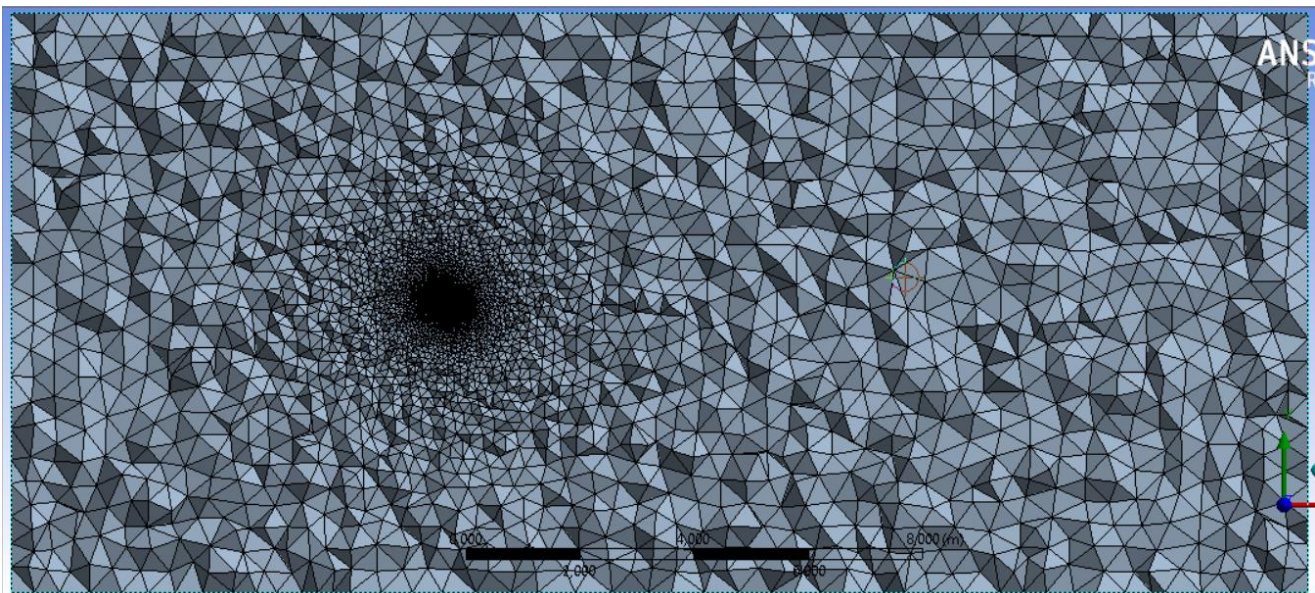


Imagen 73. Malla 3D



Evidentemente, aunque no se ha dicho se deben revisar siempre los parámetros de calidad de malla y ver que quedan dentro de los límites para no encontrar problemas de convergencia durante el cálculo. Revisado esto, pasamos a configurar el *setup*.

Setup

En este apartado estableceremos los mismos ajustes que para el modelo validado en 2D con algunos cambios para que el modelo se corresponda con el caso actual:

- Apartado General
Pressure-based solver y esta vez en *Time* seleccionamos *Transient* ya que haremos un estudio transitorio de lo que le pasa a la placa a lo largo de un tiempo determinado.
- Models
Modelo *k-omega SST*.
- Boundary conditions
En *inlet*, colocaremos la velocidad de la simulación, empezando por 10m/s en la primera simulación, después con 20m/s y por último con 30m/s.
En *outlet* dejamos la presión 0 como ya habíamos visto.
- Reference values
En la velocidad colocamos la velocidad de la simulación. En longitud, la cuerda de la placa. En el área colocamos el área característica de nuestra placa, que es el producto de la cuerda por la profundidad, es decir $0.5\text{m} * 0.250\text{m} = 0.125\text{m}$.
- Methods
Aquí pondremos todo *Second Order* como en el caso 2D, sin embargo, en *Scheme* ahora pondremos *Coupled*, ya que en el caso de un acoplamiento de módulos conviene que las ecuaciones que definen el problema sean resueltas de forma paralela.
- Run Calculation
Aquí, colocaremos 0.1s como *Time Step*, para que en la simulación capturemos lo que le ocurre a la placa cada 0.1 segundos. En *number of time steps* ponemos que sean 10, para que en total capturemos lo que le ocurre en 1 segundo de tiempo a la placa cada



0.1s. En *max iteration/time step* pondremos 20 para que en el cálculo de lo que ocurre en cada 0.1s, el programa pueda hacer hasta 20 iteraciones para poder converger la solución de ese instante.

Ahora, se va a describir cómo configurar un nuev apartado que debemos usar para poder acoplar los módulos y del cual no habíamos hablado en el caso 2D. Este apartado es *Dynamic Mesh*, que servirá para que la malla del fluido se pueda mover junto con el sólido que contiene durante el cálculo acoplado. Para configurarla vamos al árbol y la seleccionamos. Dentro de ella deberemos primero activarla y luego indicar qué zona será la interfase entre el sólido y el fluido y que por tanto estará en movimiento. Para hacer esto seleccionamos *create/edit*.

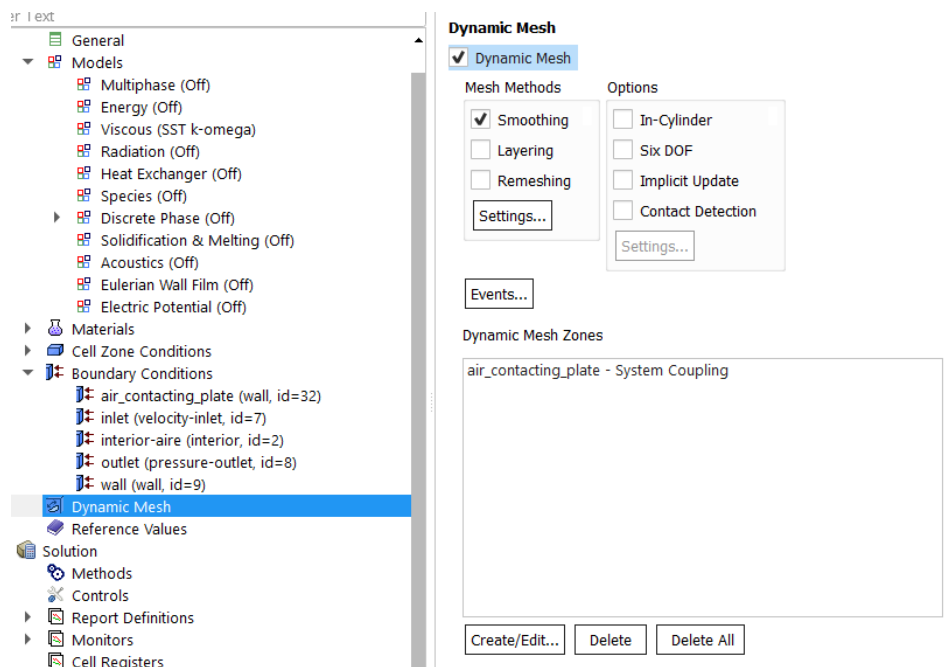


Imagen 74. Dynamic Mesh

Dentro de *create/edit* seleccionamos arriba el conjunto de entidades que representa la interfase fluido-sólido, en este caso *Air_contacting_plate*. En el tipo seleccionamos *System coupling* y damos en *create* para definir esta configuración.

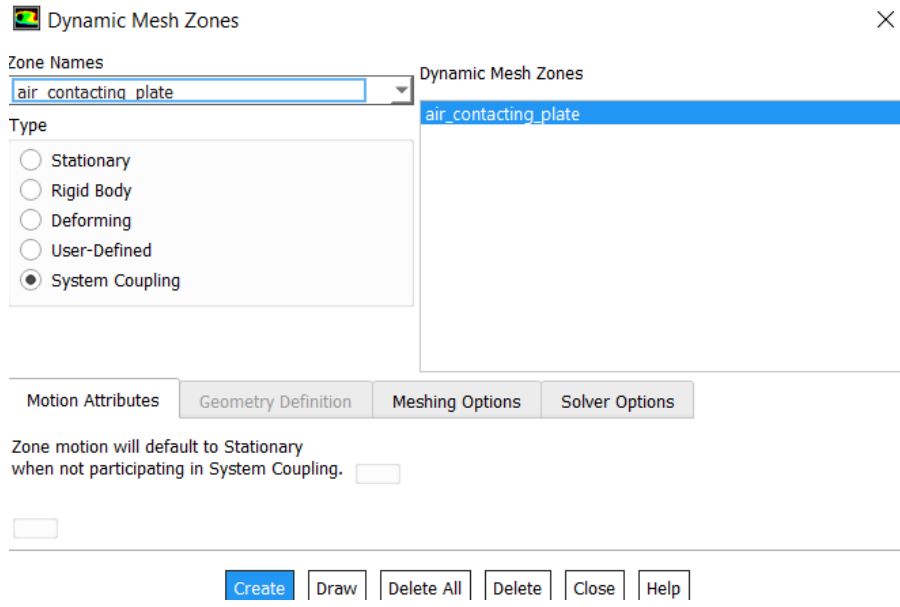


Imagen 75. Create dynamic mesh

Hecho esto, ya podemos cerrar esta interfaz y pasaríamos a configurar el módulo estructural.

6.2. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO TRANSIENT STRUCTURAL.

La configuración de este módulo es prácticamente igual que cuando hicimos la validación del módulo *Static Structural* o en el módulo *Modal*. Lo primero que haremos pues, será importar del material *Copper Alloy* desde *Engineering Data*. Después, entramos al apartado *model* para poner los detalles de nuestro modelo. Una vez dentro de este apartado, lo primero que haremos será suprimir el *body* que representa el fluido, al igual que hicimos en *Fluent* con el sólido de la placa, pero al contrario.

Antes de nada, tendremos que crear la malla, para lo que elegiremos una *Resolution* de 6. Ahora, lo que haremos será crear un informe *Total deformation* y un *Fixed Support* en el mismo extremo de la placa que en el módulo *Modal*. Después crearemos una carga desde *Loads* como hicimos en *Static Structural*, pero esta vez el tipo de carga no será una fuerza, sino que será una carga del tipo *Fluid Solid Interface*. Dentro de su menú, pondremos *Named*



Selection en Scoping Method y seleccionaremos Plate_contacting_air como interfase donde se producirán las fuerzas.

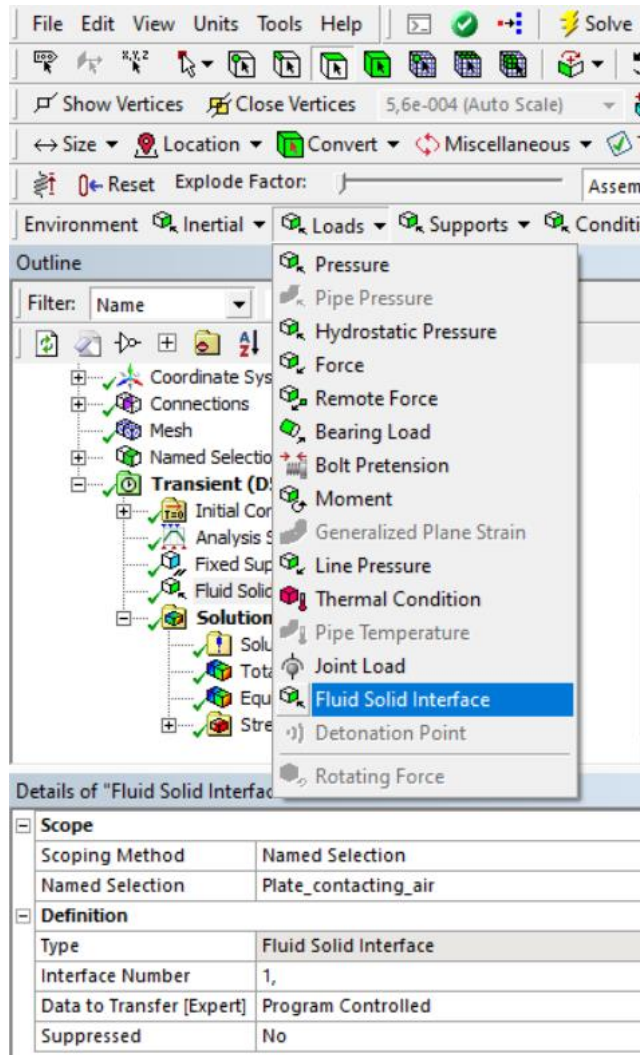


Imagen 76. Loads. Fluid Solid Interface

Después, crearemos dos informes más de cara a la solución, uno para saber el esfuerzo equivalente de Von Mises placa y otro para saber el coeficiente de seguridad (*Stress Tool*). Para seleccionar el *Safety Factor* una vez creado el componente *Stress Tool*, deberemos hacer clic derecho sobre él e insertarlo.

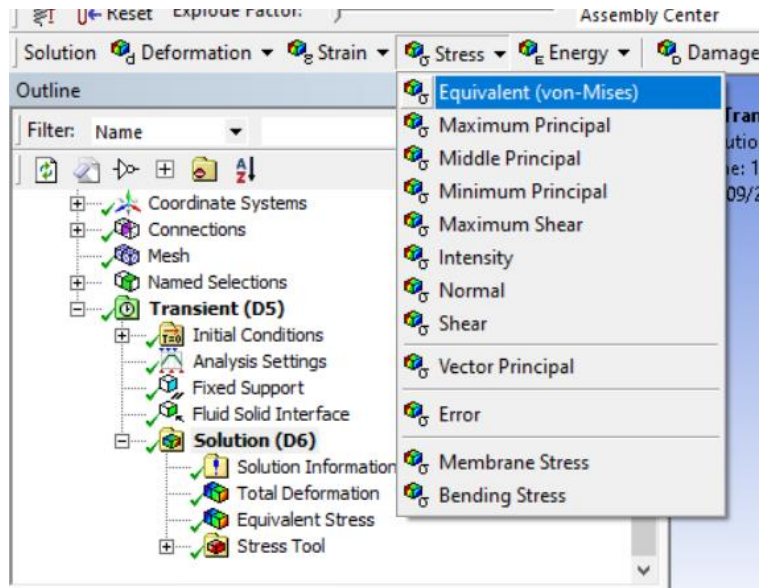


Imagen 79. Equivalent Stress Von Misses

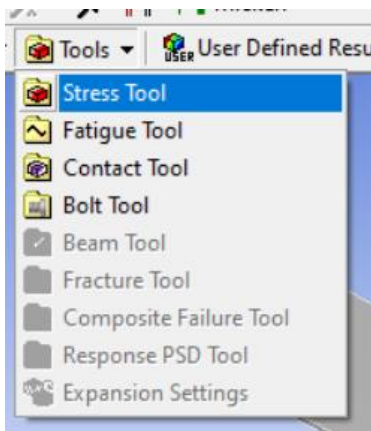


Imagen 77. Stress Tool

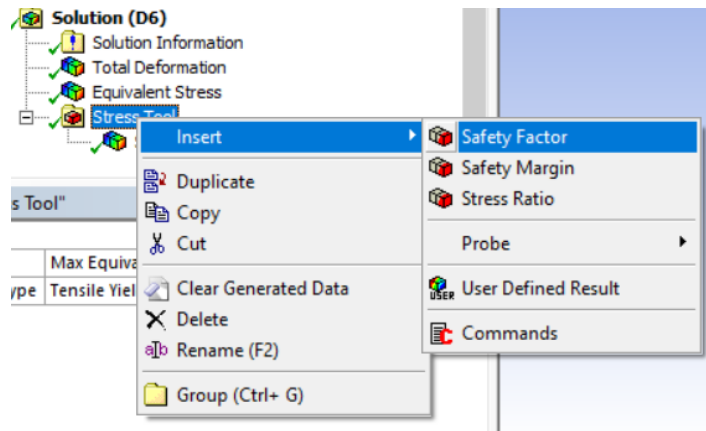


Imagen 78. Safety Factor

Hecho esto, sólo queda configurar los parámetros del apartado *Transient* que deben concordar con los que pusimos en el apartado *Run Calculation* de *Fluent*. Esto es importante, para que el tiempo de simulación de lo que le ocurre a la placa en el acoplamiento con sus correspondientes saltos de tiempo (0.1s) coincidan durante el acoplamiento.



Para ello, dentro del apartado *Transient* vamos a *Analysis Setting* y configuramos los parámetros como aparecen en la siguiente imagen:

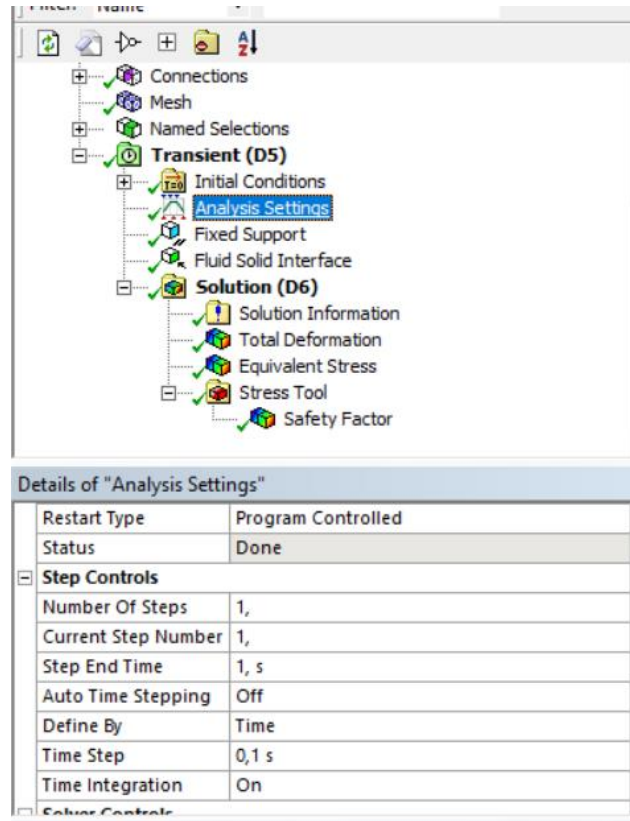


Imagen 80. Analysis Setting

Configurado este apartado, podemos pasar ya a acoplar los módulos.



6.3. ACOPLAMIENTO DE MÓDULOS.

Antes de hacer lo necesario para el acoplamiento de los módulos, debemos asegurarnos de que todos los apartados que hemos configurado en los diferentes módulos aparecen actualizados en el *Workbench*. Si no es así, los actualizamos.

Ahora sí, ya con los apartados que hemos visto actualizados vamos a la lista de módulos en la izquierda del *Workbench* y arrastramos el componente *System Coupling* hasta una zona libre del *Project Schematic*. Después, cogemos de uno en uno el apartado *Setup* de cada uno de los dos módulos y los arrastramos para soltarlos sobre el apartado *Setup* del módulo *System Coupling*. El trazado con todo unido debe quedar como en la siguiente imagen:

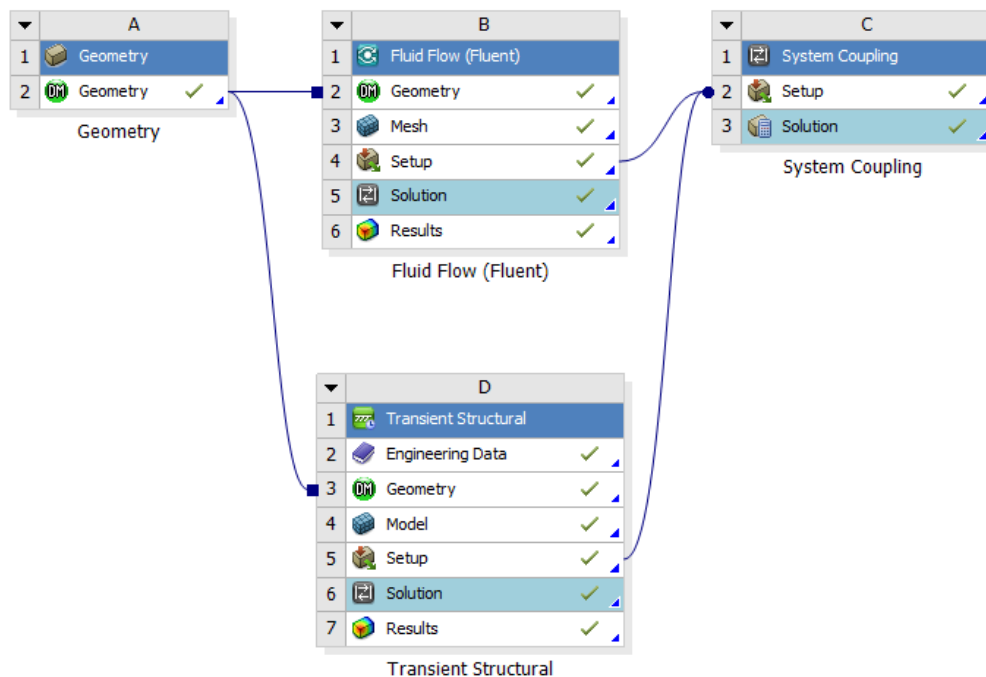


Imagen 81. System Coupling



Una vez hecho esto, entramos al *Setup* de *System Coupling* para configurarlo. Ahí vamos primero a *Analysis Settings* y colocamos los datos de la siguiente imagen, que como se puede ver, concuerdan con los que se habían puesto en los ajustes de los dos módulos:

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. The tree on the left is expanded to 'Analysis Settings'. Below it, the 'Properties of Analysis Settings' dialog box is open, displaying a table of configuration parameters.

	A	B
1	Property	Value
2	Analysis Type	Transient
3	Initialization Controls	
4	Coupling Initialization	Program Controlled
5	Duration Controls	
6	Duration Defined By	End Time
7	End Time [s]	1
8	Step Controls	
9	Step Size [s]	0,1
10	Minimum Iterations	1
11	Maximum Iterations	20

Imagen 82. Ajuste System Coupling

Llegados a este punto, los siguientes ajustes a realizar serán en el apartado *Data Transfer* dependerán de si el análisis es *one-way* o *two-way*.



6.3.1. ANÁLISIS ONE-WAY

Para realizar este tipo de análisis haremos clic derecho en el apartado *Data Transfer* para crear un nuevo *Data Transfer*. Una vez creado, se ajustará el apartado para que la itinerancia de datos (unidireccional) sea desde el módulo *Fluent* hacia el módulo *Transient Structural*, eligiendo como foco del intercambio de datos la zona de la interfase entre el sólido y el fluido. De esta forma, la configuración quedará como en la imagen:

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface with the 'Data Transfers' tree expanded. A 'Data Transfer' entry is selected, and its properties are displayed in a table below. The table is divided into two columns, A and B, representing the source and target of the data transfer.

Properties of DataTransfer : Data Transfer		
	A	B
1	Property	Value
2	Source	
3	Participant	Fluid Flow (Fluent)
4	Region	plate_contacting_air-contact_region-src
5	Variable	force
6	Target	
7	Participant	Transient Structural
8	Region	Fluid Solid Interface
9	Variable	Force
10	Data Transfer Control	
11	Transfer At	Start Of Iteration
12	Under Relaxation Factor	1
13	RMS Convergence Target	0,01
14	Ramping	None

Imagen 83. Configuración one-way

Hecho esto sólo nos queda ejecutar la simulación para obtener los resultados del acoplamiento *one-way*.



6.3.2. ANÁLISIS TWO-WAY

La configuración para un análisis de este tipo introduce un cambio respecto al anterior. Esta vez en vez de crear un solo *Data Transfer*, crearemos dos. En el primero colocaremos la misma información que colocamos para el análisis *one-way*, en el segundo colocaremos la información de forma “invertida” para que esta transferencia de datos que nos encontramos definiendo sea en la otra dirección, es decir, del módulo *Transient Structural* hacia el módulo *Fluent*. Haciendo esto, el segundo *Data Transfer* queda de la siguiente forma:

Properties of DataTransfer : Data Transfer 2	
A	B
Property	Value
Source	
Participant	Transient Structural
Region	Fluid Solid Interface
Variable	Incremental Displacement
Target	
Participant	Fluid Flow (Fluent)
Region	air_contacting_plate
Variable	displacement
Data Transfer Control	
Transfer At	Start Of Iteration

Imagen 84. Configuración two-way

Configurado esto, ya se puede pasar a ejecutar el análisis *two-way*.



6.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO.

En este apartado se van a presentar los resultados del acoplamiento de módulos. Cabe destacar, que, debido al coste computacional de las simulaciones de este tipo, las que en este TFG se han realizado, han sido para 1 segundo de tiempo con saltos de 0.1 segundos. Para ver mejor las oscilaciones, lo conveniente sería realizar una simulación con saltos más cortos y durante más tiempo. Así también se podría estimar la frecuencia para ver si en algún momento se produce el fenómeno de la resonancia que se describió en el análisis modal.

De este modo, los datos que se van a exponer serán los de los desplazamientos de la placa a lo largo de ese segundo y los esfuerzos que ha sufrido a lo largo de él. Los datos del coeficiente de seguridad no se van a exponer ya que en ningún momento este bajó de 11 en ninguna de las simulaciones, por lo que no resulta significativo.

Ya que se realizaron simulaciones del tipo *one-way* y del tipo *two-way* a diferentes velocidades, se a van a dar los detalles de estas en dos apartados individuales.

6.4.1. RESULTADOS ONE-WAY.

- **10 m/s**

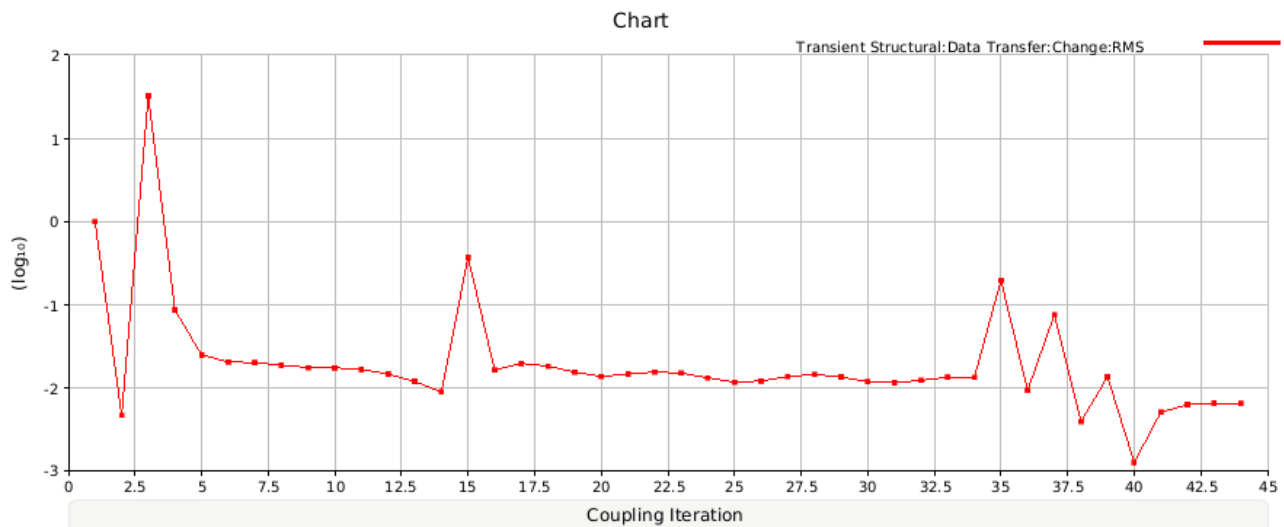
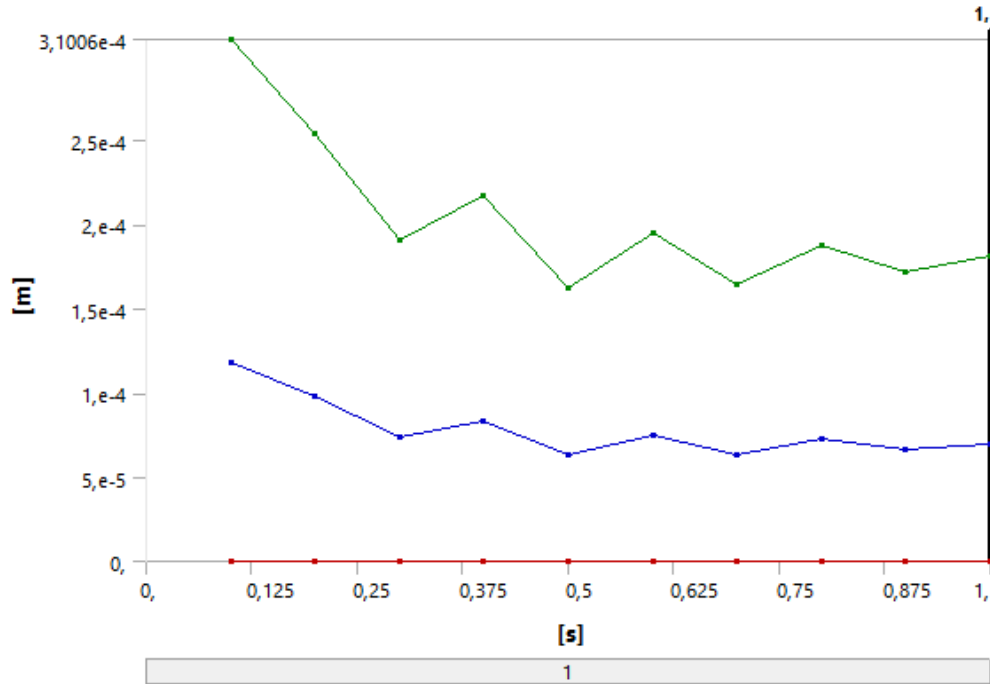
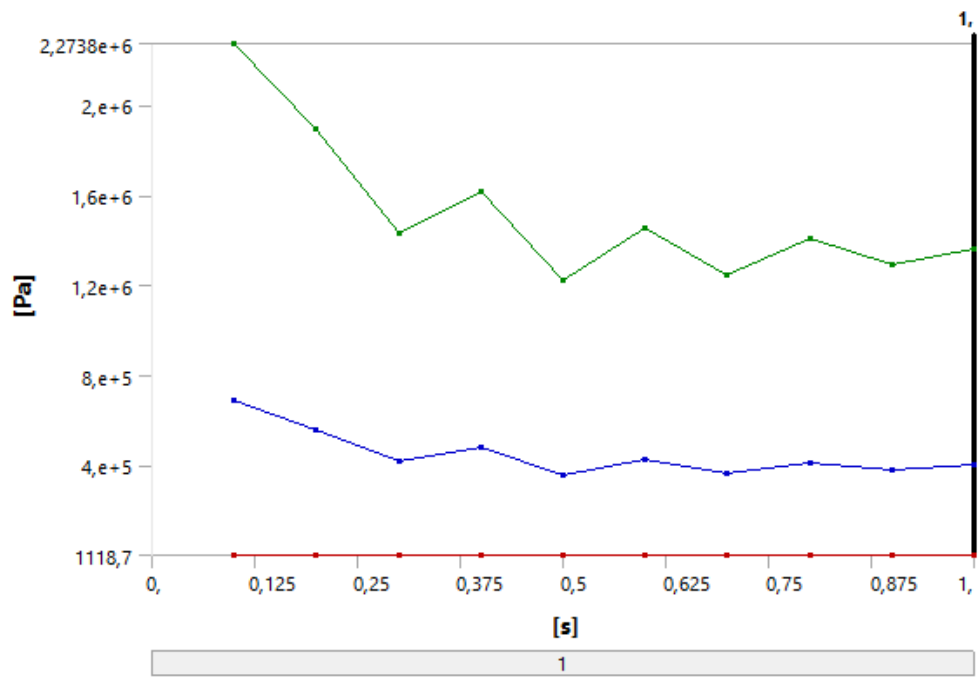


Imagen 85. Itinerancia de datos



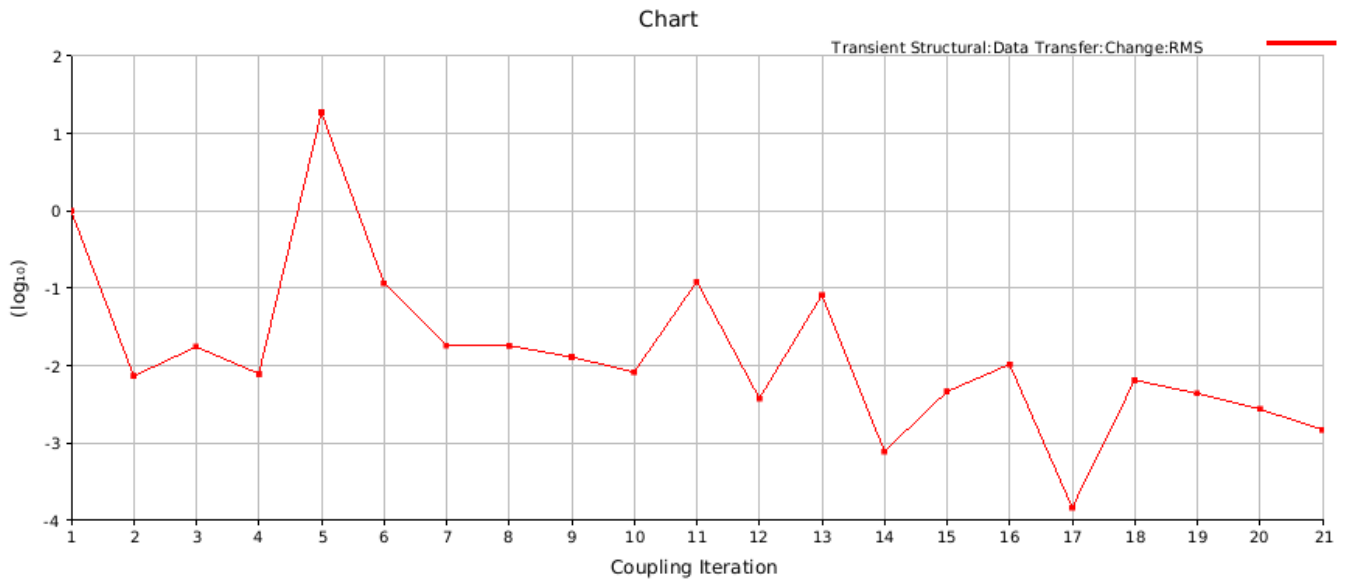
Gráfica 4. Deformación máxima (verde) y media (azul)



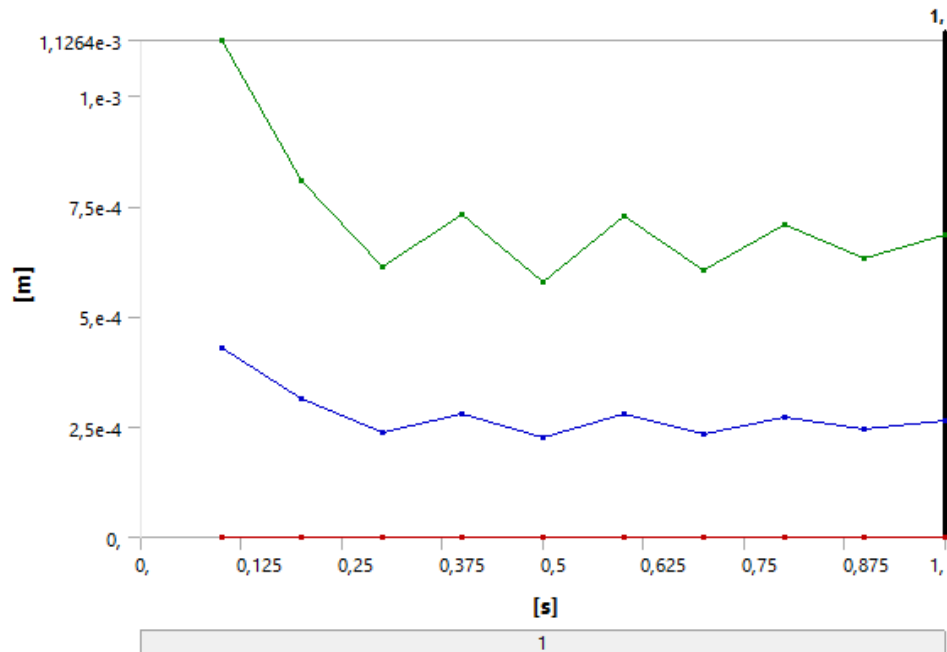
Gráfica 3. Tensión máxima (verde) y media (azul)



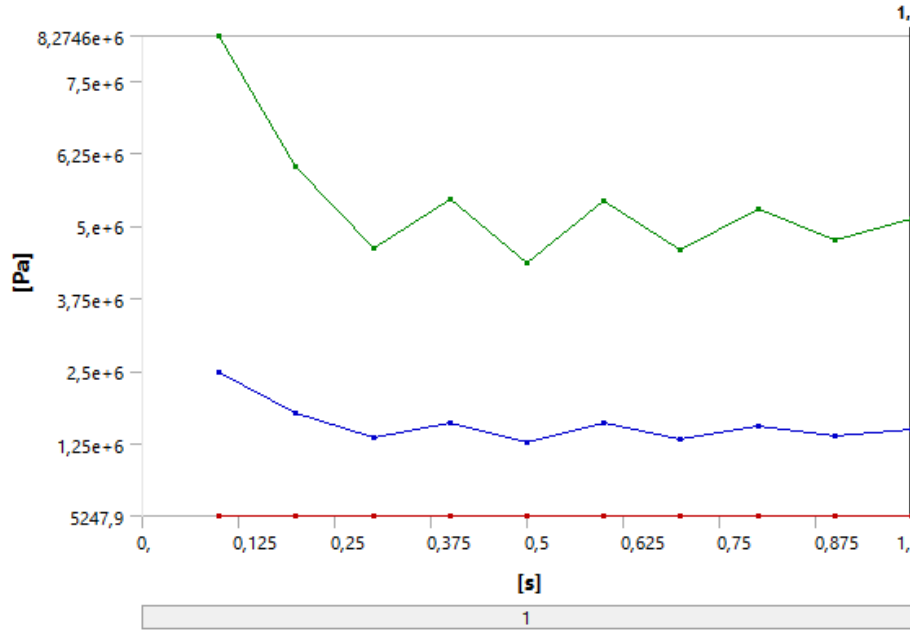
- 20 m/s



Gráfica 5. Itinerancia de datos

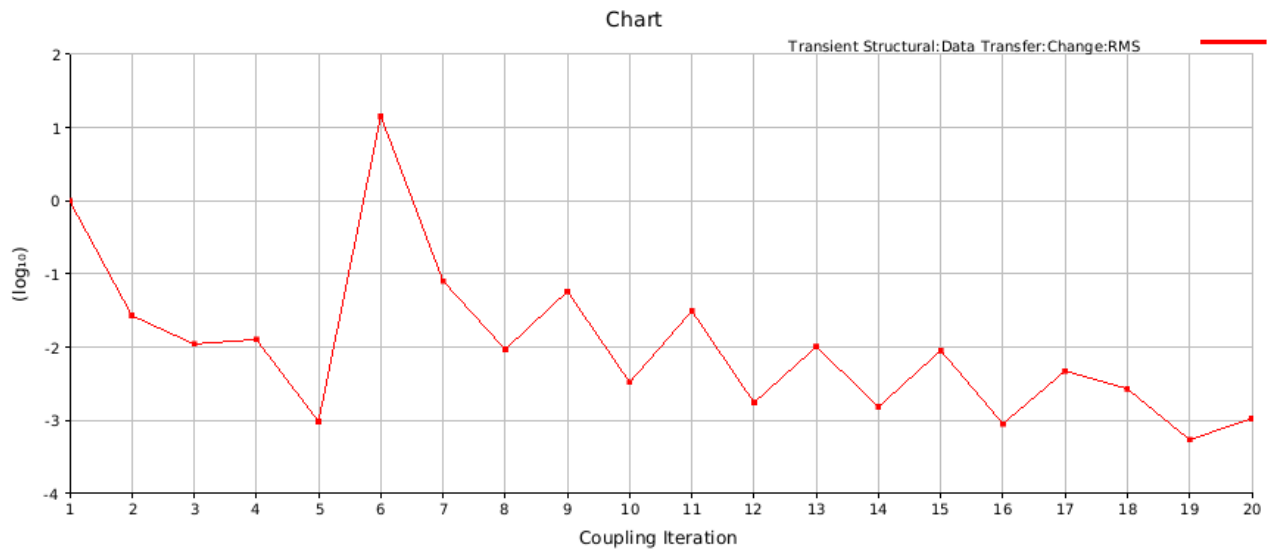


Gráfica 6. Deformación máxima (verde) y media(azul)

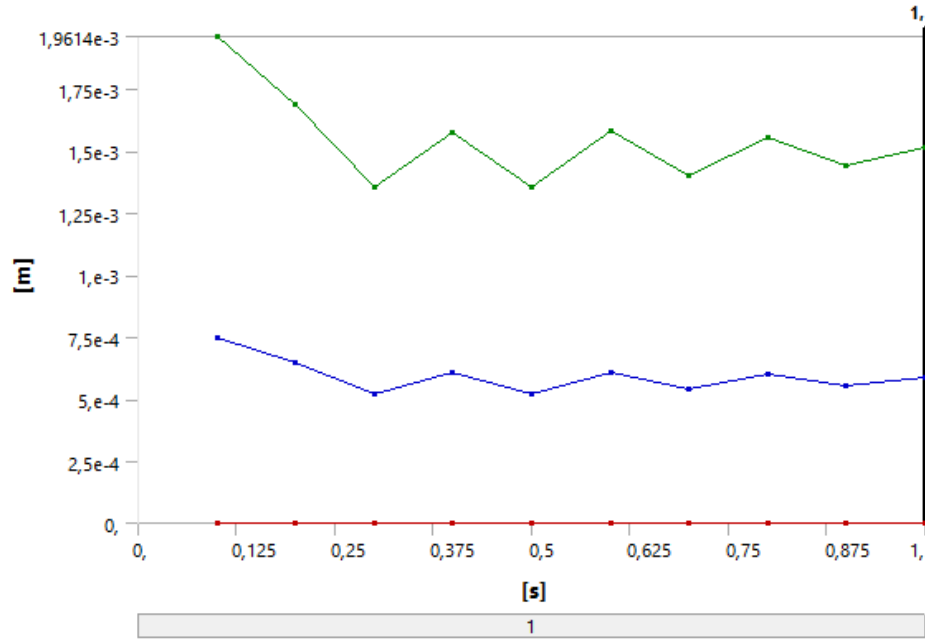


Gráfica 7. Tensión máxima (verde) y media(azul)

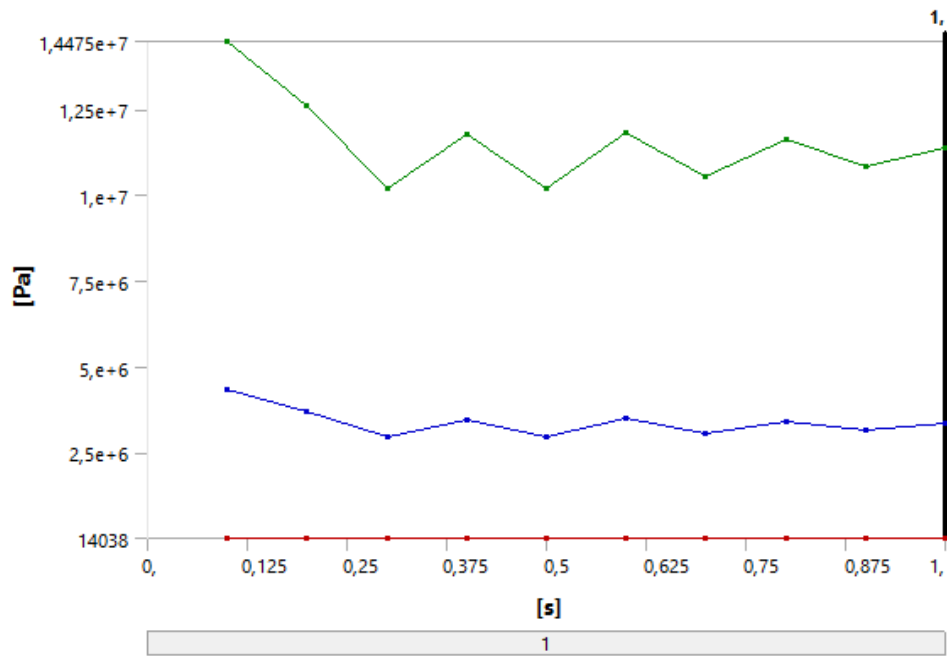
- 30 m/s



Gráfica 8. Itinerancia de datos



Gráfica 10. Deformación máxima (verde) y media (azul)

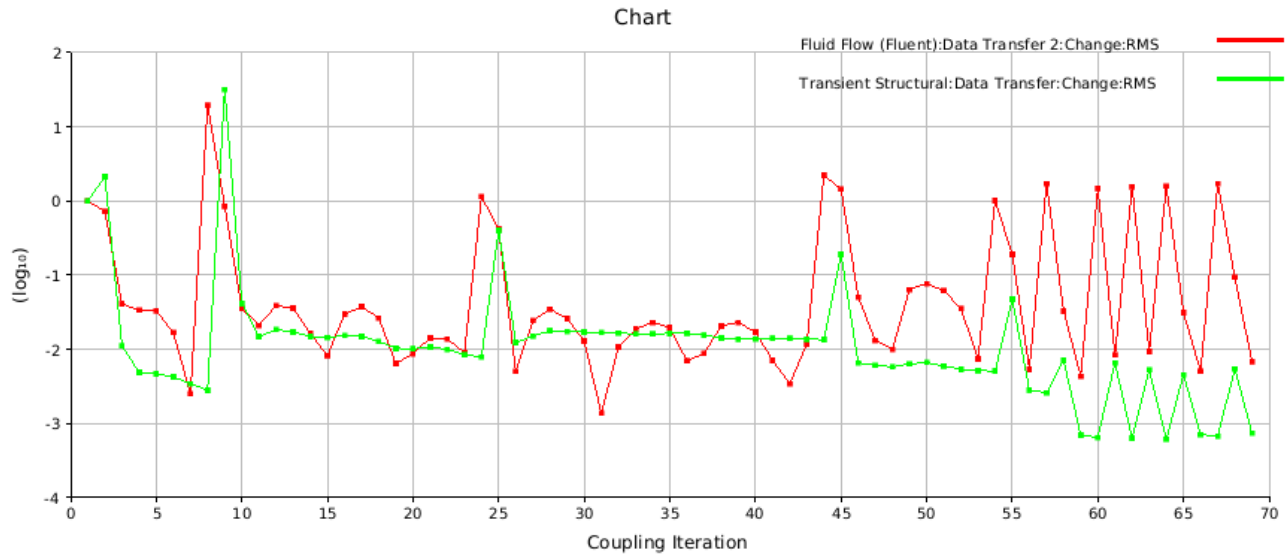


Gráfica 9. Tensión máxima (verde) y media (azul)

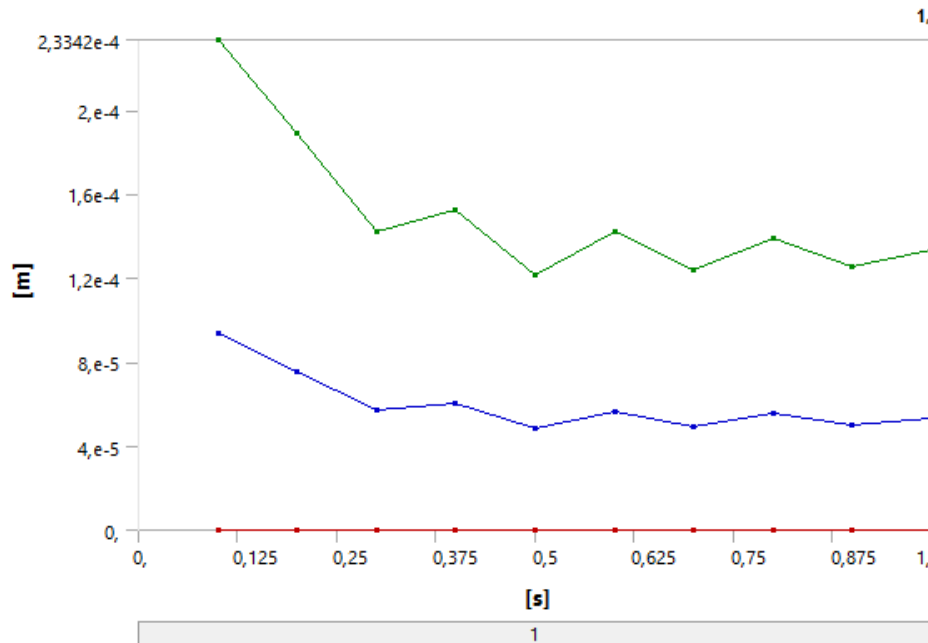


6.4.2. RESULTADOS TWO-WAY.

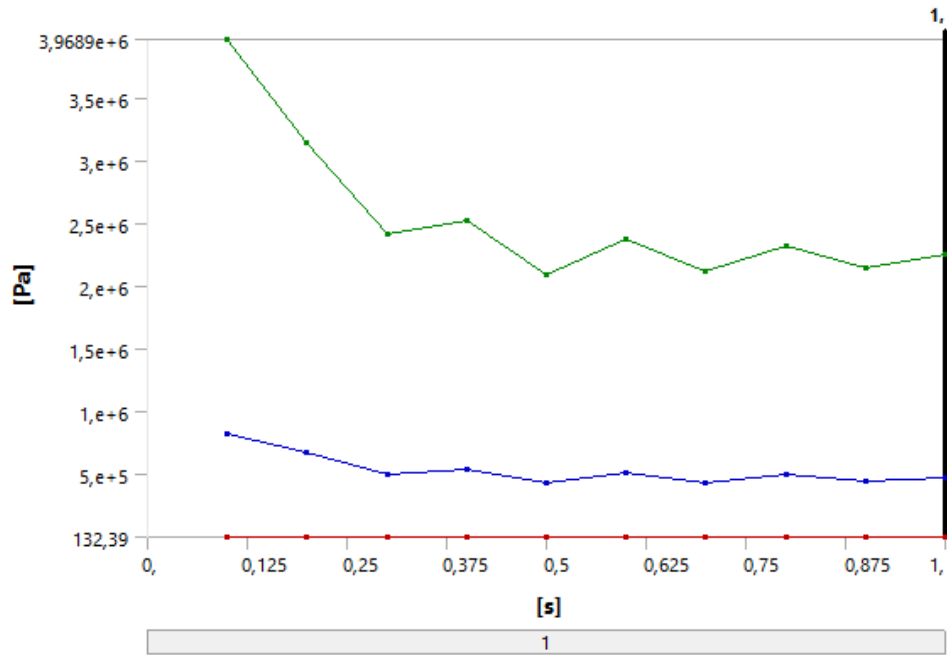
- 10 m/s



Gráfica 12. Itinerancia de datos

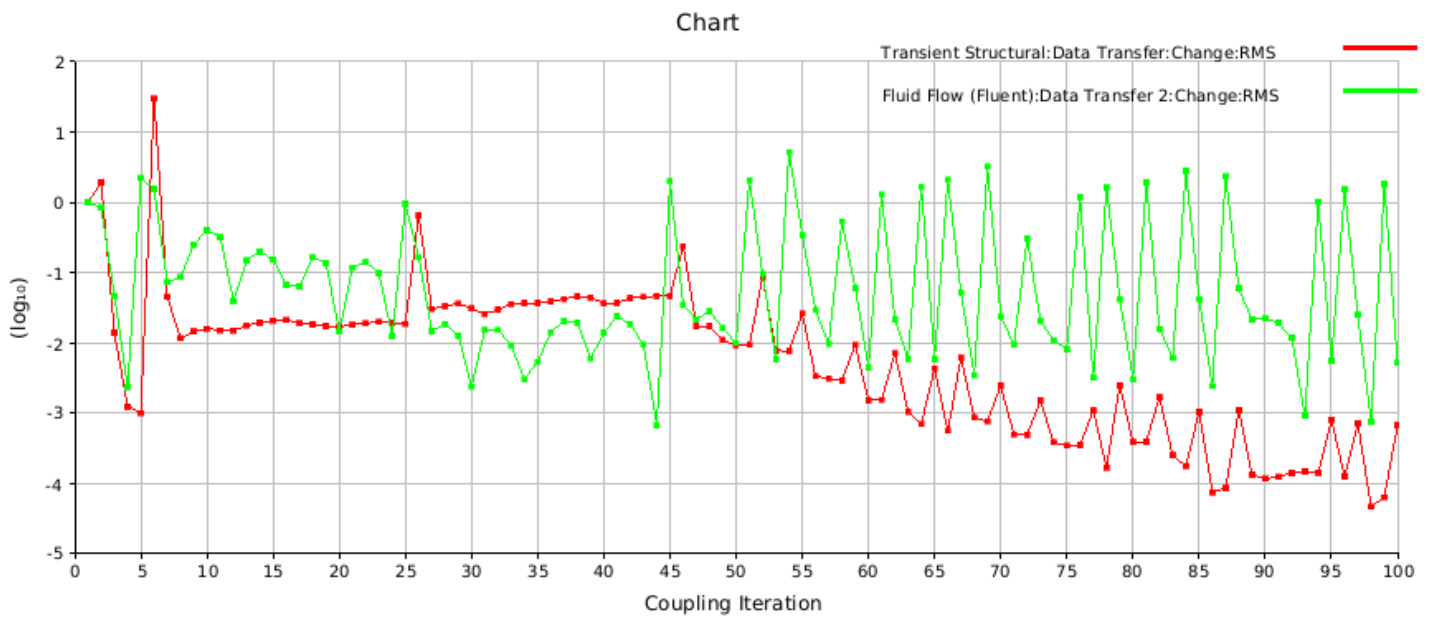


Gráfica 11. Deformación máxima (verde) y media(azul)

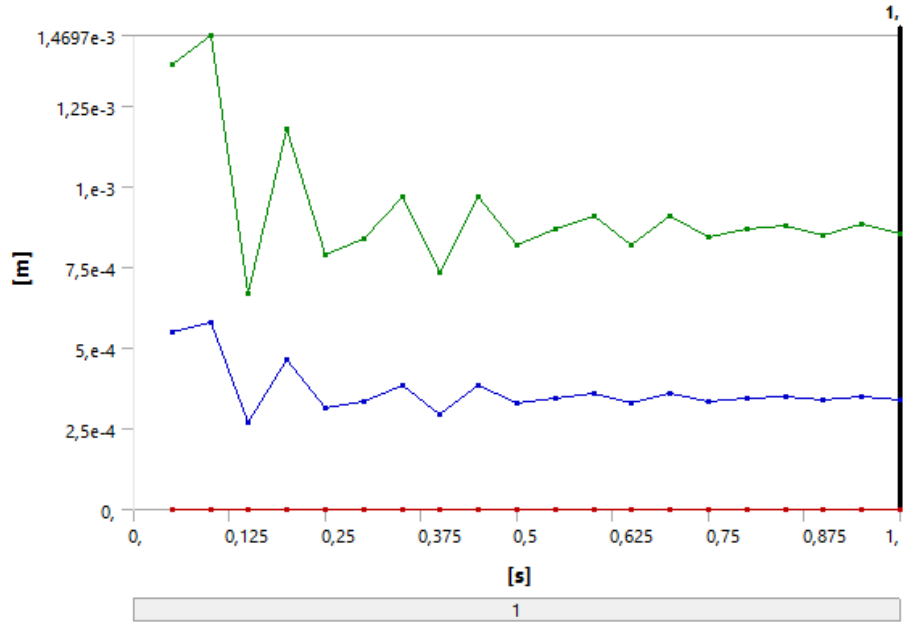


Gráfica 13. Tensión máxima (verde) y media(azul)

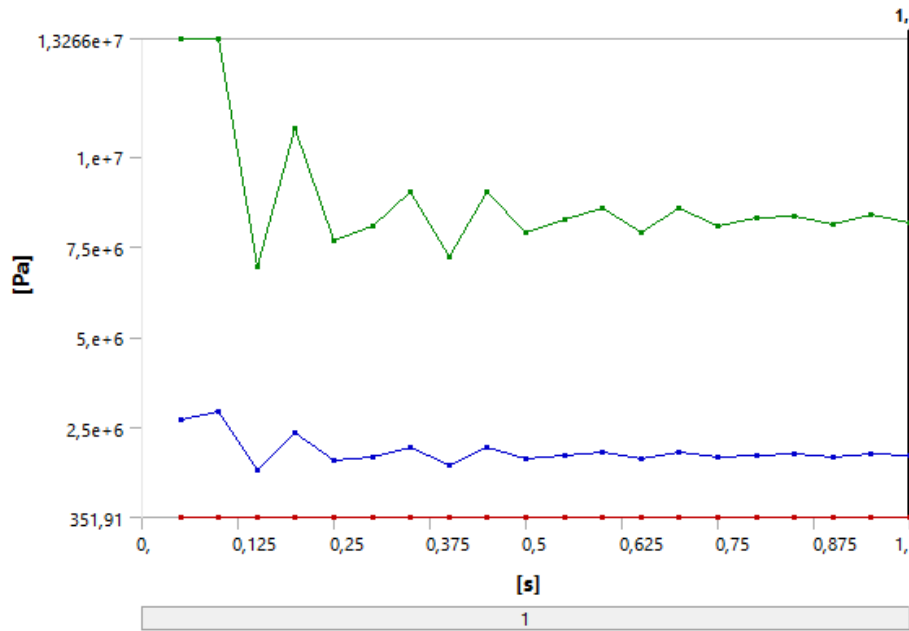
- 20 m/s



Gráfica 14. Itinerancia de datos



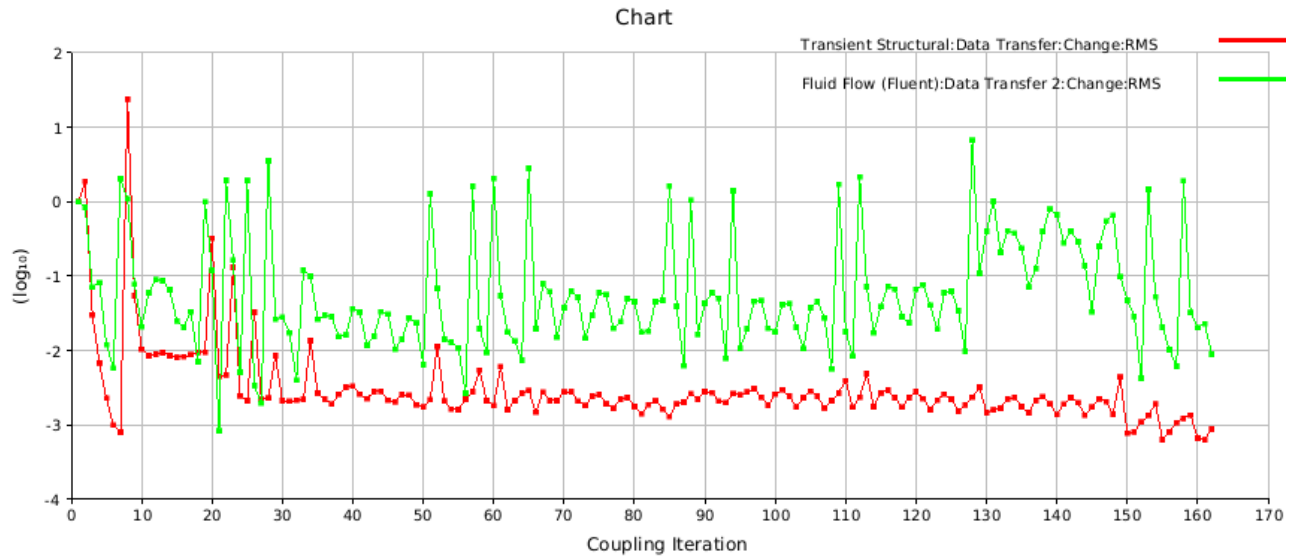
Gráfica 16. Deformación máxima (verde) y media(azul)



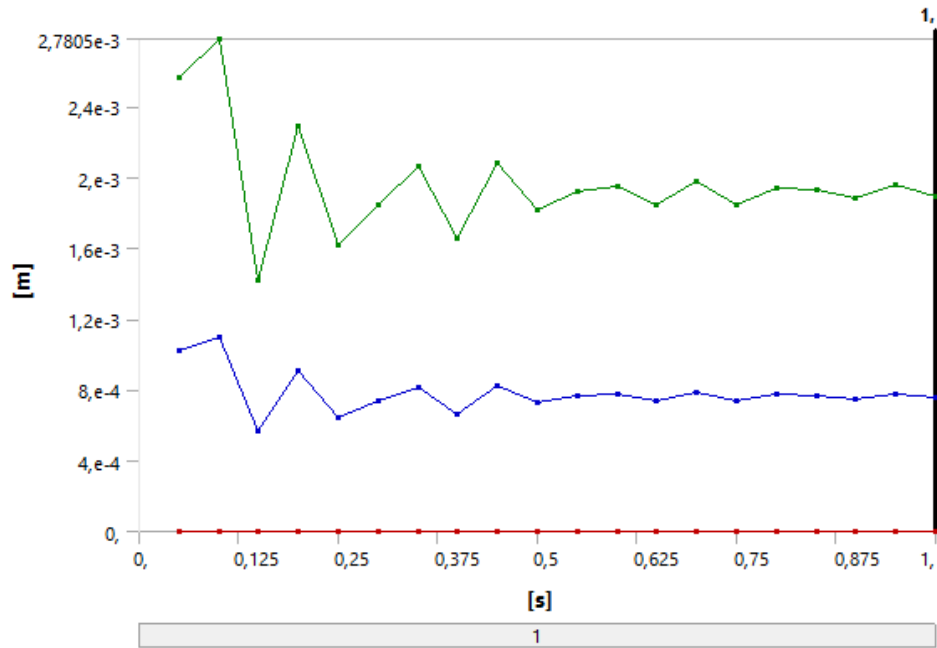
Gráfica 15. Tensión máxima (verde) y media(azul)



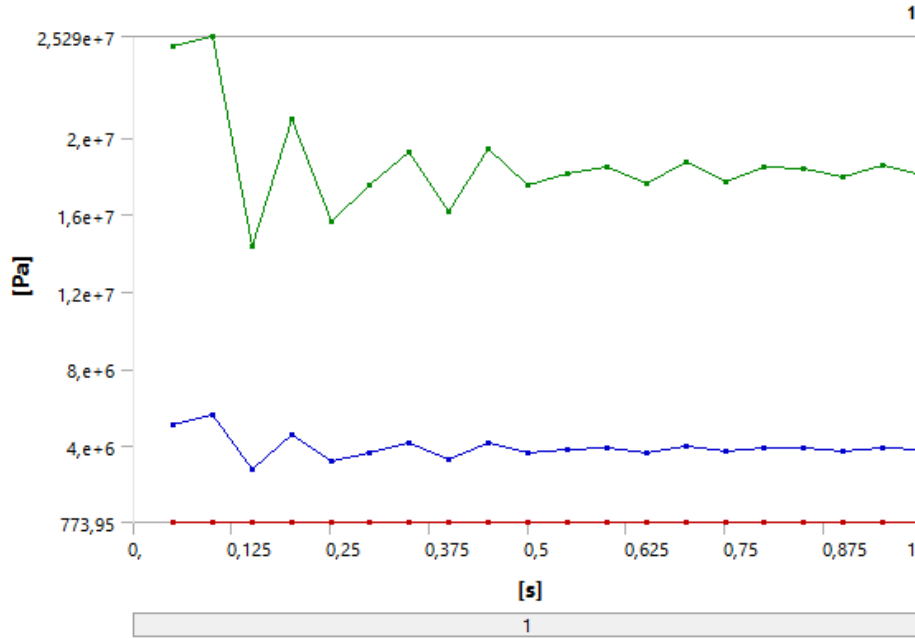
- 30 m/s



Gráfica 17. Itinerancia de datos



Gráfica 18. Deformación máxima (verde) y media(azul)



Gráfica 19. Tensión máxima (verde) y media(azul)

6.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS SIMULACIONES.

Como hemos podido ver en las gráficas, los resultados resultan bastante congruentes a pesar, de que solo hemos podido ver lo que pasaba en 1 segundo de tiempo de exposición de la placa al viento. Vemos que conforme aumenta la velocidad, las deformaciones máximas se producen en un rango de valores más alto. En cuanto a la diferencia entre el análisis *one-way* y el *two-way*, no se observan grandes diferencias en los resultados.

Por otro lado, quiero hacer mención de un problema que se tuvo durante las simulaciones *two-way* para 20 y 30 m/s. Este problema fue mostrado en la ventana de comandos del *setup* del acoplamiento como “*negative cell volumen detected*”. Tras investigar el origen de este problema se detectó que lo que estaba ocurriendo se debía al movimiento de la malla (malla dinámica). Esta se estaba moviendo más rápido de lo que el programa podía capturar en el *time step* de 0.1s, por lo que detectaba un volumen negativo de celda en las proximidades de la interfase. Para solucionar esto, se bajó el *time step* a 0.05s, por eso se puede ver que en las



gráficas de las simulaciones *two-way* de 20 y 30 m/s hay más puntos en el mismo intervalo de 1 segundo (el salto temporal es más pequeño). Además, también se realizaron cambios en otro parámetro, el *Spring Constant Factor*, que determina el amortiguamiento de las celdas de la malla cuando está en movimiento. Este parámetro fue bajado de 0.1 a 0.05, consiguiendo así que el movimiento de la malla fuera más estable. Por último, y como aclaración, cabe mencionar que este problema no se dio en las otras simulaciones, o bien porque el movimiento de las celdas en la malla fue menor, en el caso del análisis *two-way* de 10 m/s, o porque había menos brusquedades en el movimiento de las celdas, en el caso de las simulaciones *one-way*.

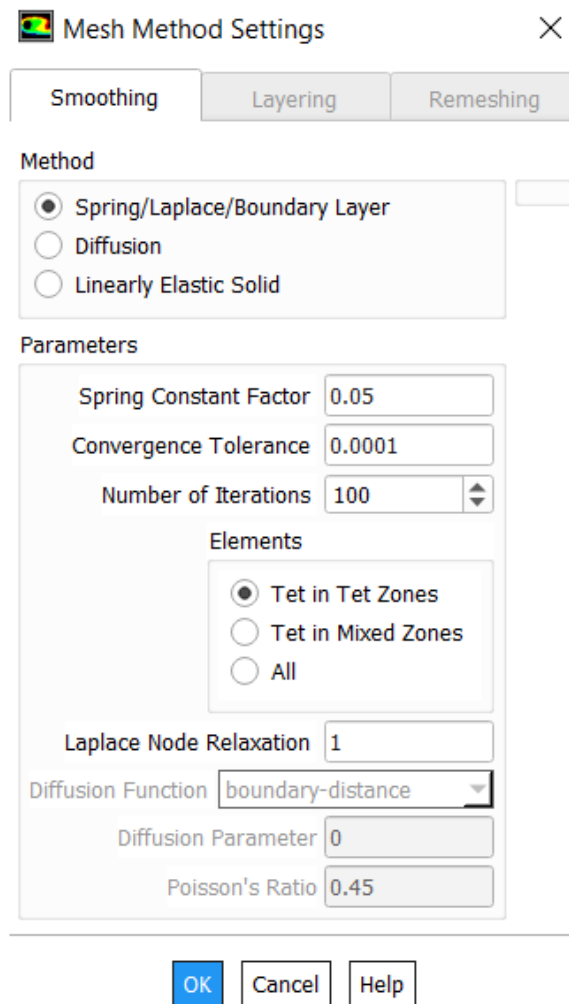


Imagen 86. Spring Constant Factor



7. CONCLUSIONES DEL TFG.

Para finalizar esta memoria, se va a realizar un análisis general del trabajo, tanto a nivel de resultados, como a nivel de los nuevos conocimientos adquiridos en la/s materia/s que comprende este TFG, detallando paralelamente aquellos aspectos que fueron importantes en cada fase.

Inicialmente, en las fases previas a la realización de los cálculos, se realizó una importante revisión bibliográfica, donde, además de los estudios que se comentaron al principio de este trabajo, fue muy importante establecer primero una base teórica sólida, primeramente, en el terreno de la Mecánica de Fluidos. En este marco, se hizo un estudio inicial sobre Mecánica de Fluidos progresivo, empezando por los conceptos más básicos como la viscosidad o las ecuaciones de Navier-Stokes, hasta llegar al objetivo real que era entender qué eran, cómo se obtenían y para qué servían los modelos de turbulencia. Posteriormente, se realizó también un estudio acerca del concepto de la aeroelasticidad y el fenómeno de las vibraciones de estructuras, incluyendo dentro de este último el concepto de la frecuencia natural de vibración un material. Todos estos conocimientos, como podemos ver, suponen la base de la interacción fluido-estructura y es por ello, que primero se quiso realizar una buena documentación, para así después poder comprender mejor el conjunto de nuestro problema de estudio.

Para darle un enfoque más específico a la base de conocimientos que establecimos inicialmente, se realizó una lectura de diversos estudios enfocados en la interacción fluido-estructura, en los cuales pudimos encontrar enfoques de todo tipo: algunos más enfocados al desarrollo teórico, otros en la parte computacional, otros en la experimental y otros en las aplicaciones prácticas del caso de estudio que allí se nos presentaba.

Otra labor de investigación que se ha realizado ha sido la que se ha hecho para comprender bien el software que se iba a utilizar, *ANSYS*, aunque en este caso ya contábamos con conocimientos básicos previos. Sin embargo, se estudió más en profundidad la configuración de los módulos *Fluent*, *Modal*, *Transient Structural*, *Static Structural* y *System coupling* en todos



sus apartados. En este proceso se pretendió no sólo entender cómo configurar cada apartado, sino también el porqué teórico en el que se basaban las distintas opciones que el programa ofrecía. Esto último es muy importante, ya que, para trabajar con un software de resolución de problemas de física, se debe entender cómo trabaja el programa y qué es lo que hace en sus cálculos para así poder llevar las simulaciones en la dirección que realmente se quiere.

Ya dentro del entorno computacional, durante este TFG hemos aprendido sobre todo una lección muy importante: en un software de elementos finitos, y sobre todo cuando tratamos con fluidos, la malla es el elemento base que puede facilitar o complicar los cálculos y que por tanto la buena realización de esta puede ayudar a evitar posteriores problemas. Por otro lado, el haber dedicado un tiempo considerable a ANSYS ha hecho que nos hayamos podido familiarizar un poco más con él y con su entorno y también que nos demos cuenta de que las posibilidades de cálculo con este programa son increíblemente amplias. Una de las opciones más completas que trae este software, y en la que hemos podido iniciarnos gracias a este TFG, ha sido el acoplamiento de dos módulos para problemas de multifísica, en nuestro caso FSI. Con esto hemos podido ver que hay principalmente dos formas de tratar este tipo de estudios, de forma unidireccional o *one-way* y de forma bidireccional o *two-way*.

En cuanto a las simulaciones en sí, hay que destacar que hemos aprendido a resolver ciertos problemas cuando se nos presentan errores o incongruencias en ellas. Ejemplos de ello son los problemas de escala que encontramos en la validación 2D en *Fluent* o el error de volumen negativo de celda que nos devolvía el programa al realizar algunas simulaciones *two-way*. En cuanto a los resultados de las simulaciones en general, hemos podido apreciar, sobre todo en las de los acoplamientos, el gran coste computacional que pueden llegar a tener. Este último es uno de los factores que más han influido en el hecho de que las simulaciones del acoplamiento se realizaran para un solo segundo.

Por, último, en cuanto a los resultados finales obtenidos, en el segundo simulado se ha podido ver en las gráficas que la placa oscila al principio pero que la tendencia en cuanto a intensidad



es descendente y que, por lo tanto, tiende a estabilizarse. Sin embargo, para constatar esto, y para verificar si se produce o no el fenómeno de la resonancia, convendría realizar una simulación con escalones de tiempo pequeños y para un tiempo de estudio de 10 segundos o más, de manera que se pueda ver todo lo mencionado con más claridad. Además, de cara a aumentar las vibraciones de la placa para un posible aprovechamiento energético, un estudio que sería interesante realizar en el futuro es el de colocar un objeto que genere turbulencias delante de la placa, como por ejemplo un cilindro.



8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] I.P.G. Sopan Rahtika, I.N.G. Wardana, A.A. Sonief, E. Siswanto. Numerical and experimental investigation on the flutter of the cantilevered plates with free leading edge in axial flow. *Journal of Engineering Science and Technology* (2017) 2805 – 2825.
- [2] Tahereh Liaghat. Two-way fluid-structure coupling in vibration and damping analysis of an oscillating hydrofoil. *Université de Montréal* (2014).
- [3] G. De Nayer, M. Breuer. Numerical FSI investigation based on LES: Flow past a cylinder with a flexible splitter plate involving large deformations (FSI-PfS-2a). *International Journal of Heat and Fluid Flow* 50 (2014) 300–315.
- [4] R.K.B. Gallegos, and R.N. Sharma. Dynamic Behaviour of a Flexible Plate behind a Circular Cylinder: Numerical Study on the Effects of Blockage and Cylinder Size 20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth, Australia 5-8 December 2016.
- [5] Lin Huang, You-Lin Xu, Haili Liao. Nonlinear aerodynamic forces on thin flat plate: Numerical study.
- [6] K. M. Lam & C. T. Wei (2010) Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Inclined Flat Plate, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4:4, 569-579.
- [7] Robert N. Meroney and David E. Neff. Wind effects on roof-mounted solar photovoltaic arrays: CFD and wind-tunnel evaluation.
- [8] S. Chad Gibbs, Ivan Wang, Earl Dowell. Theory and experiment for flutter of a rectangular plate with a fixed leading edge in three-dimensional axial Flow.
- [9] Dhaval R. Shiyani. CFD Simulation of Flat Plate Aerodynamics at high angles of attack.
- [10] Andriopoulou Symeoni. MSc “Environmental Engineering & Sustainable Infrastructure” [TSC-MT 12-017].
- [11] Matthias Kortleven. Bachelor Thesis “Simulation Verification and Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine using CFD”.



- [12] Liaosha Tang a,c, Michael P. Paidoussis, Jin Jiang. *Cantilevered flexible plates in axial flow: Energy transfer and the concept of flutter-mill*. *Journal of Sound and Vibration* 326 (2009) 263–276.
- [13] Kanjuro Makiyama and Shigeru Shimose. *Supersonic Flutter Utilization for Effective Energy-Harvesting Based on Piezoelectric Switching Control*.
- [14] ESDU 70015. *Fluid forces and moments on flat plates*.
- [15] Pablo Castillo Andreu. TFG “Estudio sobre la interacción fluido-estructura producida por la acción del viento alrededor de una placa plana flexible alineada con el flujo mediante simulación numérica”
- [16] <http://bibinq.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+2.pdf>
- [17] <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node396.htm>
- [18] [https://www.researchgate.net/post/How to fix Negative Cell volume Detected Problem in Ansys fluent for Dynamic meshing](https://www.researchgate.net/post/How_to_fix_Negative_Cell_volume_Detected_Problem_in_Ansys_fluent_for_Dynamic_meshing)
- [19] <https://www.youtube.com/watch?v=Va8umLmqXHW>
- [20] https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_natural
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroelasticity>
- [22] <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node870.htm>
- [23] <https://www.cfd-online.com/Forums/ansys-meshing/152456-overlapping-geometry-contact-regions-ansys-fluent.html>
- [24] [https://www.researchgate.net/publication/254211728 A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions](https://www.researchgate.net/publication/254211728_A_Comparison_of_One-Way_and_Two-Way_Coupling_Methods_for_Numerical_Analysis_of_Fluid-Structure_Interactions)
- [25] [https://www.researchgate.net/publication/226237997 Fundamentals of Fluid-Structure Interaction](https://www.researchgate.net/publication/226237997_Fundamentals_of_Fluid-Structure_Interaction)



[26] <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>

[27] <https://monografias.com/trabajos10/resumen/resumen.shtml>

[28] https://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_mesh

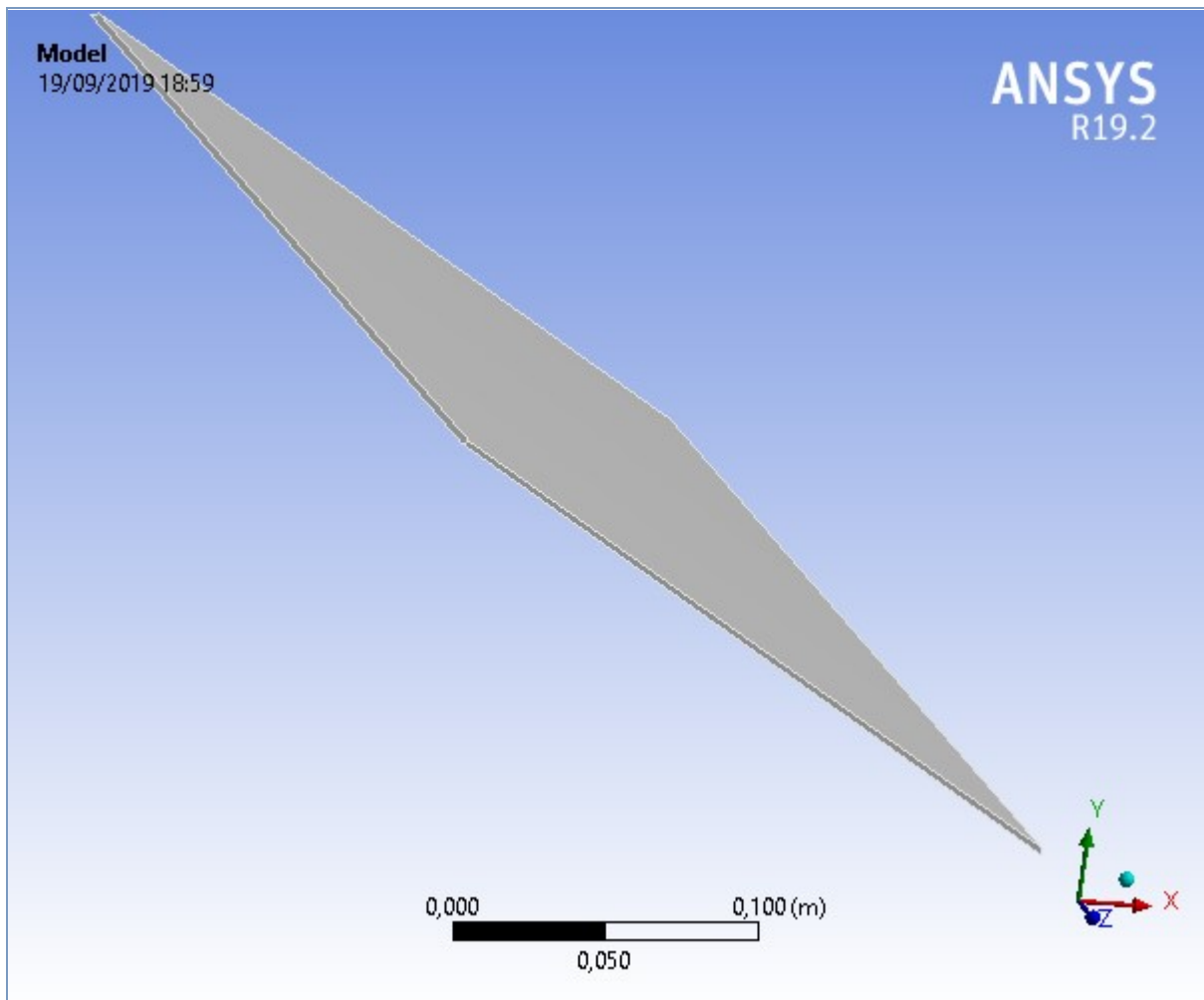


ANEXO: EJEMPLO DE INFORME DE UNA SIMULACIÓN FSI TWO-WAY



Project

First Saved	Tuesday, September 10, 2019
Last Saved	Friday, September 13, 2019
Product Version	19.2 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(D4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Parts](#)
 - [Materials](#)
 - [Copper Alloy](#)
 - [Structural Steel](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Connections](#)
 - [Contacts](#)
 - [Contact Region](#)
 - [Mesh](#)
 - [Named Selections](#)
 - [Transient \(D5\)](#)
 - [Initial Conditions](#)
 - [Modal \(None\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(D6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Results](#)
 - [Stress Tool](#)
 - [Safety Factor](#)
- [Material Data](#)
 - [Copper Alloy](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (D4)

Geometry

TABLE 2
Model (D4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\David\Desktop\TFG\FSI Simulation\FSI_two_30_files\dp0\Geom\DM\Geom.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color

Bounding Box	
Length X	22,717 m
Length Y	10,126 m
Length Z	10,5 m
Properties	
Volume	2,48e-004 m ³
Mass	2,0584 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	2
Active Bodies	1
Nodes	12212
Elements	1682
Mesh Metric	None
Update Options	
Assign Default Material	No
Basic Geometry Options	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Analysis Type	3-D
Clean Bodies On Import	No
Stitch Surfaces On Import	No
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (D4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Placa</i>	<i>Aire</i>
State	Meshed	Suppressed
Graphics Properties		
Visible	Yes	No
Transparency	1	
Definition		
Suppressed	No	Yes
Stiffness Behavior	Flexible	
Coordinate System	Default Coordinate System	
Reference Temperature	By Environment	
Behavior	None	
Material		
Assignment	Copper Alloy	
Nonlinear Effects	Yes	
Thermal Strain Effects	Yes	

Bounding Box		
Length X	0,21651 m	22,717 m
Length Y	0,12573 m	10,126 m
Length Z	0,5 m	10,5 m
Properties		
Volume	2,48e-004 m ³	2415,2 m ³
Mass	2,0584 kg	
Centroid X	4,9869e-004 m	3,75 m
Centroid Y	8,6368e-004 m	3,6597e-004 m
Centroid Z	-2,4591e-016 m	6,2761e-017 m
Moment of Inertia Ip1	4,2884e-002 kg·m ²	
Moment of Inertia Ip2	5,3434e-002 kg·m ²	
Moment of Inertia Ip3	1,0551e-002 kg·m ²	
Statistics		
Nodes	12212	0
Elements	1682	0
Mesh Metric	None	

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (D4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, m
Origin Y	0, m
Origin Z	0, m
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Connections

TABLE 5
Model (D4) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 6
Model (D4) > Connections > Contacts

Object Name	<i>Contacts</i>
State	Suppressed
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies

Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,
Tolerance Value	6,7492e-002 m
Use Range	No
Face/Face	Yes
Face Overlap Tolerance	Off
Cylindrical Faces	Include
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies
Statistics	
Connections	1
Active Connections	0

TABLE 7
Model (D4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	<i>Contact Region</i>
State	Suppressed
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	6 Faces
Target	No Selection
Contact Bodies	Placa
Target Bodies	Aire
Protected	No
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	6,7492e-002 m
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Mesh

TABLE 8
Model (D4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Solver Preference	Mechanical APDL
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	6
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	26,997 m
Average Surface Area	63,902 m ²
Minimum Edge Length	2,8284e-003 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	12212
Elements	1682

Named Selections

TABLE 9
Model (D4) > Named Selections > Named Selections

Object Name	<i>Open Domain</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Wall</i>	<i>Air_contacting_plate</i>	<i>Plate_contacting_air</i>
State	Suppressed					Fully Defined
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	No Selection					6 Faces
Definition						
Send to Solver	Yes					
Protected	Program Controlled					

Visible	Yes				
Program Controlled Inflation	Exclude				
Statistics					
Type	Imported				
Total Selection	6 Faces	1 Face	4 Faces	6 Faces	
Surface Area	1149,7 m ²	106,32 m ²	937,09 m ²	0,25182 m ²	
Suppressed	6	1	4	6	0
Used by Mesh Worksheet	No				

Transient (D5)

TABLE 10
Model (D4) > Analysis

Object Name	<i>Transient (D5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Transient
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 11
Model (D4) > Transient (D5) > Initial Conditions

Object Name	<i>Initial Conditions</i>
State	Fully Defined

TABLE 12
Model (D4) > Transient (D5) > Initial Conditions > Initial Condition

Object Name	<i>Modal (None)</i>
State	Fully Defined
Definition	
Modal Environment	None Available
Pre-Stress Environment	None

TABLE 13
Model (D4) > Transient (D5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Restart Analysis	
Restart Type	Program Controlled
Status	Done
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	5,e-002 s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled

Weak Springs	Off
Large Deflection	On
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	Yes
Combine Restart Files	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Damping Controls	
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0,
Mass Coefficient	0,
Numerical Damping	Program Controlled
Numerical Damping Value	0,1
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\David\Desktop\TFG\FSI Simulation\FSI_two_30_files\dp0 \SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

TABLE 14
Model (D4) > Transient (D5) > Loads

Object Name	<i>Fixed Support</i>	<i>Fluid Solid Interface</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	Named Selection
Geometry	1 Face	
Named Selection		Plate_contacting_air
Definition		
Type	Fixed Support	Fluid Solid Interface
Suppressed	No	
Interface Number		1,
Data to Transfer [Expert]		Program Controlled

Solution (D6)

TABLE 15
Model (D4) > Transient (D5) > Solution

Object Name	<i>Solution (D6)</i>
State	Solved
Solution	
Number Of Cores to Use (Beta)	2,
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	5 h 34 m
MAPDL Memory Used	340, MB
MAPDL Result File Size	85,625 MB
Post Processing	
Beam Section Results	No

TABLE 16
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 17
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Results

Object Name	<i>Total Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0, m	1197,6 Pa
Maximum	1,8902e-003 m	1,8076e+007 Pa
Average	7,5264e-004 m	3,7438e+006 Pa
Minimum Occurs On	Placa	
Maximum Occurs On	Placa	
Minimum Value Over Time		

Minimum	0, m	773,95 Pa
Maximum	0, m	5984,9 Pa
Maximum Value Over Time		
Minimum	1,4145e-003 m	1,4364e+007 Pa
Maximum	2,7805e-003 m	2,529e+007 Pa
Information		
Time	1, s	
Load Step	20	
Substep	1	
Iteration Number	306	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

FIGURE 1
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Total Deformation

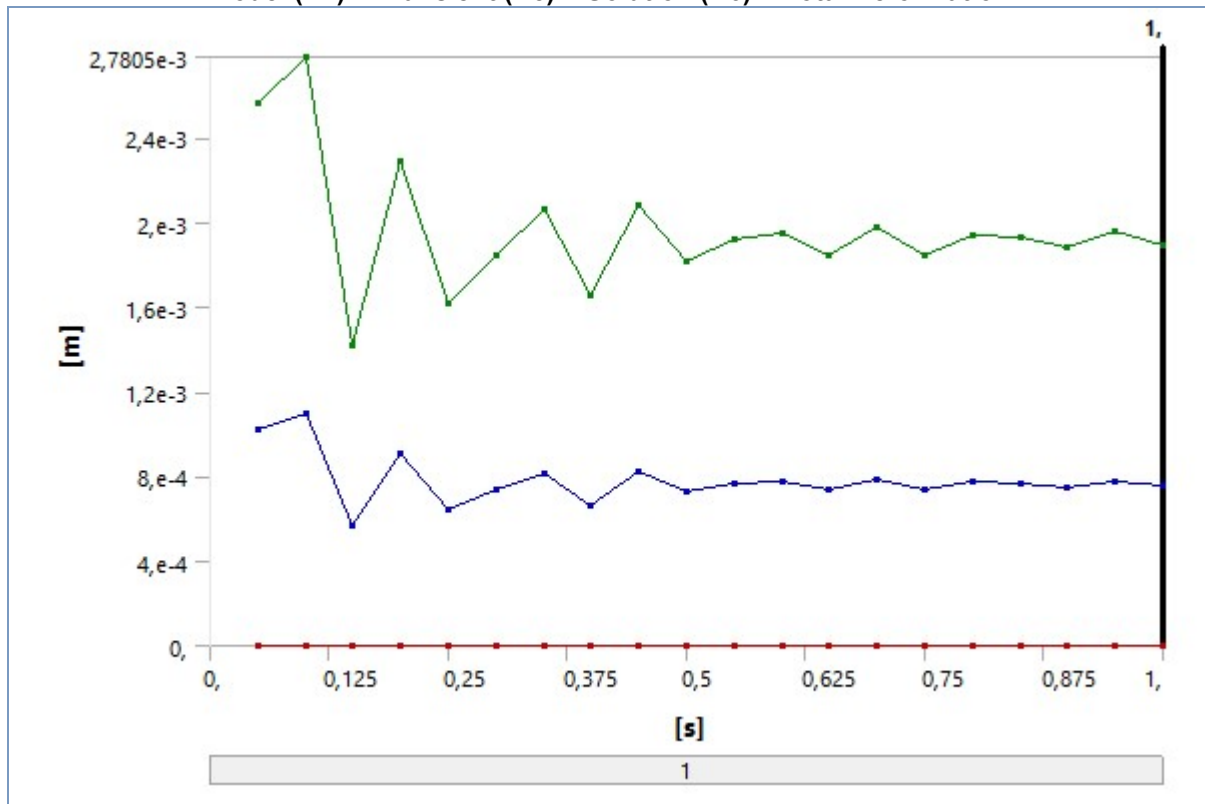


TABLE 18
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
5,e-002	0,	2,5606e-003	1,0205e-003
0,1		2,7805e-003	1,0964e-003
0,15		1,4145e-003	5,6952e-004
0,2		2,2926e-003	9,0539e-004
0,25		1,6129e-003	6,4501e-004
0,3		1,842e-003	7,3311e-004
0,35		2,0639e-003	8,1781e-004
0,4		1,658e-003	6,6409e-004
0,45		2,0852e-003	8,2642e-004
0,5		1,8201e-003	7,2551e-004
0,55		1,9157e-003	7,6176e-004
0,6		1,9473e-003	7,7423e-004
0,65		1,8418e-003	7,3324e-004

0,7	1,9787e-003	7,8619e-004
0,75	1,8481e-003	7,3619e-004
0,8	1,9419e-003	7,7197e-004
0,85	1,9325e-003	7,6833e-004
0,9	1,8807e-003	7,4898e-004
0,95	1,9549e-003	7,7696e-004
1,	1,8902e-003	7,5264e-004

FIGURE 2
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

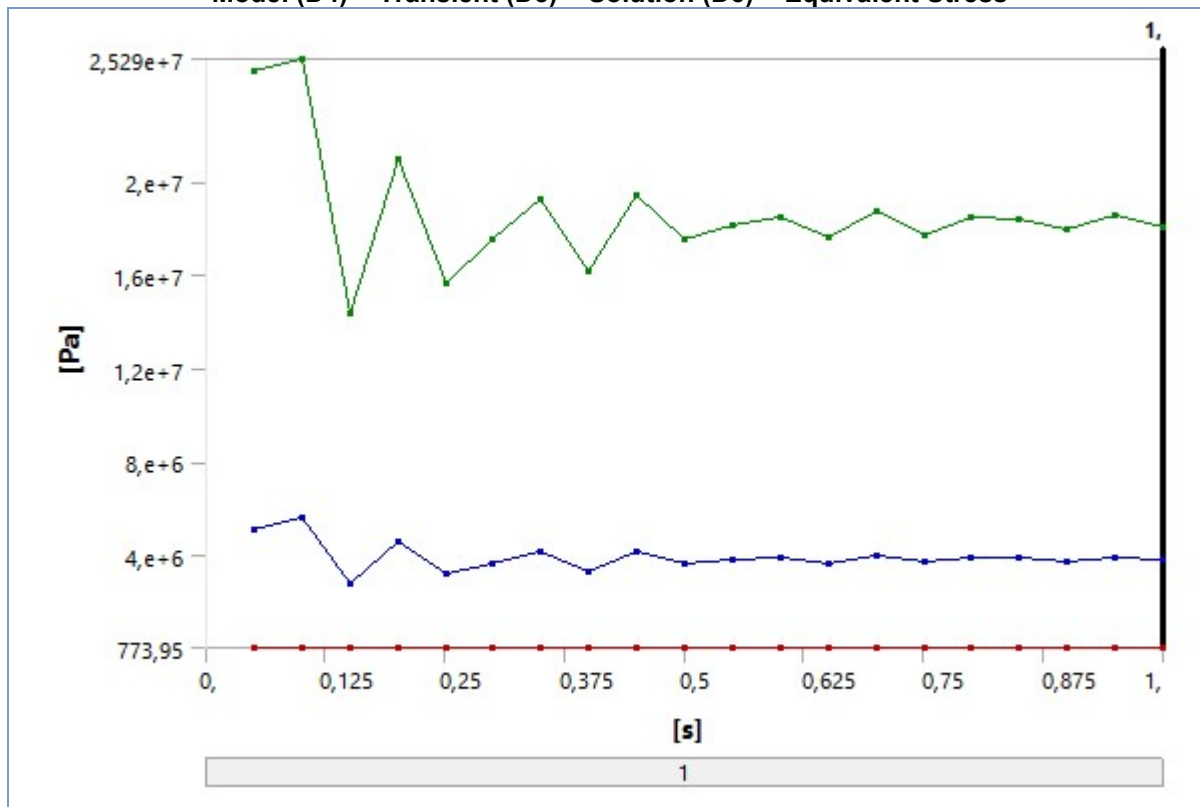


TABLE 19
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
5,e-002	5984,9	2,4781e+007	5,0467e+006
0,1	1865,7	2,529e+007	5,5772e+006
0,15	773,95	1,4364e+007	2,7535e+006
0,2	1612,8	2,1028e+007	4,5932e+006
0,25	1031,8	1,5692e+007	3,1842e+006
0,3	1133,1	1,7582e+007	3,6504e+006
0,35	1406,5	1,9249e+007	4,1179e+006
0,4	1026,3	1,6209e+007	3,2648e+006
0,45	1414,4	1,9472e+007	4,1587e+006
0,5	1094,	1,7525e+007	3,5964e+006
0,55	1245,7	1,8185e+007	3,803e+006
0,6	1248,	1,8486e+007	3,8641e+006
0,65	1121,3	1,7673e+007	3,6439e+006
0,7	1277,	1,8736e+007	3,9292e+006
0,75	1170,7	1,7711e+007	3,6589e+006
0,8	1207,7	1,8491e+007	3,8494e+006
0,85	1204,5	1,8395e+007	3,8321e+006
0,9	1186,1	1,8003e+007	3,7237e+006
0,95	1237,9	1,8576e+007	3,878e+006

1,	1197,6	1,8076e+007	3,7438e+006
----	--------	-------------	-------------

TABLE 20**Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
Definition	
Theory	Max Equivalent Stress
Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material

TABLE 21**Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	> 10
Minimum Occurs On	Placa
Minimum Value Over Time	
Minimum	11,072
Maximum	15,
Maximum Value Over Time	
Minimum	15,
Maximum	15,
Information	
Time	1, s
Load Step	20
Substep	1
Iteration Number	306

FIGURE 3**Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Stress Tool > Safety Factor**

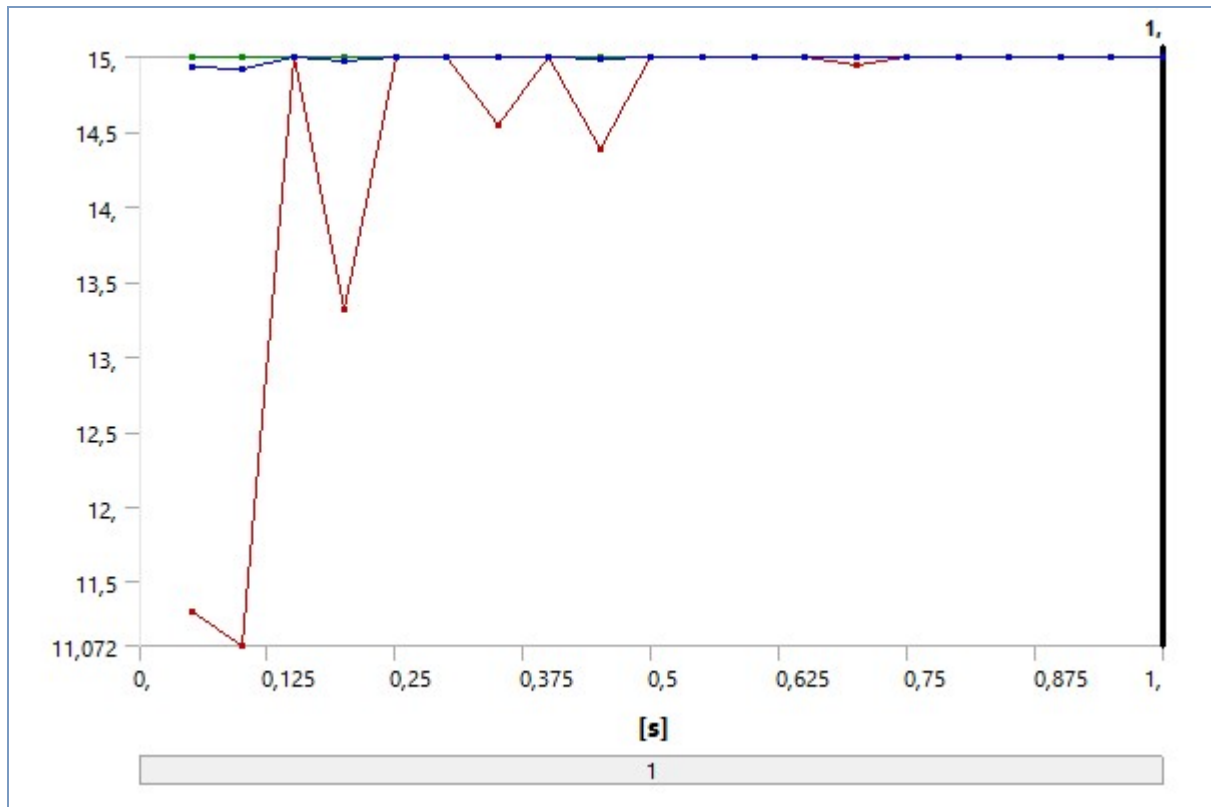


TABLE 22
Model (D4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Stress Tool > Safety Factor

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
5,e-002	11,299	15,	14,929
0,1	11,072		14,921
0,15	15,		15,
0,2	13,315		14,974
0,25	15,		15,
0,3			
0,35	14,546		14,995
0,4	15,		15,
0,45	14,38		14,992
0,5	15,		15,
0,55			
0,6			
0,65			
0,7			
0,75	15,		15,
0,8			
0,85			
0,9			
0,95			
1,			

Material Data

Copper Alloy

TABLE 23
Copper Alloy > Constants

Density	8300, kg m ⁻³
---------	--------------------------

Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,8e-005 C ⁻¹
Specific Heat Constant Pressure	385, J kg ⁻¹ C ⁻¹
Isotropic Thermal Conductivity	401, W m ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 24
Copper Alloy > Color

Red	Green	Blue
208,	146,	88,

TABLE 25
Copper Alloy > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength Pa
0,

TABLE 26
Copper Alloy > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength Pa
2,8e+008

TABLE 27
Copper Alloy > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa
2,8e+008

TABLE 28
Copper Alloy > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa
4,3e+008

TABLE 29
Copper Alloy > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C
22,

TABLE 30
Copper Alloy > Isotropic Resistivity

Resistivity ohm m	Temperature C
1,548e-008	0,
1,694e-008	20,
2,277e-008	100,

TABLE 31
Copper Alloy > Isotropic Elasticity

Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa	Temperature C
1,1e+011	0,34	1,1458e+011	4,1045e+010	

TABLE 32
Copper Alloy > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
1,