



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Análisis estático de estructuras de barras
mediante el módulo de elementos finitos
de CATIA. Validación y aplicación.**

Autor:

Majait El Mizeb, Houssam

Tutor:

**Lorenzana Ibán, Antolín
Foces Mediavilla, Antonio**

Departamento:

**Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno,
Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras**

Valladolid, septiembre de 2019.

Resumen

En el presente trabajo fin de grado se estudia el módulo de elementos finitos de CATIA, denominado *Generative Structural Analysis*, aplicado al análisis de problemas estáticos de teoría de estructuras y resistencia de materiales.

Con este TFG se pretende validar los cálculos de este software, a fin de ser utilizado en las asignaturas anteriores, mediante la comparación de los resultados con modelos teóricos y con los resultados de otro software más específicos.

Profundizando en el uso del módulo, se estudiará cómo optimizar los cálculos realizados, y se investigarán las capacidades de los distintos comandos y herramientas para poder definir todas las posibles aplicaciones relacionadas con la materia.

Palabras clave

Mallado, análisis estructural, CATIA, elementos finitos, validación.

ÍNDICE

1	Introducción	12
1.1	Motivación	12
1.2	Objetivo	13
2	Metodología:	14
3	Herramientas del módulo Generative Structural Analysis	16
3.1	Nodos y elementos de malla	17
3.2	Propiedades del objeto	21
3.3	Materiales	23
3.4	Restricciones	24
3.5	Cargas	25
3.6	Calculo de resultados	27
3.7	Sensores	35
4	Validación	40
4.1	Validación del cálculo de desplazamientos	40
4.1.1	Desplazamientos mediante mallado 3D	42
4.1.2	Desplazamientos mediante mallado 2D	50
4.1.3	Desplazamientos mediante mallado 1D	54
4.2	Validación del cálculo de tensiones	58
4.2.1	Tensión normal mediante mallado 3D	61
4.2.2	Tensión normal mediante mallado 2D	80
4.2.3	Tensión normal mediante mallado 1D	84
5	Aplicaciones en cálculo de estructuras	88
5.1	Cálculo de reacciones	88
5.2	Apoyos fijos y móviles	90
5.3	Cálculo de pórticos	95
5.4	Cálculos con desplazamientos prescritos	101
6	Conclusiones y líneas futuras	108
6.1	Conclusiones	108
6.2	Líneas futuras	108
	Referencias	110
	ANEXOS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Despiece genérico de un piloto de automóvil.....	12
Figura 2. Estructura del árbol del modulo Generative Structural Analysis.....	16
Figura 3. Barra de herramientas Model Manager.....	17
Figura 4. Sub-barra de herramientas Mesh Parts.....	17
Figura 5: configuración tamaño elementos tetraédricos.....	17
Figura 6. Barra de herramientas Model Manager.....	18
Figura 7. Sub-barra de herramientas Mesh Special.	18
Figura 8. Ventana Element Type.....	18
Figura 9. Ventana Local Mesh Size.	19
Figura 10. Ventana Local Mesh Sag.	19
Figura 11. Comando Adaptivity Entity.	19
Figura 12. Ventana Global Adaptivity.....	20
Figura 13. Visualización del mallado.	20
Figura 14. Barra de herramientas Model Manager-	21
Figura 15. Ventana 3D Property.	21
Figura 16. Ventana 2D Property.	22
Figura 17. Ventana 1D Property.	22
Figura 18. Lista de tipos de secciones de barra.	23
Figura 19. Barra de herramientas Model Manager	23
Figura 20. Ventana de propiedades del material.....	23
Figura 21. Barra de herramientas Restraints.....	24
Figura 22. Ventana de User-defined Restraints.	25
Figura 23. Barra de herramientas Loads.....	25
Figura 24. Barra de herramientas Forces.....	25
Figura 25. Ventana de Distributed Force.....	26
Figura 26. Barra de herramientas Force Densities.....	26
Figura 27. Barra de herramientas Compute.....	27
Figura 28. Ventana Compute.....	28
Figura 29. Barra de herramientas Compute.....	28
Figura 30. Ventana del comando Compute with Adaptivity.....	28
Figura 31. Barra de herramientas Analysis Results.....	29
Figura 32. Ventana de Convergence of computation visualization.	29
Figura 33. Barra de herramientas Image.	29
Figura 34. Sub-barra de herramientas Other Image.....	30
Figura 35. Apartado de Stress principal tensor symbol del árbol.....	30
Figura 36. Ventana Image Edition.....	31
Figura 37. Ventana Image Edition extendida.	32
Figura 38. Barra de herramientas Analysis Tool.	32
Figura 39. Apartado Estimated local error del árbol.....	33
Figura 40. Ventana Information del Estimated local error.	33
Figura 41. Comando Generate Report.....	34
Figura 42. Ventana Raport Generation.....	34
Figura 43. Barra herramientas Solver Tools.....	34

Figura 44. Ventana External Storage.....	35
Figura 45. Apartado de Sensors del árbol.....	36
Figura 46. Ventana Reaction Sensor.....	36
Figura 47. Apartado de Sensors del árbol.....	37
Figura 48. Ventana Create Sensor.....	37
Figura 49. Apartado de Global Error en el árbol.	38
Figura 50. Viga en voladizo sometida a su propio peso.....	41
Figura 51. Viga en voladizo sometida a una carga puntual.....	42
Figura 52. Sketch sección en I.....	43
Figura 53. Comando Pad.....	43
Figura 54. Mallado con tetraedros lineales.	44
Figura 55. Ventana de definición de material.....	44
Figura 56. Configuración de las propiedades del material.....	45
Figura 57. Definición de las propiedades del objeto.....	45
Figura 58. Comando Camp.....	46
Figura 59. Comando Acceleration.....	46
Figura 60. Comando Compute.	47
Figura 61. Ventana de tiempo de computación viga 3D.....	47
Figura 62. Deformada de la viga en voladizo 3D.....	48
Figura 63. Ventana Information, número nodos y elementos viga 3D.	48
Figura 64. Ventana del apartado Traslational displacement del árbol.....	49
Figura 65. Desplazamientos de la viga en voladizo 3D.	49
Figura 66. Sketch de las líneas medias de la viga.	50
Figura 67. Comando Extrude para superficies.	51
Figura 68. Mallado mediante elementos 2D.	51
Figura 69. Propiedades del objeto 2D.....	52
Figura 70. Ventana de tiempo de computación viga 2D.....	53
Figura 71. Deformada de la viga en voladizo 2D.....	53
Figura 72. Ventana Information, número nodos y elementos viga 2D.	53
Figura 73. Desplazamientos de la viga en voladizo 2D.	54
Figura 74. Comando Line Definition.	55
Figura 75. Mallado mediante elementos 1D.	55
Figura 76. Propiedades del objeto 1D.....	56
Figura 77. Ventana de tiempo de computación viga 1D.....	57
Figura 78. Desplazamientos de la viga en voladizo 1D.	57
Figura 79. Ventana Information, número nodos y elementos viga 1D.	58
Figura 80. Viga en T empotrada.....	59
Figura 81. Sketch de una viga en T.	61
Figura 82. Ventana de Octree Tetrahedron Mesh.	61
Figura 83. Comando Distributed Force para una carga puntual vertical.....	62
Figura 84. Comando Distributed Force para una carga puntual horizontal. ...	63
Figura 85. Comando Moment.	63
Figura 86. Tiempo de computación de la viga en T.....	64
Figura 87. Deformada de la viga en T.	64
Figura 88. Número de Nodos y Elementos de la viga en T.	64

Figura 89. Comando Principal Stress.....	65
Figura 90. Configuración de Stress full tensor component.....	65
Figura 91. Tensión en el ala.	66
Figura 92. Tensión en el alma.	66
Figura 93. Comando del error global.	67
Figura 94. Definición de tetraedros parabólicos.	68
Figura 95. Tiempo de computación para tetraedros parabólicos.....	69
Figura 96. Error global para tetraedros parabólicos.	69
Figura 97. Tensión en el ala para tetraedros parabólicos.....	70
Figura 98. Tensión en el alma para tetraedros parabólicos.	70
Figura 99. Ventana Octree Tetrahedron Mesh.....	71
Figura 100. Tiempo de computación para reducción de tamaño malla.	72
Figura 101. Error global para reducción de tamaño malla.	72
Figura 102. Tensión en el ala para reducción de tamaño malla.	72
Figura 103. Tensión en el alma para reducción de tamaño malla.	73
Figura 104. Comando Local Mesh Size.	74
Figura 105. Tiempo de computación para mallado local.	74
Figura 106. Error global para mallado local.	75
Figura 107. Tensión del ala para mallado local.	75
Figura 108. Tensión del alma para mallado local.....	76
Figura 109. Comando Adaptivity.	77
Figura 110. Comando Compute with Adaptivity.....	77
Figura 111. Error global para mallado adaptativo.	78
Figura 112. Mallado 3D adaptativo.	78
Figura 113. Tensión del ala para mallado adaptativo.....	79
Figura 114. Tensión del alma para mallado adaptativo.....	79
Figura 115. Sketch de las líneas medias de la viga en T.	81
Figura 116. Comando Extrude para superficies.....	81
Figura 117. Comando Adaptivity.	82
Figura 118. Propiedades del objeto 2D.....	83
Figura 119. Cargas y momento viga en T.	83
Figura 120. Tensión para mallado 2D adaptativo.	84
Figura 121. 1D Property de la viga en T.	85
Figura 122. Cargas y momento viga 1D en T.	85
Figura 123. Tensión de la viga en T.....	86
Figura 124. Reacciones y esfuerzos de la viga en T.	88
Figura 125. Comando Reaction Sensor.....	89
Figura 126. Ventana Reaction Sensor.	89
Figura 127. Apartado Reaction Sensor del árbol.	90
Figura 128. Comando User-defined Restraint.....	91
Figura 129. Barra de herramientas Virtual Part.....	91
Figura 130. Comando Smooth Virtual Part.....	92
Figura 131. Comando User-defined Restraint.....	92
Figura 132. Mensaje de error.....	93
Figura 133. Puntos de soporte de elementos virtuales.	93

Figura 134. Elementos virtuales.....	94
Figura 135. Pórtico en MdrFx.....	95
Figura 136. Comando Join.	96
Figura 137. Comando Beam Mesher.	96
Figura 138. Comando 1D Property.....	97
Figura 139. Comando User-defined Restraint.	97
Figura 140. Comando Distributed Force.....	98
Figura 141. Deformada del pórtico en MdrFX.	98
Figura 142. Deformada del pórtico en CATIA.....	99
Figura 143. Desplazamientos del pórtico en MdrFx.....	99
Figura 144. Diagrama de desplazamientos del pórtico en CATIA.	100
Figura 145. Ventana de Traslational displacement	100
Figura 146. Desplazamientos del pórtico en CATIA.	101
Figura 147. Viga empotrada-apoyada en MdrFx.	102
Figura 148. Viga empotrada-apoyada en CATIA.	103
Figura 149. Comando Enforced Dispacement.....	103
Figura 150. Deformada viga empotrada-apoyada en MdrFx.....	104
Figura 151. Deformada viga empotrada-apoyada en CATIA.....	105
Figura 152. Desplazamientos viga empotrada-apoyada en MdrFx.....	105
Figura 153. Desplazamiento horizontal viga empotrada-apoyada en CATIA.....	106
Figura 154. Desplazamiento vertical viga empotrada-apoyada en CATIA. ...	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de resultados.....	80
Tabla 2. Comparación de resultados de mallado adaptativo.....	86
Tabla 3. Comparación de resultados MdrFx-CATIA.....	101

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Principio de las Fuerzas Virtuales	40
Ecuación 2. Cortante del problema real.....	41
Ecuación 3. Momento flector del problema real.....	41
Ecuación 4. Peso propio.....	41
Ecuación 5. Cortante del problema virtual.....	42
Ecuación 6. Momento flector del problema virtual.	42
Ecuación 7. Desplazamiento máximo.	42
Ecuación 8. Error en el cálculo de desplazamientos 3D.....	50
Ecuación 9. Error en el cálculo de desplazamientos 2D.....	54
Ecuación 10. Error en el cálculo de desplazamientos 1D.	57
Ecuación 11. Tensión Normal.	59
Ecuación 12. Área de sección de una viga en T.	59
Ecuación 13. Momento de inercia en z.	60
Ecuación 14. Axil de viga en T.....	60
Ecuación 15. Momento flector de viga en T.....	60
Ecuación 16. Tensión normal en el extremo libre.	60

Ecuación 17. Tensión Máxima.....	60
Ecuación 18. Tensión mínima.	60
Ecuación 19. Error de cálculo de tensión en viga T	67
Ecuación 20. Error de cálculo de tensión con tetraedros parabólicos.	71
Ecuación 21. Error de cálculo de tensión con reducción tamaño malla.	73
Ecuación 22. Error de cálculo de tensión con mallado local.	76
Ecuación 23. Error de cálculo de tensión con mallado adaptativo.	80
Ecuación 24. Error de cálculo de tensión con mallado 2D adaptativo.....	84
Ecuación 25.Tensión normal en el baricentro.....	86

1 Introducción

1.1 Motivación

En mi primer trabajo, en Valeo Lighting como diseñador de pilotos de automóviles, mediante el software CATIA, una de las tareas habituales en las fases de diseño, era la utilización del módulo de elementos finitos de CATIA, denominado *Generative Structural Analysis*, para el cálculo de las tensiones y desplazamientos máximos que se obtenían al aplicar un par de apriete estandarizado para cada tipo de fijación, o también en el caso del diseño de clips no estandarizados, que se utilizaban para unir las distintas piezas que forman un piloto, cuyos componentes se esquematizan en la [Figura 1](#).

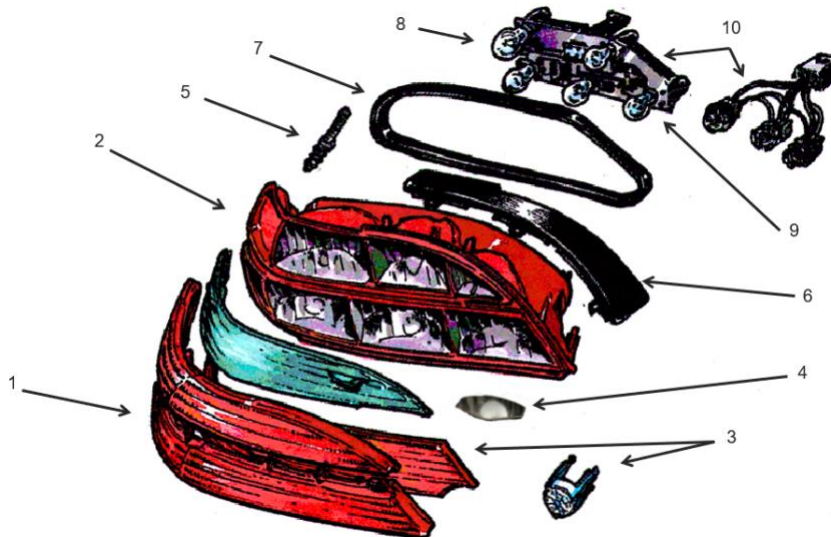


Figura 1. Despiece genérico de un piloto de automóvil.

Estas simulaciones son de gran importancia ya que reducen considerablemente el número de prototipos fabricados, evitan posibles errores que no se detectan hasta la fabricación de las primeras piezas y por lo tanto reducen los costes totales.

Por ello se consideró la posibilidad de utilizar este módulo de elementos finitos, para resolver distintos casos que se podían encontrar en las asignaturas de estructuras, elasticidad y resistencia de materiales. Sobre todo debido a que a que todos los alumnos de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid conocen CATIA, sin embargo no se estudia ningún software específico de elementos finitos. De todo ello surge la motivación para estudiar el potencial y las limitaciones de este módulo.

1.2 Objetivo

El **objetivo principal** de este TFG es la validación de los resultados obtenidos mediante el módulo de Elementos Finitos de CATIA, denominado *Generative Structural Analysis* aplicado al cálculo estructural. El estudio se centra en el **Análisis Estático**, el cual permite el estudio de esfuerzos y deformaciones, como resultado de la aplicación de cargas estáticas.

Este objetivo principal se concreta en los siguientes **objetivos específicos**:

- Descripción general y análisis de las distintas herramientas y comandos de este módulo que puedan ser útiles a la hora de resolver este tipo de ejercicios.
- Descripción y desarrollo de la metodología a seguir para resolver los distintos tipos de ejercicios, utilizados para demostrar la validez del módulo para realizar cálculos estructurales estáticos. Dichos cálculos están basados en los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Elasticidad, Resistencia de Materiales y Teoría de Estructuras, todas ellas pertenecientes al Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Valladolid.
- Descripción de las posibles **aplicaciones** del módulo *Generative Structural Analysis* en la ingeniería mecánica.

2 Metodología:

La simulación computacional cada vez se usa más en ingeniería, ya que permite realizar análisis de geometrías complejas a un coste razonable y en un plazo reducido, y la mayoría de estos análisis se llevan a cabo mediante uso de softwares que utilizan el **Método de Elementos Finitos (MEF)**.

Para poder llevar a cabo análisis MEF, el primer paso consiste en mallar la geometría de la pieza. Durante este proceso la geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan un medio continuo. La división de la geometría en pequeños elementos permite resolver un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite que los cálculos computacionales sean más eficientes.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes tamaños y formas, ya que estos parámetros pueden influir notablemente sobre los resultados obtenidos.

Los elementos están conectados entre sí por puntos, que se llaman **nodos**. Al conjunto de todos estos ítems; **elementos** y **nodos** se le denomina **mall**. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos de Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la mall. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una mall, más precisos serán los resultados de los análisis.

Las geometrías 3D se pueden mallar con elementos 3D (tetraedros en CATIA) pero cuando esta realidad tiene simplificaciones geométricas es más económico (computacionalmente), más funcional y más didáctico el uso de simplificaciones mediante el mallado de 2D (laminas) o 1D (líneas).

Por otra parte, en este apartado no se va a entrar en los métodos matemáticos y en las ecuaciones diferenciales en las que se basa el MEF, sin embargo, se recomienda consultar el libro [\[1\]](#).

3 Herramientas del módulo Generative Structural Analysis

En este capítulo se van a mostrar y describir las distintas herramientas que pueden ser de aplicación en el tipo de ejercicios que son objeto de estudio en este TFG, utilizando como soporte [2] y [3].

Por lo tanto, para ello se va a desarrollar cada uno de los apartados que forman el árbol de CATIA, cuando se inicia el módulo *Generative Structural Analysis*, ya que la interfaz de CATIA cuenta con un **árbol** que contiene y organiza toda la información y los cálculos que se están llevando a cabo. En la *Figura 2* se ve la estructura predefinida que se tiene como inicio.



Figura 2. Estructura del árbol del modulo Generative Structural Analysis.

Para obtener los resultados del análisis estático se debe completar de arriba abajo cada uno de estos apartados, por lo que a continuación se van a describir las características, las funcionalidades y los comandos necesarios en cada uno de ellos:

3.1 Nodos y elementos de malla.

En este apartado se define el tipo de mallado deseado.

Existen diferentes tipos de mallado y todos ellos están en la sub-barra *Mesh Parts* (Figura 4) que se encuentra dentro de la barra de herramientas *Model Manager* (Figura 3):

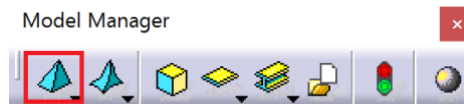


Figura 3. Barra de herramientas Model Manager.



Figura 4. Sub-barra de herramientas Mesh Parts.

- **Octree Tetrahedron Mesher:** mallado mediante tetraedros y como se ve en la Figura 5, se puede seleccionar entre tetraedros lineales o parabólicos.

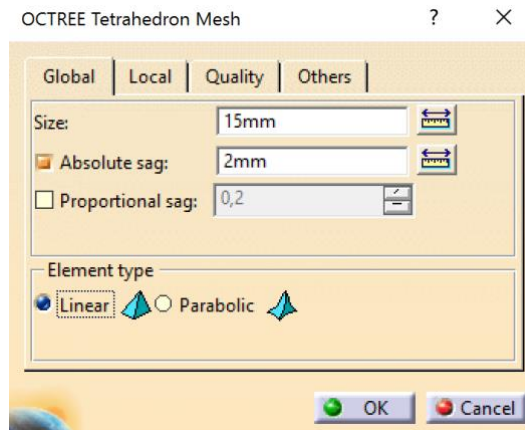


Figura 5: configuración tamaño elementos tetraédricos.

En todos los distintos mallados se tiene la posibilidad de definir la longitud de los lados del tetraedro (**Size**) y la distancia máxima entre el borde de un tetraedro con el contorno nominal de la pieza, lo que se define como **Sag**.

- **Octree Triangle Mesher:** se trata de un mallado formado por triángulos y se emplea para mallar superficies, indicando el espesor de estas. Normalmente se utiliza cuando se tienen piezas de espesor muy pequeño, como por ejemplo una botella de plástico o en modelos 2D.

- **Beam Mesher:** mallado en una dimensión, se utiliza en el cálculo de estructuras formadas por barras o en modelos 1D.

Después de definir el mallado general de la pieza completa, si se desea, se puede realizar un mallado más fino en una superficie en concreto y para ello se hace uso de la segunda sub-barra *Mesh Special* (Figura 7) que se encuentra dentro de la barra de herramientas *Model Manager* (Figura 6):



Figura 6. Barra de herramientas Model Manager.

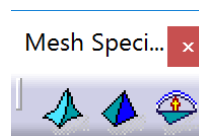


Figura 7. Sub-barra de herramientas Mesh Special.

- **Element Type:** este comando permite simplemente cambiar automáticamente el tipo de tetraedro, es decir; tetraedro lineal de cuatro nudos o tetraedro parabólico de diez nudos (Figura 8), por lo que, se pueden definir superficies formadas por elementos distintos a los previamente definidos con la herramienta *Octree Tetrahedron Mesher* (Figura 5):

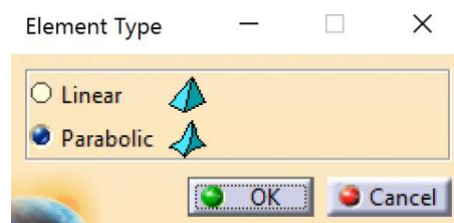


Figura 8. Ventana Element Type.

- **Local Mesh Size:** este comando permite definir un nuevo tamaño (Figura 9) del tetraedro en aquellas superficies que se deseen.

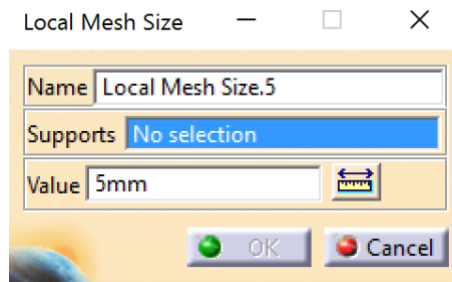


Figura 9. Ventana Local Mesh Size.

- **Local Mesh Sag:** este comando permite definir un valor diferente de Sag (distancia máxima entre un lado del tetraedro y el contorno nominal de la pieza) (Figura 10) en las superficies que se deseen.

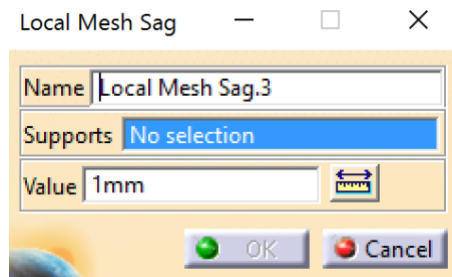


Figura 10. Ventana Local Mesh Sag.

Independientemente del mallado seleccionado, una vez realizado un primer mallado de la geometría de la pieza se puede hacer un refinado de este mediante el comando **Adaptivity Entity** (Figura 11), este comando realiza de forma automática una adaptación de la malla, definiendo elementos de malla de menor tamaño en las zonas más críticas de la pieza.



Figura 11. Comando Adaptivity Entity.

Al hacer clic en este comando, se abre la siguiente ventana (Figura 12):

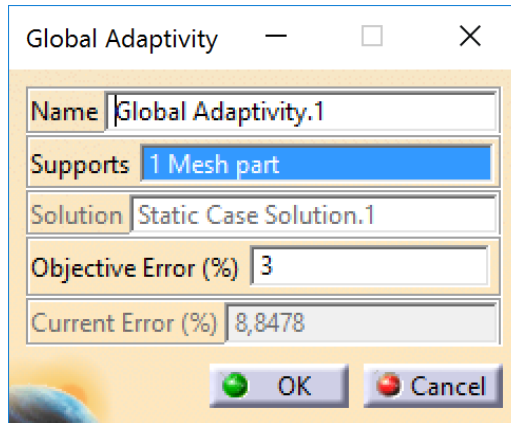


Figura 12. Ventana Global Adaptivity.

Donde;

- En *Support*: se selecciona el mallado previamente definido.
- En *Current Error*: se muestra el error estimado en los cálculos que se tienen con el tamaño de malla actual, en relación con la geometría de la pieza.
- En *Objective Error*: se define el error máximo deseado.

Una vez completado el proceso de mallado, para visualizar el mallado resultante en la pieza, se hace clic derecho sobre el apartado *Nodes and Elements* del árbol de CATIA y se selecciona la opción *Mesh Visualization* del menú desplegado (Figura 13).

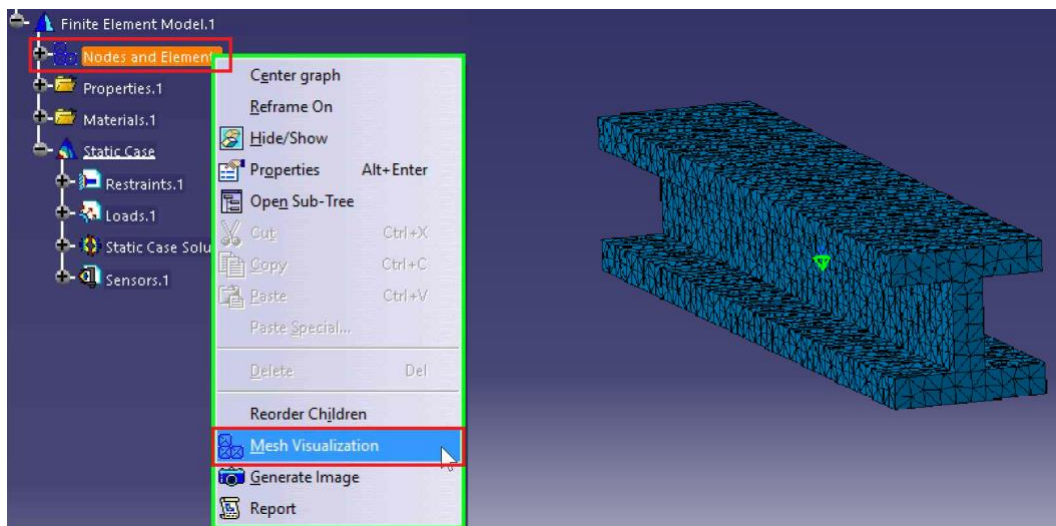


Figura 13. Visualización del mallado.

3.2 Propiedades del objeto.

Las herramientas mencionadas en el apartado anterior definen solo el tipo de mallado, para definir las propiedades físicas y estructurales de cada modelo, se utilizan los comandos centrales de la barra de herramientas *Model Manager* (Figura 14):

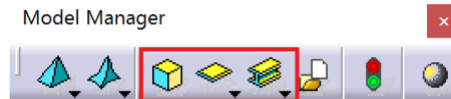


Figura 14. Barra de herramientas Model Manager-

- **3D Property:** comando que define las propiedades físicas y mecánicas de piezas solidas de volumen.

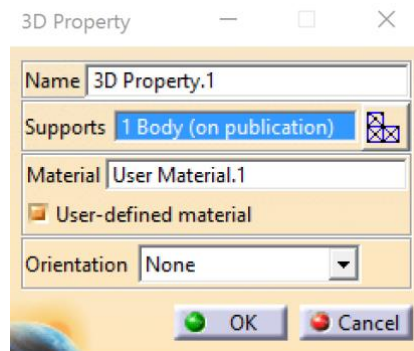


Figura 15. Ventana 3D Property.

En la ventana del comando, se selecciona el material deseado que previamente se ha creado y en *Orientation* se define la orientación para el sistema.

- **2D Property:** con este comando además de definir las propiedades de la pieza, en el apartado de *Thickness* se determina el espesor de la superficie, como se ve a continuación en la Figura 16:

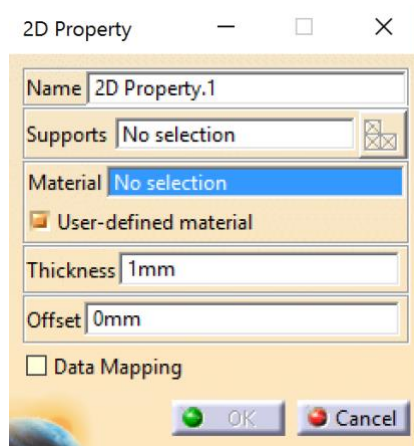


Figura 16. Ventana 2D Property.

En *Supports* se selecciona el mallado definido en el apartado anterior.

- **1D Property:** comando para definir las propiedades mecánicas de una geometría unidimensional:

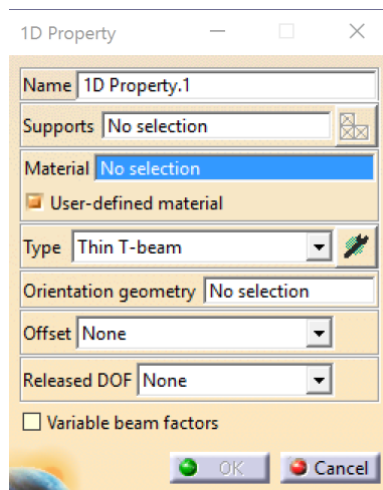


Figura 17. Ventana 1D Property.

En *Type* ([Figura 17](#)) se selecciona el tipo de sección que tiene la pieza, y para ello se dispone de una lista predefinida de perfiles estándar, pero también se dispone de la posibilidad de definir nuevos perfiles (*Variable beam*) como se ve en la [Figura 18](#).

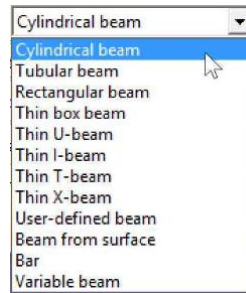


Figura 18. Lista de tipos de secciones de barra.

3.3 Materiales

Se definen las propiedades del material mediante el comando *User Material* de la barra de herramientas *Model Manager* (Figura 19).



Figura 19. Barra de herramientas Model Manager

En la pestaña de *Analysis* (Figura 20) se definen las distintas propiedades de este.

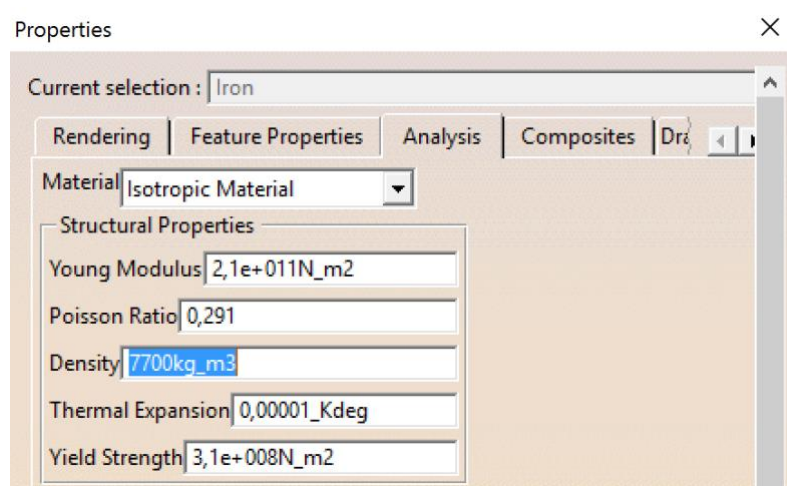


Figura 20. Ventana de propiedades del material.

- Material: se selecciona el comportamiento del material. En este TFG, solo se van a considerar materiales que tienen un comportamiento isótropo.

- Módulo de Young o Módulo de Elasticidad (*Young Modulus*): es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, relaciona las tensiones y las deformaciones que experimenta un material dentro del régimen elástico de comportamiento.
- Coeficiente de Poisson (*Poisson Ratio*): esta constante relaciona las deformaciones longitudinales con las transversales del material.
- Densidad (*Density*): relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.
- Coeficiente de Dilatación Térmica (*Thermal Expansion*): parámetro que define el alargamiento que experimenta la unidad de un cuerpo cuando la temperatura se eleva en 1°C.
- Límite de elasticidad (*Yield Strength*): determina el punto donde comienzan a aparecer deformaciones plásticas (en consecuencia, irreversibles) en el material.

3.4 Restricciones

En este apartado se definen las condiciones de contorno del cuerpo y las cuales se puede aplicar tanto a caras, como a aristas o vértices, mediante la barra de herramientas *Restraints* de la ([Figura 21](#)).

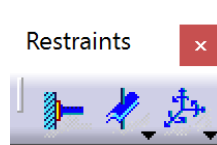


Figura 21. Barra de herramientas Restraints.

Las distintas restricciones al movimiento (desplazamientos y giros) que pueden establecerse se describen a continuación:

- *Camp*: empotramiento, el cual impide todo tipo de desplazamientos y giros.
- *Surface Slides*: se trata de restricciones que tienen la particularidad que permiten traslaciones y giros en el elemento donde se apoyan (normalmente utilizadas en elementos de diseño de máquinas).
- *User-defined Restraints*: se restringen solo aquellos desplazamientos y giros que se deseen:

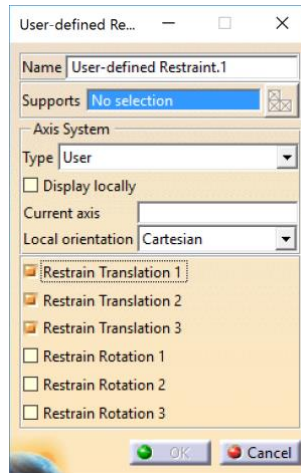


Figura 22. Ventana de User-defined Restraints.

3.5 Cargas

Se definen las cargas a las que se encuentra sometido el cuerpo, mediante la barra de herramientas *Loads* (Figura 23), cuyos elementos se describen a continuación:



Figura 23. Barra de herramientas Loads.

- **Pressure:** fuerza por unidad de superficie que se ejerce según la dirección normal a una superficie.
- **Forces:** dentro de esta herramienta se encuentran diferentes opciones (Figura 24):



Figura 24. Barra de herramientas Forces.

- **Distributed Force:** comando para definir cargas en cualquier dirección:

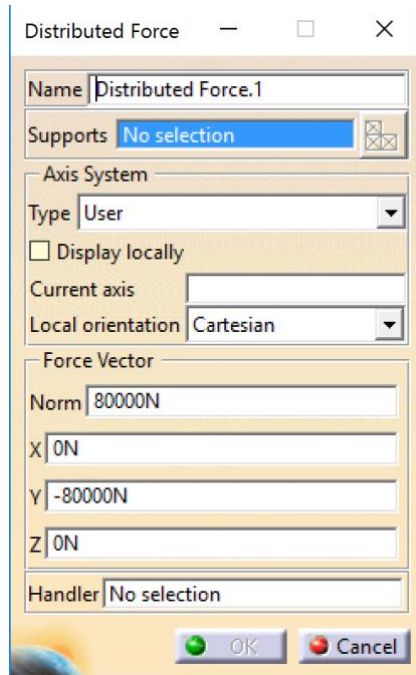


Figura 25. Ventana de Distributed Force.

En *Supports* (Figura 25) se selecciona la superficie o arista donde se aplica la carga y si se trata de una carga puntual, en *Handler* se define un punto de esa superficie o arista.

- **Moment:** comando para definir un momento.
- **Bearing Load:** para definir cargas con un ángulo y una orientación específica que actúan sobre una superficie cilíndrica.
- **Importing Force/Momentos:** comandos para importar cargas o momentos definidos desde una tabla de Excel.
- **Acceleration:** comando con el que se asigna el efecto de la fuerza de aceleración de un cuerpo.
- **Force Densities:** en el cuarto comando de la barra de herramientas de la Figura 23, puede desplegarse la sub-barra de herramienta *Force Densities* (Figura 26) donde se encuentran los siguientes comandos:

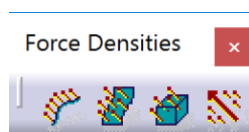


Figura 26. Barra de herramientas Force Densities.

- **Line Force Density:** permite definir una carga a lo largo de una arista (N/m).
- **Surface Force Density:** comando para definir una carga aplicada a una superficie (N/m^2).
- **Volume Force Density:** comando para definir cargas aplicadas al volumen de un cuerpo (N/m^3).
- **Force Density:** se trata de una combinación de las anteriores herramientas, ya que simplemente se define una carga (N) sobre una arista, una superficie o un cuerpo y CATIA calcula automáticamente la carga equivalente.
- **Temperature Field:** comando para calcular es esfuerzo y la deformación originada por la acción de la temperatura, el cual se encuentra en las sexta posición de la barra de herramientas de la [Figura 23](#),

3.6 Cálculo de resultados

Una vez definido el problema a resolver, en este apartado se van a definir los distintos tipos de resultados que se pueden obtener en este módulo, y para ello se deben seguir los siguientes pasos:

- Iniciar los cálculos mediante el comando *Compute* ([Figura 27](#)):

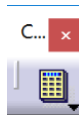


Figura 27. Barra de herramientas Compute.

En la ventana de la [Figura 28](#) seleccionar *All* y marcar la opción de *Preview* para poder visualizar previamente el tiempo de cálculo esperado:

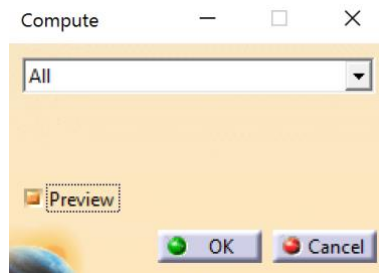


Figura 28. Ventana Compute.

Por otra parte, si se ha definido un mallado adaptativo, con la herramienta *Adaptivity Entity* (Figura 11), el caculo asociado a este refinado de malla es mediante el comando *Compute with Adaptivity*, que se encuentra dentro de la sub-barra de herramientas de *Compute* (Figura 29):

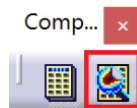


Figura 29. Barra de herramientas Compute.

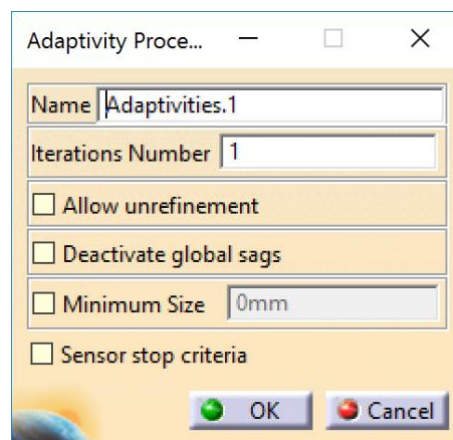


Figura 30. Ventana del comando *Compute with Adaptivity*.

Si se marca la opción *Minimum Size*, esta herramienta vuelve a generar una nueva malla con una nueva reagrupación, teniendo en cuenta el tamaño de los elementos de la malla en la zona crítica definida anteriormente con el comando *Adaptivity Entity* de la Figura 11.

En caso de marcarse la opción de *Deactivate global sags* el programa escoge de forma autónoma el valor más adecuado del Sag sin tener en cuenta el definido anteriormente en la Figura 5.

Iterations Number: indica el número de veces que el programa repite el proceso de generación de una nueva malla hasta que el resultado alcanzado quede por debajo del porcentaje de error global introducido como límite máximo en el cuadro de texto *Objective Error* de la [Figura 12](#).

Si se desea visualizar la evolución a lo largo de las distintas iteraciones de cálculo, se puede obtener gráfico que muestra el proceso de evolución del error global, así como de los elementos y nodos, mediante el comando **Historic of Computations** de la barra de herramientas *Analysis Results* de la [Figura 31](#).

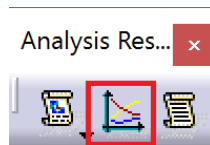


Figura 31. Barra de herramientas *Analysis Results*.

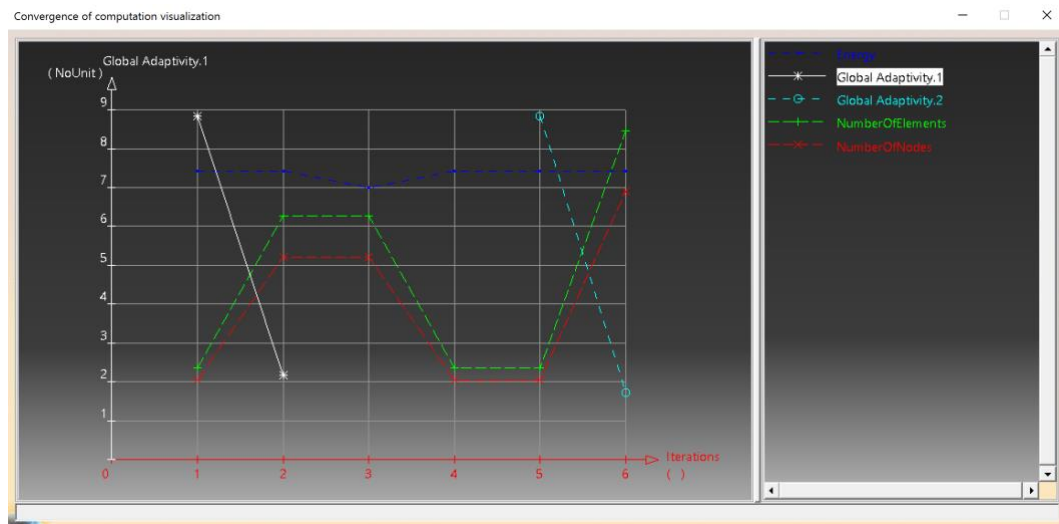


Figura 32. Ventana de *Convergence of computation visualization*.

- Una vez se hayan ejecutado los cálculos, se procede a representar gráficamente los resultados mediante los comandos de la barra de herramientas *Image* ([Figura 33](#)):



Figura 33. Barra de herramientas *Image*.

- **Deformation:** este comando representa gráficamente la deformación producida por la acción de las cargas además de verse la malla generada.
- **Von Mises Stress:** mediante este comando puede visualizarse (mediante escala de colores) las diferentes zonas de concentración de esfuerzos generadas por la acción de las cargas.
- En el tercer comando de la barra de herramientas *Image* está la sub-barra *Other Image* de la [Error! Reference source not found.](#):

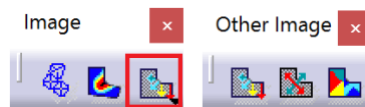


Figura 34. Sub-barra de herramientas *Other Image*.

Donde se encuentran los siguientes comandos:

- **Displacement:** con este comando pueden visualizarse los desplazamientos de cada uno de los nodos de la malla.
- **Principal Stress:** se trata de un comando con varias configuraciones, las cuales se encuentran haciendo doble clic en el apartado de *Stress principal tensor symbol* en el árbol, como se ve en la [Figura 35](#).

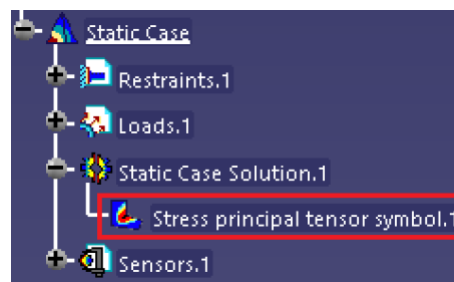


Figura 35. Apartado de *Stress principal tensor symbol* del árbol.

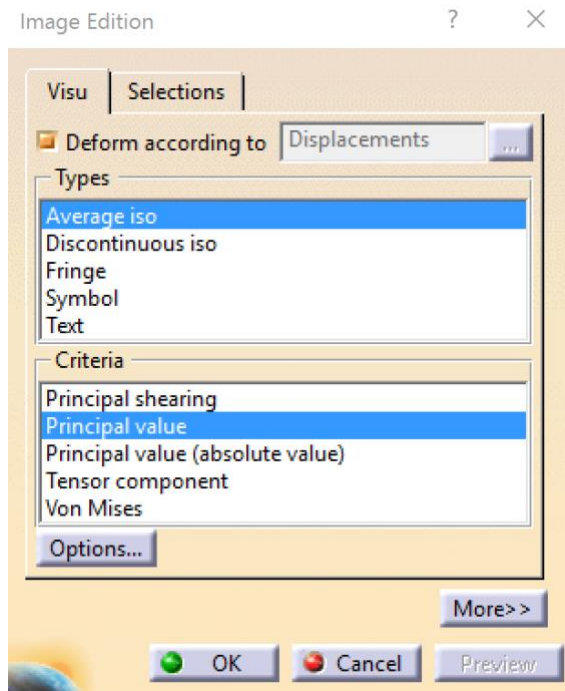


Figura 36. Ventana Image Edition.

Dentro de esta nueva ventana en el menú superior se tienen los diferentes tipos de visualización:

- *Average iso*: representación mediante una distribución de colores.
- *Discontinuous iso*: se alisa la curvatura que une las correspondientes frecuencias del histograma.
- *Symbol*: representa una malla diferente, formada por cubos y no por tetraedros.
- *Text*: indica el valor del esfuerzo promedio y ubica dicho valor en el punto medio del tetraedro.

En el menú inferior se disponen de las siguientes opciones:

- *Principal shearing*: representa la máxima concentración de esfuerzos cortantes.
- *Principal value*: representa los tres esfuerzos principales.
- *Principal value (absolute value)*: se obtienen los valores de concentración de esfuerzos máximos.

- *Tensor component*: permite representar un componente en particular, y para seleccionar el deseado, se debe desplegar una nueva ventana clicando en la opción *More* de la [Figura 37](#).

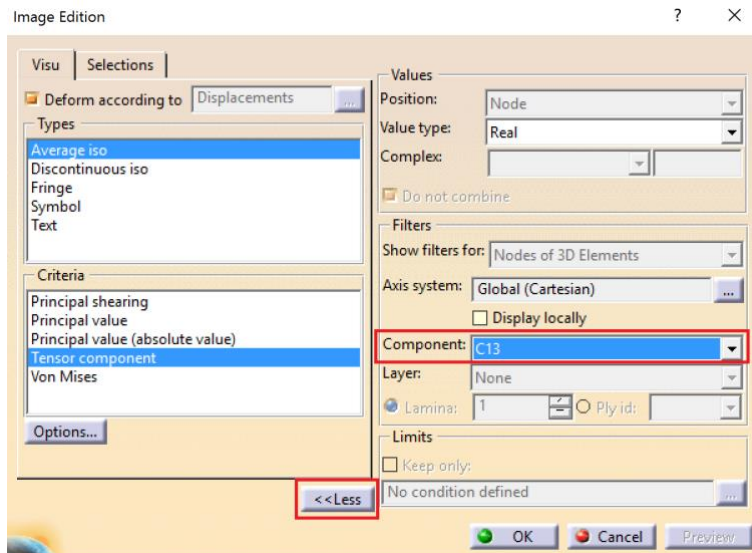


Figura 37. Ventana Image Edition extendida.

- o *Precision*: el tercer comando de la barra de herramientas *Other Image* de la [Figura 34](#) y representa el margen de error de los cálculos realizados.

Esta herramienta es muy útil cuando se realiza el primer mallado de una pieza, ya que permite conocer si la geometría de la malla seleccionada es adecuada o no. Esto evita crear un mallado mucho más preciso de lo necesario, lo cual ralentiza mucho los cálculos. Esta herramienta define el error local de cada uno de los elementos de la malla, pero si se quiere conocer el error global, una vez que ya esté definido el error local, se realiza mediante el comando *Information* de la barra de herramientas *Analysis Tool* de la [Figura 38](#):



Figura 38. Barra de herramientas Analysis Tool.

Clicando sobre la opción de *Estimated local error* (Figura 39) que se genera en el árbol con el comando de *Precision*:

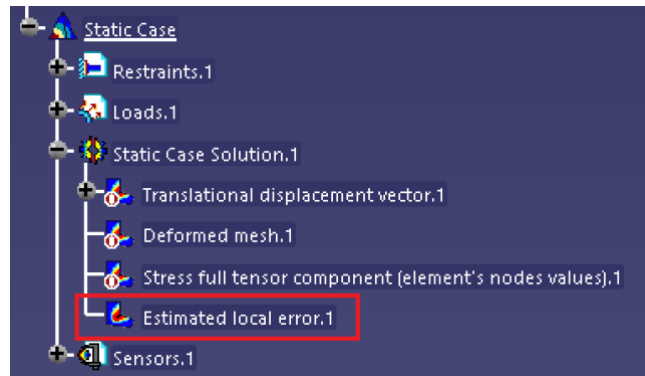


Figura 39. Apartado *Estimated local error* del árbol.

Seguidamente se abre la siguiente ventana donde se visualiza el valor del error global:

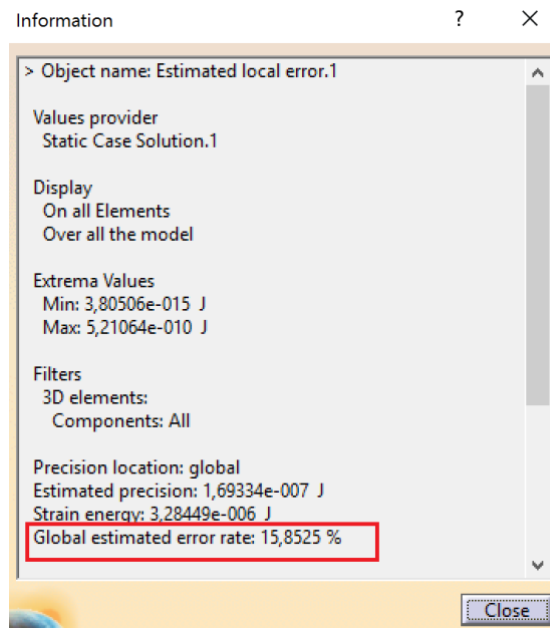


Figura 40. Ventana *Information* del *Estimated local error*.

- Tras realizar los cálculos y representaciones deseadas, existe la posibilidad de exportar un informe en formato HTML de todos los datos obtenidos correspondientes al tipo de análisis realizado:
 - Tipo de mallado, número de nodos y número de elementos.
 - Material, sus propiedades y sus características.
 - Condiciones de contorno aplicadas.

- Cargas aplicadas.
- Datos de cálculo.
- Representación gráfica de la deformación.
- Representación gráfica de las tensiones.

Este informe se obtiene mediante el comando **Generate Report** situado en la barra de herramientas *Analysis Results* de la [Figura 41](#).

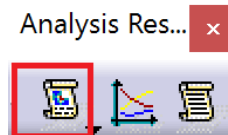


Figura 41. Comando *Generate Report*.

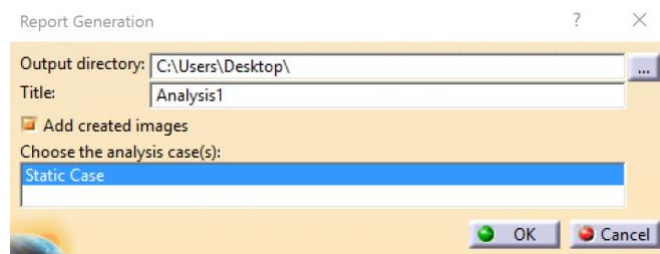


Figura 42. Ventana *Report Generation*.

En la ventana que se abre, se selecciona el directorio y se marca la opción de *Add created images* para que el informe contenga las imágenes que el programa genera automáticamente para este proceso.

- Por último, todos los procesos de cálculo generados, los cuales pueden llegar a ocupar grandes cantidades de memoria, se almacenan en una ruta predeterminada. Por lo tanto, conviene tenerlos localizados para poder tratarlos correctamente. Para ello se dispone de la barra herramientas *Solver Tools* de la [Figura 43](#), que cuenta con las siguientes opciones:

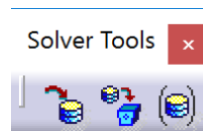


Figura 43. Barra herramientas *Solver Tools*.

- **External Storage:** el primer comando de esta barra de herramientas, permite especificar la ruta donde se almacenará el resultado del sistema de ecuaciones diferenciales o derivadas parciales originado en la malla del conjunto de nodos (*CATAnalysisResults File*).

Como se ve en la *Figura 44*, también puede seleccionarse la ruta correspondiente al resto de cálculos realizados por el programa (*CATAnalysisComputations File*).

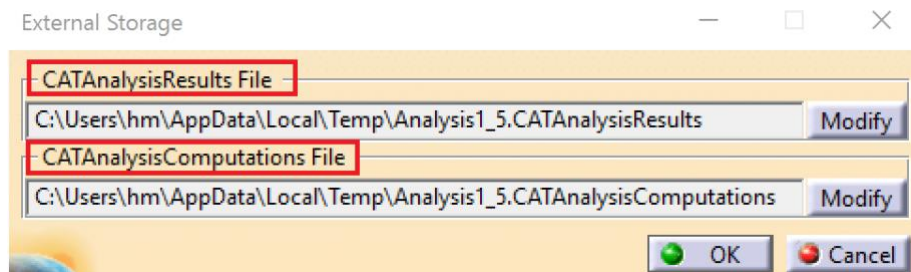


Figura 44. Ventana External Storage.

- **External Storage Clean-up:** este comando permite eliminar los archivos relacionados con el cálculo y resultado del análisis
- **Temporary External Storage:** con este comando se selecciona la ruta donde se desea grabar los datos temporales.

3.7 Sensores

Se trata de una herramienta complementaria para la evaluación de resultados, sin embargo en este caso se hará uso de ella para el cálculo del valor de las reacciones de los apoyos correspondientes.

Para ello como se ve en la *Figura 45* se hace clic derecho en *Sensors* → *Create Resultant Sensor* → *Reaction Sensor*.

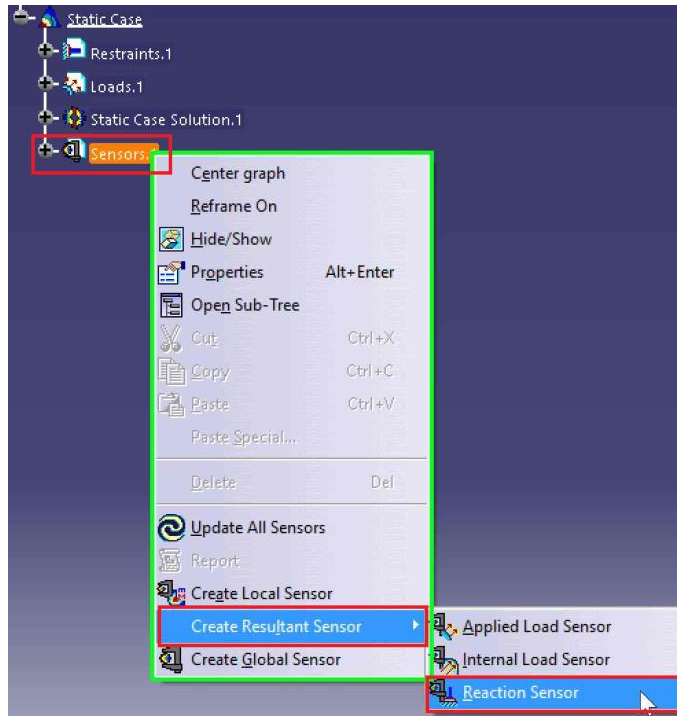


Figura 45. Apartado de Sensors del árbol.

En la Figura 46, en *Entry* se selecciona el apoyo sobre el cual se va a calcular las reacciones:

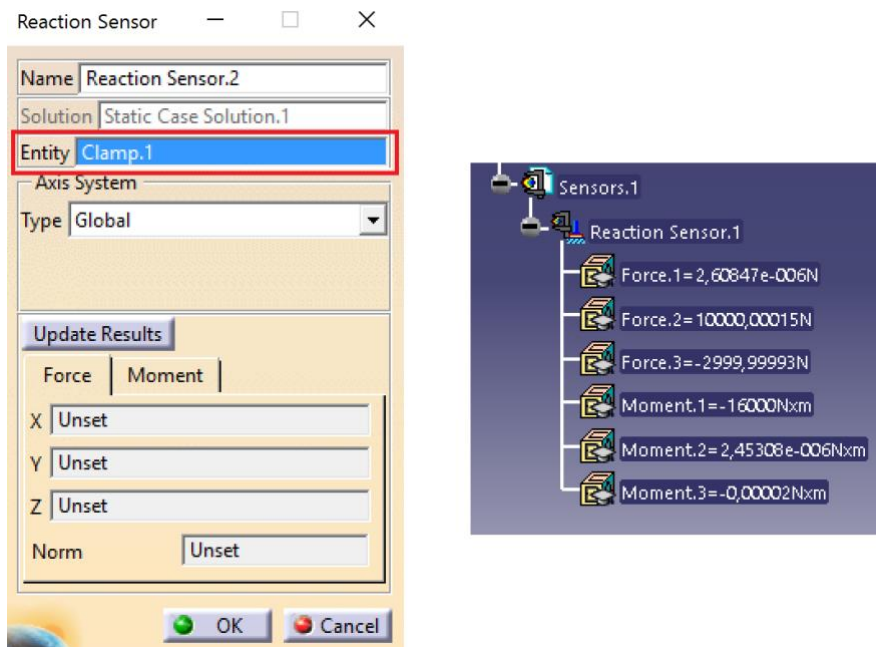


Figura 46. Ventana Reaction Sensor.

También se puede calcular el error global con esta herramienta, al igual que se hacía con el comando de *Information* (Figura 38). Sin embargo en este caso, se obtiene mediante clic derecho sobre el apartado de *Sensors* del árbol y seleccionando la opción de **Create Global Sensor** del desplegable de la Figura 47.

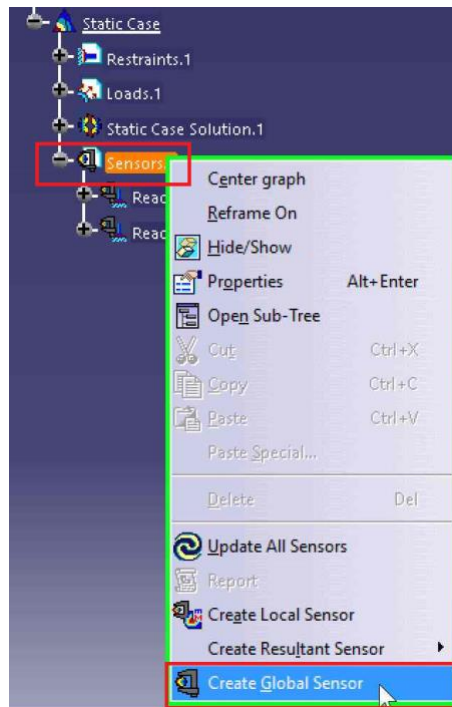


Figura 47. Apartado de *Sensors* del árbol.

En la nueva ventana que se abre (Figura 48), debe seleccionarse la opción de **Global Error Rate (%)**.

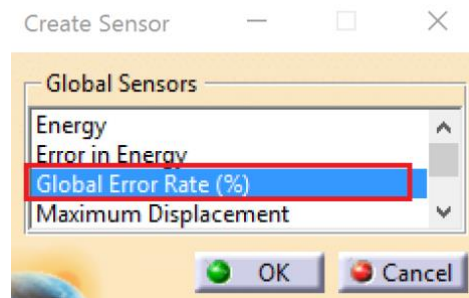


Figura 48. Ventana *Create Sensor*.

A continuación, como se ve en la Figura 49 se añade un nuevo apartado dentro de *Sensors* que indica el error global del mallado actual:

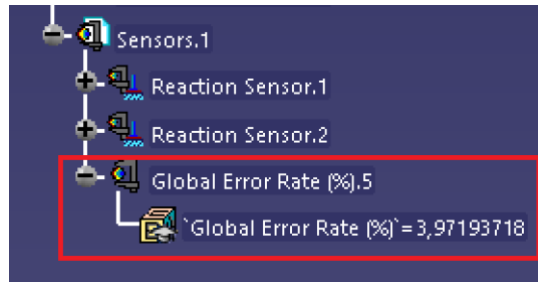


Figura 49. Apartado de Global Error en el árbol.

4 Validación

Debido a que CATIA es una herramienta a menudo conocida por sus potentes módulos de diseño y no tanto por otros múltiples módulos que contiene, el objetivo de este capítulo, es la **validación** de los cálculos realizados mediante el módulo de elementos finitos de CATIA (*Generative Structural Analysis*), haciendo uso de problemas representativos de resistencia de materiales resueltos de forma teórica y comparando los resultados con los obtenidos mediante el módulo de elementos finitos.

4.1 Validación del cálculo de desplazamientos.

En este capítulo se pretende validar el cálculo de desplazamientos mediante modelos mallados con elementos 3D, 2D, 1D, y a su vez, comparando los resultados con los obtenidos de forma teórica.

Para ello, se comienza el análisis calculando los desplazamientos teóricos de un modelo simple de una barra cuyas características son:

- Empotrada en uno de los extremos.
- Longitud $L = 0,25 \text{ m}$.
- Cargas: sometida a su propio peso.
- Perfil en I de $0,05 \text{ m}$ de alto, $0,05 \text{ m}$ de ancho y un espesor de $0,01 \text{ m}$ tanto en el alma como en las alas.
- Acero S275, Modulo Young = $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.
- Densidad = 7700 kg/m^3 .
- Coeficiente de dilatación térmica = $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- Área = $0,0013 \text{ m}^2$.
- Inercia del eje $z = 4,30833 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$.

A continuación, se procede a calcular el desplazamiento teórico mediante el Principio de fuerzas virtuales, cuya ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=N} \left(\int_0^{L_i} n_x^i(x) \frac{N_x^i(x)}{A \cdot E} dx + \int_0^{L_i} m_z^i(x) \frac{M_z^i(x)}{E \cdot I_z} dx \right) \\ = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{N_p} (p_j^i \cdot \delta_j^i) + \sum_{j=1}^{N_p} (m_j^i \cdot \theta_j^i) \right) \end{aligned}$$

Ecuación 1. Principio de las Fuerzas Virtuales

Donde;

- n_x^i : esfuerzo axial del problema virtual.

- N_x^i : esfuerzo axial del problema real.
- m_z^i : momento flector en “z” del problema virtual.
- M_z^i : momento flector en “z” del problema real.
- p_j^i : cargas aplicadas en el problema virtual.
- δ_j^i : desplazamiento del punto donde esta aplicada la carga.
- m_j^i : los momentos aplicados en el problema virtual.
- θ_j^i giro del punto donde esta aplicado el momento.
- A : área de la sección.
- I_z : momento de inercia.
- E : Módulo de Young.

Por lo tanto, para resolver la ecuación y calcular el desplazamiento, se deben de calcular los axiles y los momentos flectores tanto en el problema real como en el virtual.

Para el caso del problema real se tiene que:

$$V_y(x) = q \cdot x - qL$$

Ecuación 2. Cortante del problema real.

$$M_z(x) = qL \cdot x - q \frac{L^2}{2} - q \frac{x^2}{2}$$

Ecuación 3. Momento flector del problema real.

Donde “q” es el peso propio de la barra:

$$q = \rho \cdot A \cdot g = 7700 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0013 m^2 \cdot 10 \frac{m}{s^2} = 100,1 N/M$$

Ecuación 4. Peso propio.

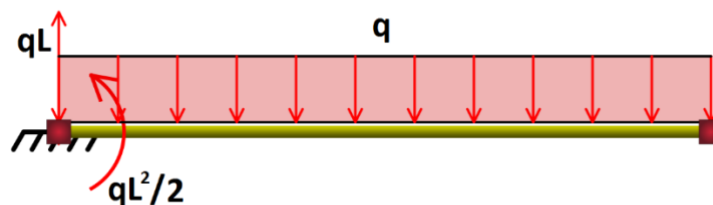


Figura 50. Viga en voladizo sometida a su propio peso.

Para el caso del problema virtual:

$$v_y(x) = -1$$

Ecuación 5. Cortante del problema virtual.

$$m_z(x) = x - L$$

Ecuación 6. Momento flector del problema virtual.



Figura 51. Viga en voladizo sometida a una carga puntual.

Una vez ya obtenidos todos los datos necesarios, se despeja δ_y y se calcula el desplazamiento máximo.

$$\delta_y = \int_0^L m_z^i(x) \frac{M_z^i(x)}{E \cdot I_z} dx = \frac{L^4}{8 \cdot E \cdot I_z} = 1,3968 \cdot 10^{-4} \cdot L^4 = 0,000546 \text{ mm}$$

Ecuación 7. Desplazamiento máximo.

4.1.1 Desplazamientos mediante mallado 3D

Para el cálculo de los desplazamientos del modelo de barra mallado con elementos 3D, se empieza diseñando la viga en el módulo de *Part Design*, donde se define la sección mediante el **Sketch** de la [Figura 52](#).

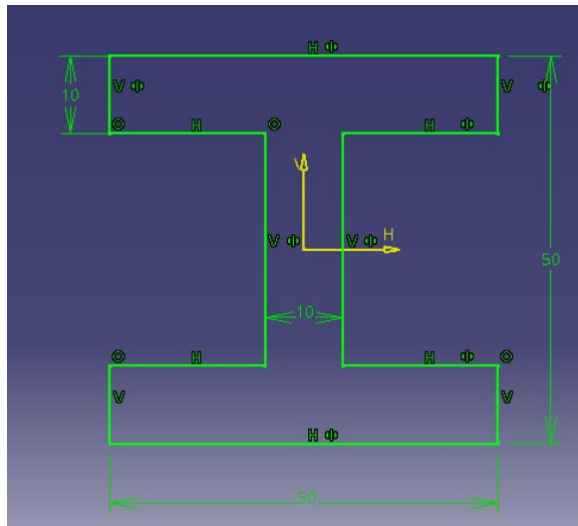


Figura 52. Sketch sección en I.

Mediante una extrusión (comando **Pad** de la [Figura 53](#)) de 250mm de longitud, se obtiene el resultado final.

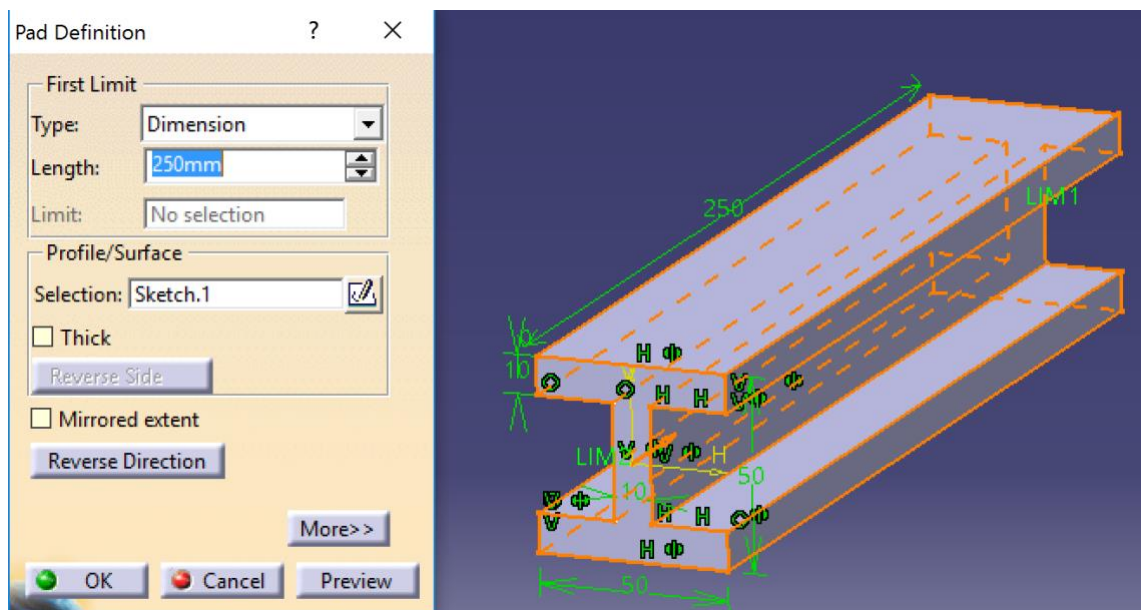


Figura 53. Comando Pad.

Se inicia el análisis estático mediante el módulo *Generative Structural Analysis*:

Realizándose un mallado a partir de tetraedros lineales de 15mm como se aprecia en la [Figura 54](#).

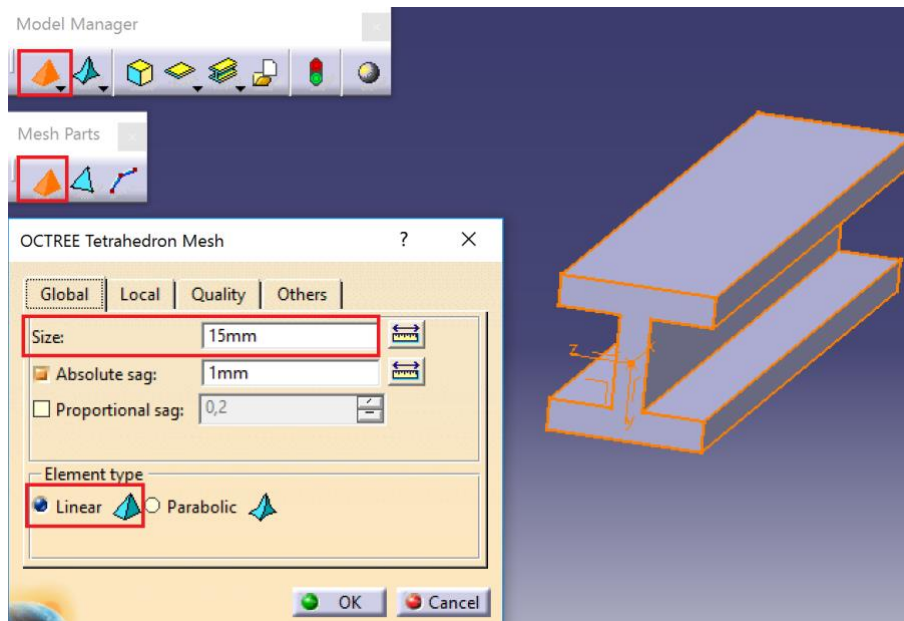


Figura 54. Mallado con tetraedros lineales.

Se define el material mediante el último comando de la barra de herramientas *Model Manager* de la [Figura 55](#).

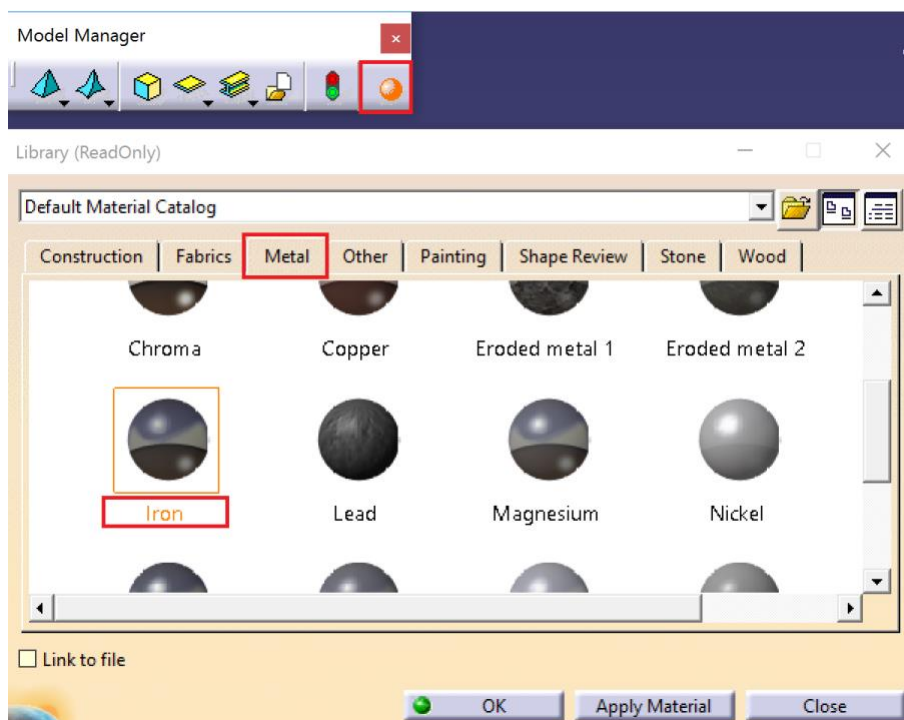


Figura 55. Ventana de definición de material.

Para la configuración las propiedades del material, se hace doble clic sobre *User Material* y se selecciona la pestaña de *Analysis* de la [Figura 56](#).

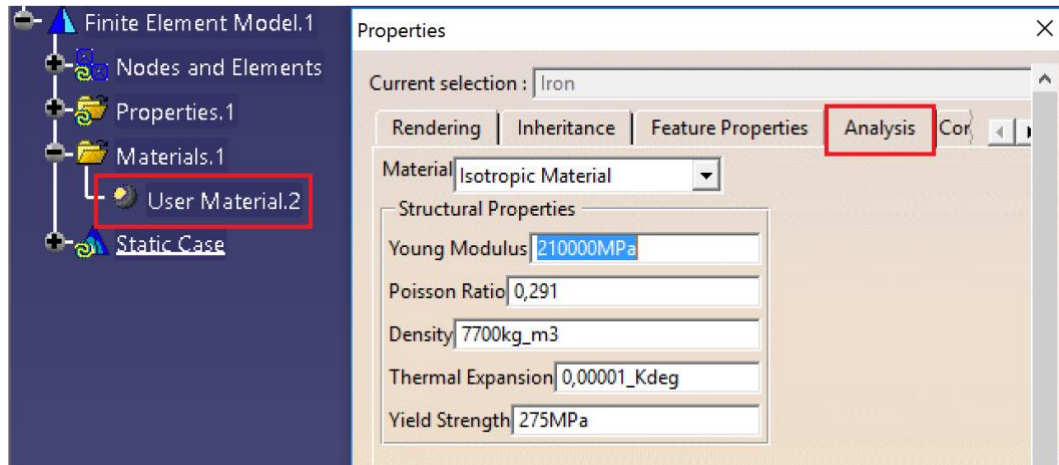


Figura 56. Configuración de las propiedades del material.

Para el apartado de *Properties* mediante el comando de *3D Property*, en la ventana de la [Figura 57](#) se define el mallado y el material ya creados:

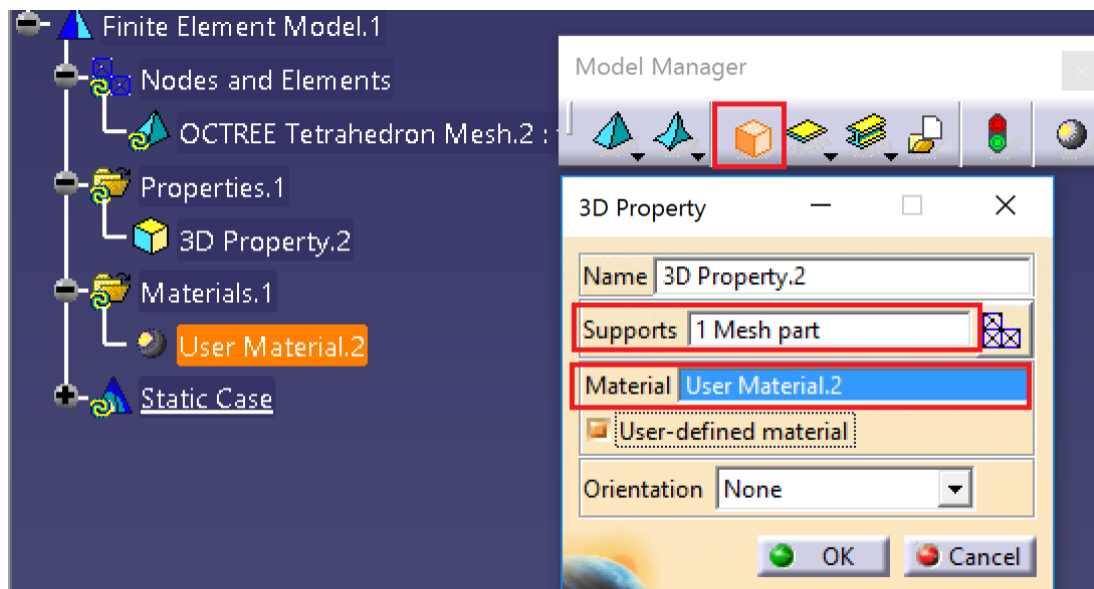


Figura 57. Definición de las propiedades del objeto.

A continuación, se define el empotramiento en la cara correspondiente mediante el comando *Camp* ([Figura 58](#)).

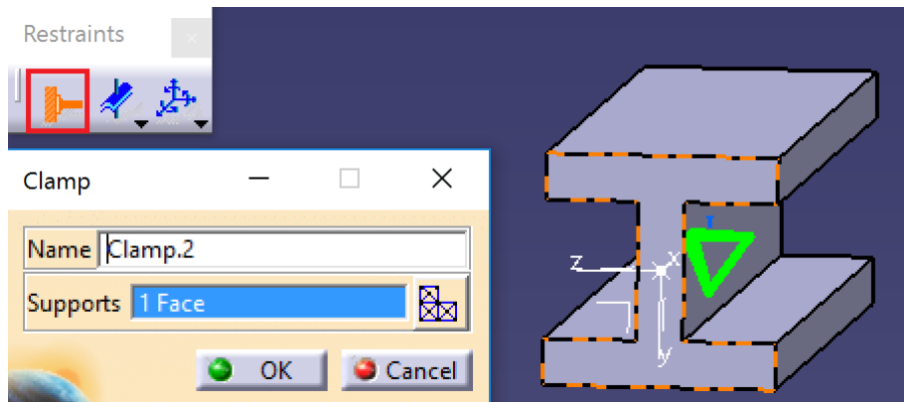


Figura 58. Comando Clamp.

Respecto a las cargas, como solo actúa el peso propio de la viga, se añade la fuerza de la gravedad como se ve en la [Figura 59](#).

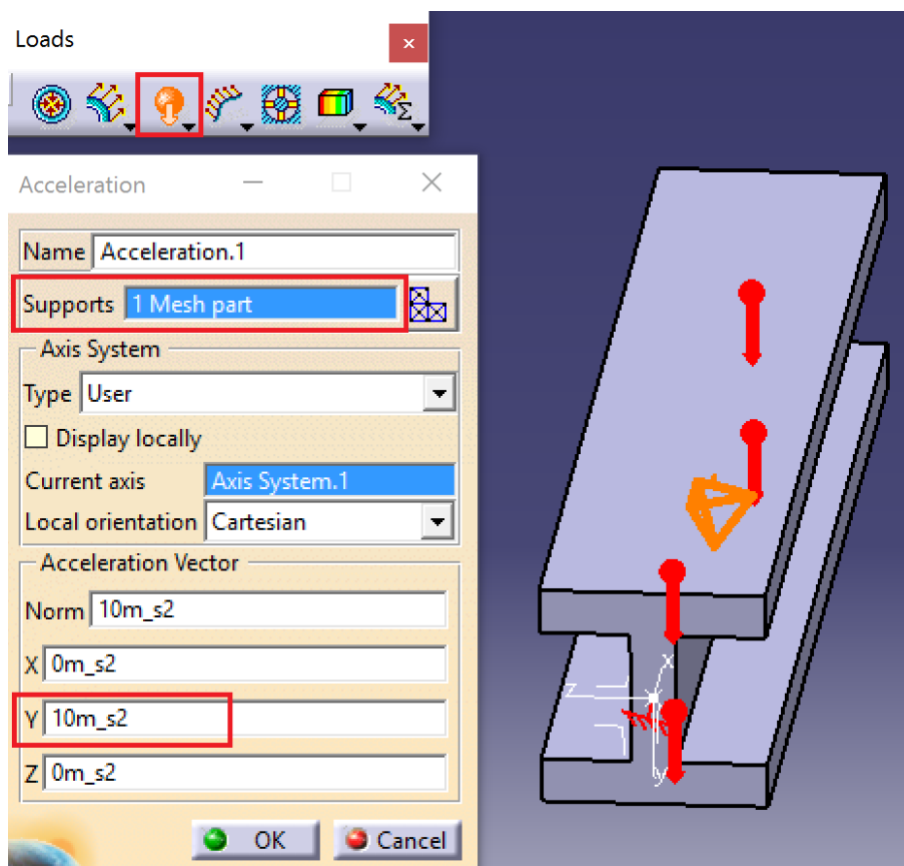


Figura 59. Comando Acceleration.

Finalmente se lanza el cálculo mediante el comando *Compute* de la [Figura 60](#), marcando la opción de *Preview*, para así poder pre visualizar el tiempo de cálculo.

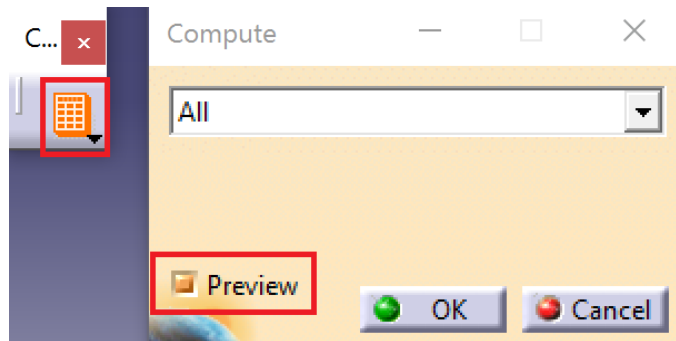


Figura 60. Comando Compute.

El tiempo de computación que se obtiene en la ventana de la [Figura 61](#) va a depender de los recursos de los que dispone cada equipo.

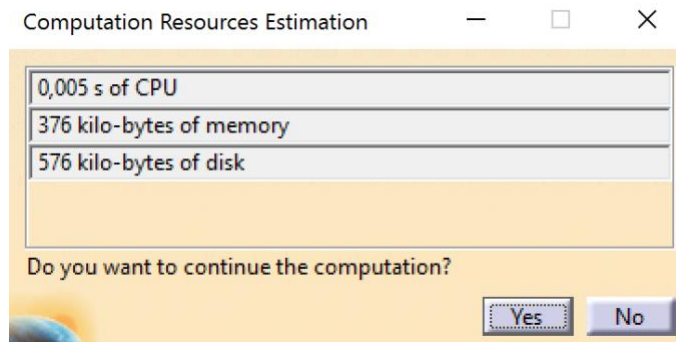


Figura 61. Ventana de tiempo de computación viga 3D.

Mediante el primer comando de *Image* de la [Figura 62](#) se obtiene la representación de la deformada y además se puede observar la distribución de los elementos de malla:

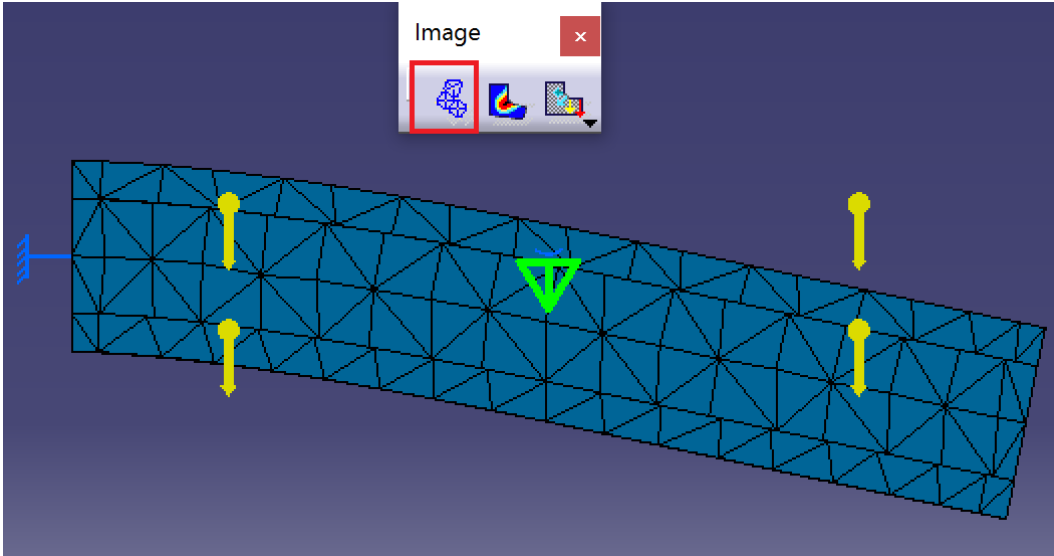


Figura 62. Deformada de la viga en voladizo 3D.

Mediante el comando *Information*, de la barra de herramientas *Analysis Tool* de la [Figura 63](#) se obtiene el número de nodos y elementos de los que dispone el mallado.

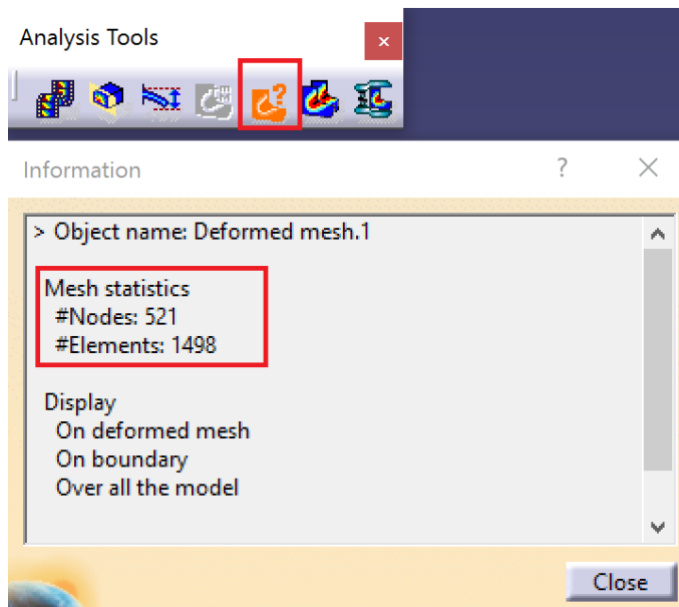


Figura 63. Ventana *Information*, número nodos y elementos viga 3D.

Finalmente con el tercer comando de *Image* se obtiene el desplazamiento máximo, sin embargo, para obtener los resultados del desplazamiento vertical, haciendo doble clic sobre el apartado de *Traslacion Displacement* de la [Figura](#)

64 y se abre la siguiente ventana, donde se selecciona la componente deseada, en función del sistema de referencia que se ha definido.

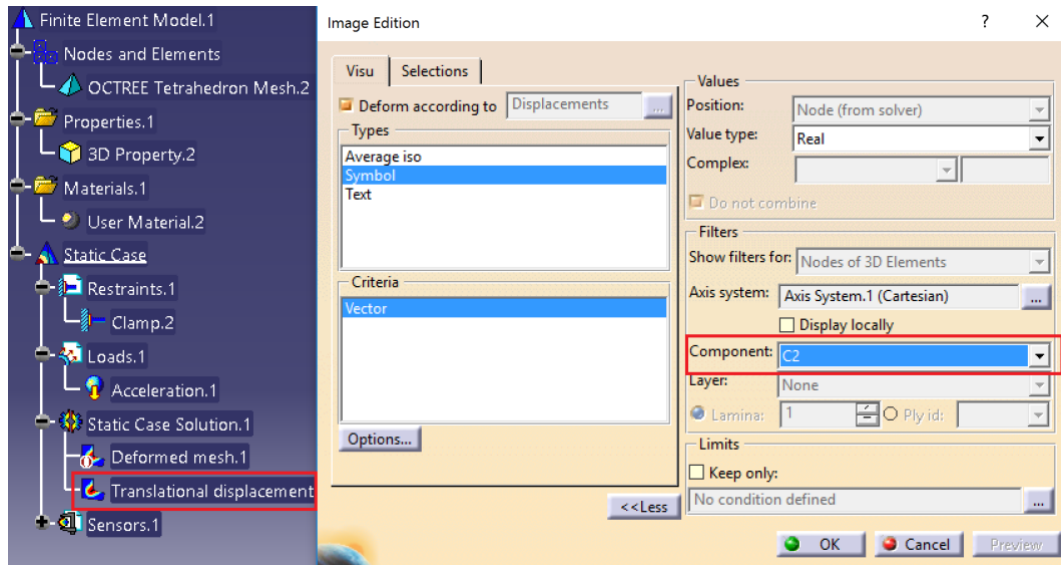


Figura 64. Ventana del apartado *Traslational displacement* del árbol.

Como se ve en la Figura 65, en el extremo opuesto al del empotramiento se obtiene un desplazamiento máximo de $0,547 \cdot 10^{-6}m$.

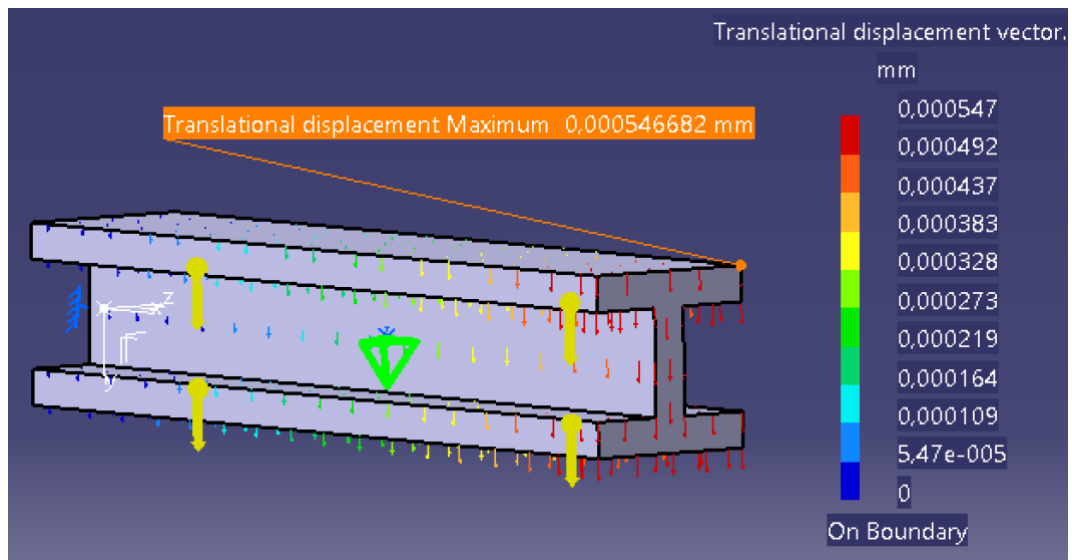


Figura 65. Desplazamientos de la viga en voladizo 3D.

Comparando este resultado con el obtenido teóricamente:

$$\% \text{ err} = \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100$$

$$= \frac{|0,547 \cdot 10^{-6} - 0,546 \cdot 10^{-6}|}{0,546 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 0,18 \%$$

Ecuación 8. Error en el cálculo de desplazamientos 3D.

4.1.2 Desplazamientos mediante mallado 2D

A continuación, se va a repetir el mismo ejercicio pero esta vez utilizando un mallado plano.

Por la tanto, el primer paso es diseñar la viga con superficies, y para ello en vez de hacerlo con el módulo *Part Design*, el cual está enfocado al diseño de piezas sólidas, se va a hacer uso del módulo *Generative Shape Design*, ya que se trata del módulo específico para el diseño en superficies.

Al igual que en el apartado anterior, también se empieza creando un *Sketch*, pero en este caso, como se aprecia en la [Figura 66](#) solo se representa las líneas medias de la viga

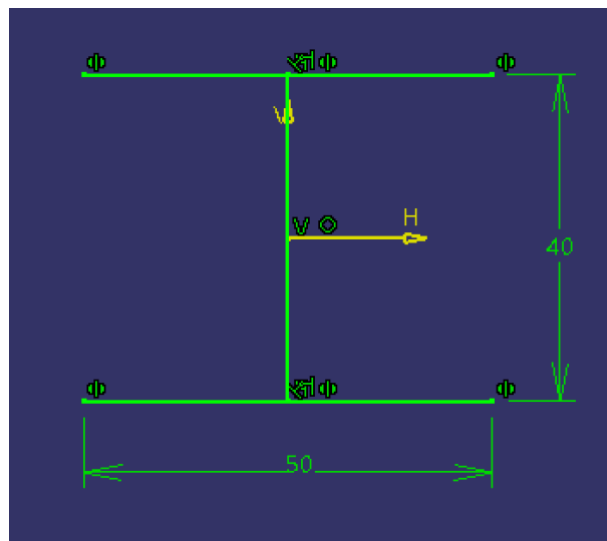


Figura 66. Sketch de las líneas medias de la viga.

Una vez que se tiene el *Sketch*, se va a utilizar el comando **Extrude** de la barra de herramientas *Surfaces*, para extruir el perfil de líneas medias la longitud deseada y en la dirección correspondiente, en este caso como se ve en la [Figura 67](#), 0,250m en la dirección del eje x.

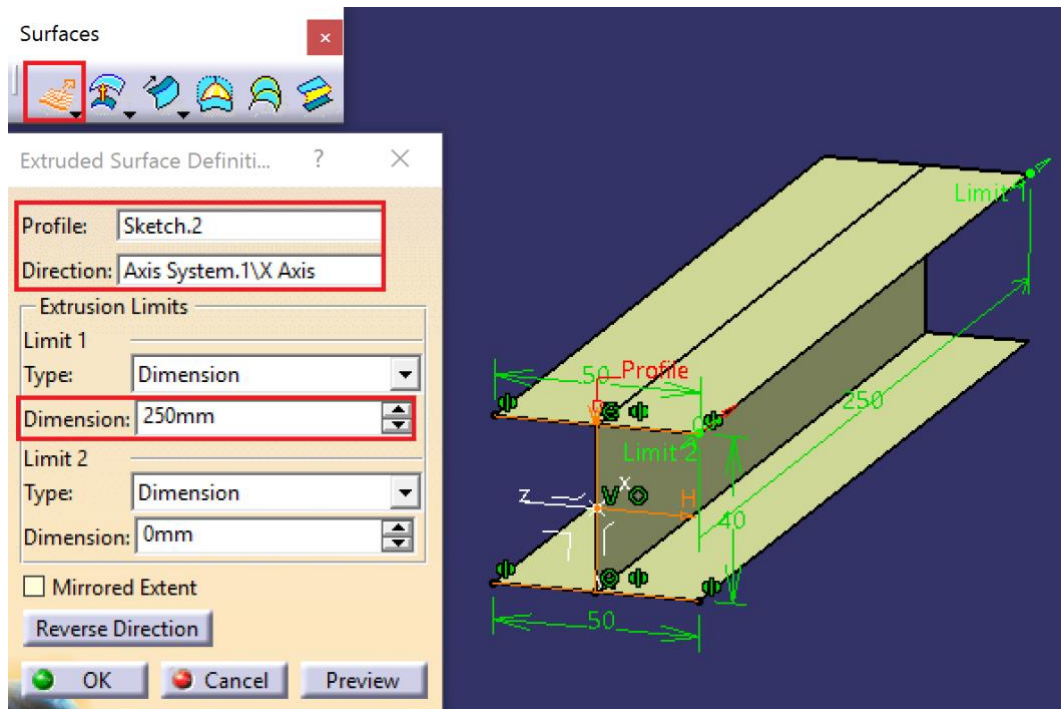


Figura 67. Comando Extrude para superficies.

Ahora para mallas las superficies se utiliza el comando *Octree Triangle Mesher* de la barra de herramientas *Mesh Parts*, donde se define el tamaño de los triángulos y el tipo, en este caso como se ve en la [Figura 68](#), lineales y del mismo tamaño que los que se habían definido en el caso 3D.

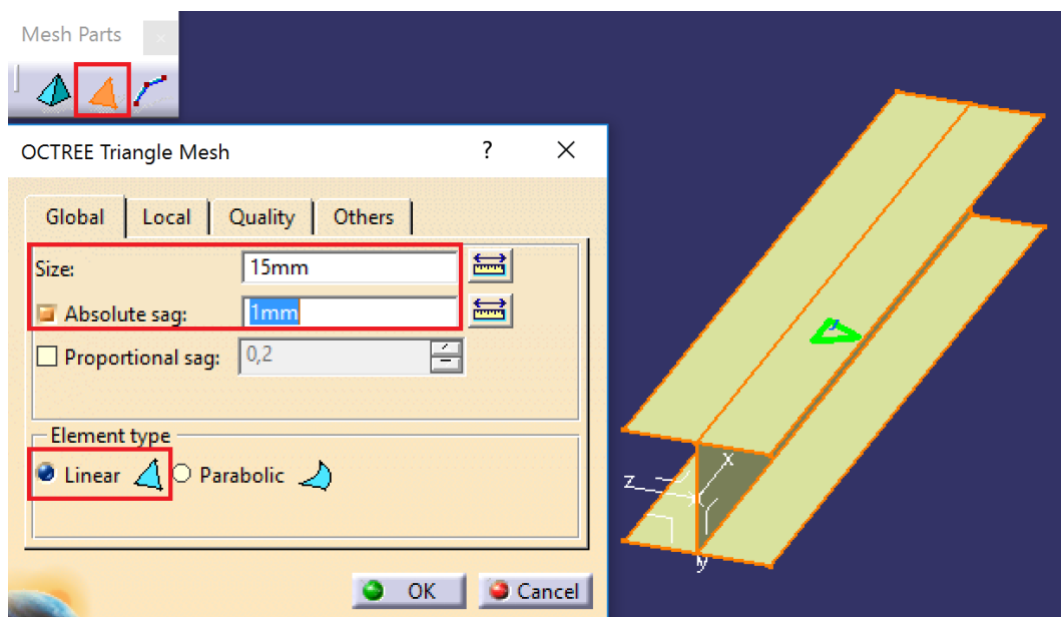


Figura 68. Mallado mediante elementos 2D.

En el apartado de *Properties*, se utiliza el comando correspondiente a propiedades de objetos 2D, donde se selecciona el mallado ya creado, el material que previamente se ha definido y lo más importante, se define el espesor de capa del mallado, en este caso se tiene un espesor de 10mm y se define un offset de 5mm (*Figura 69*) para que el espesor sea simétrico entre las superficies, ya que estas son creadas a partir de las líneas medias de la sección de la viga.

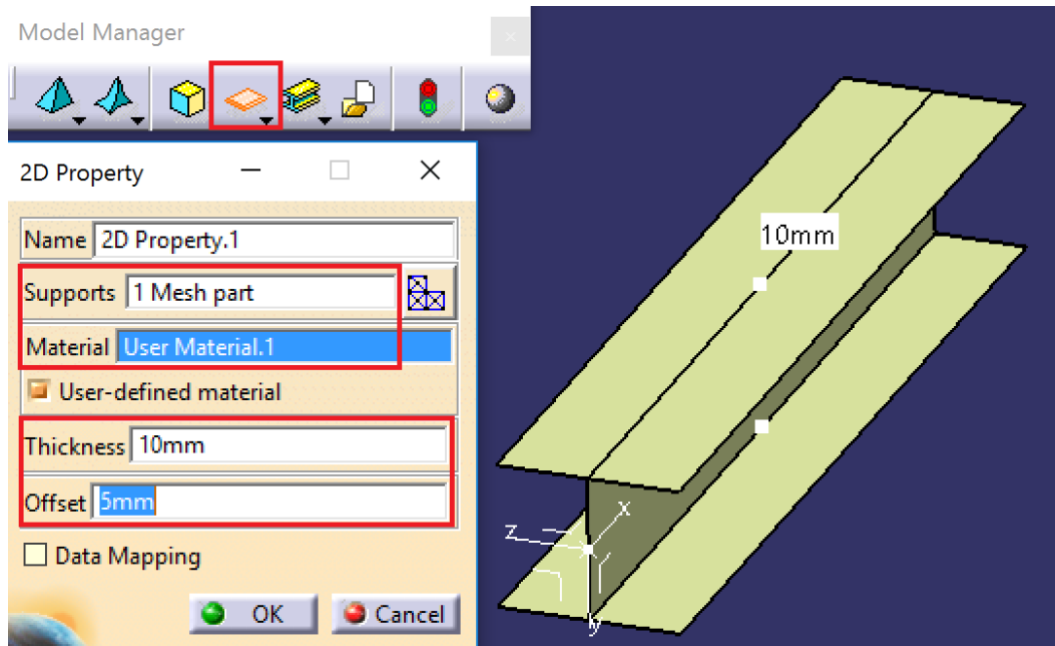


Figura 69. Propiedades del objeto 2D.

En cuanto al resto de apartados que componen el *Static case* (*Restraints, Loads,...*), se completan siguiendo los mismos pasos que en el caso de mallado 3D (*Figura 58*).

Con el modelo preparado, se procede a lanzar los cálculos. En este caso, como se ve en la *Figura 70* se tiene un tiempo de computación menor que en el caso del mallado 3D.

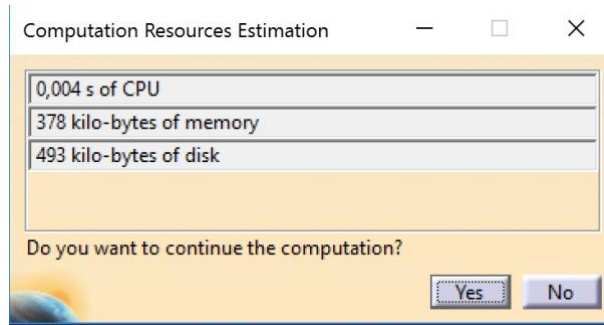


Figura 70. Ventana de tiempo de computación viga 2D.

En la [Figura 71](#) se tiene el resultado de la deformada

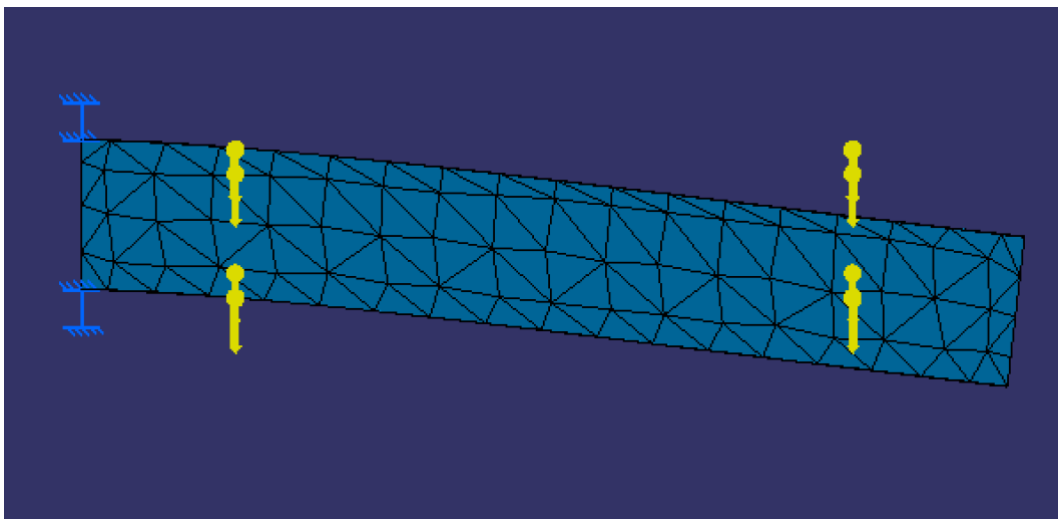


Figura 71. Deformada de la viga en voladizo 2D

En la [Figura 72](#) se observa que el número de nodos es menor que en el caso del mallado 3D ya que en este caso los elementos de malla son triángulos, los cuales los forman tres nodos.

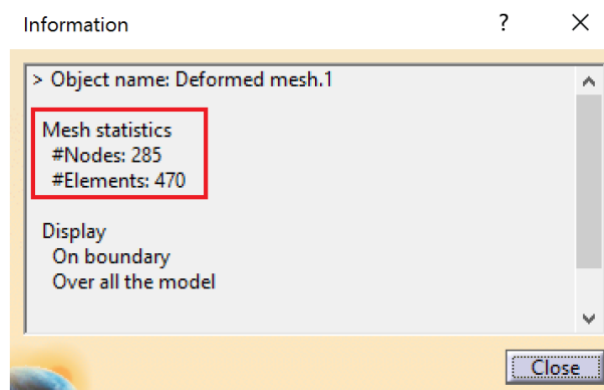


Figura 72. Ventana Information, número nodos y elementos viga 2D.

Finalmente se calculan los desplazamientos máximos (*Figura 73*), obteniéndose un resultado de $0,544 \cdot 10^{-6}m$.

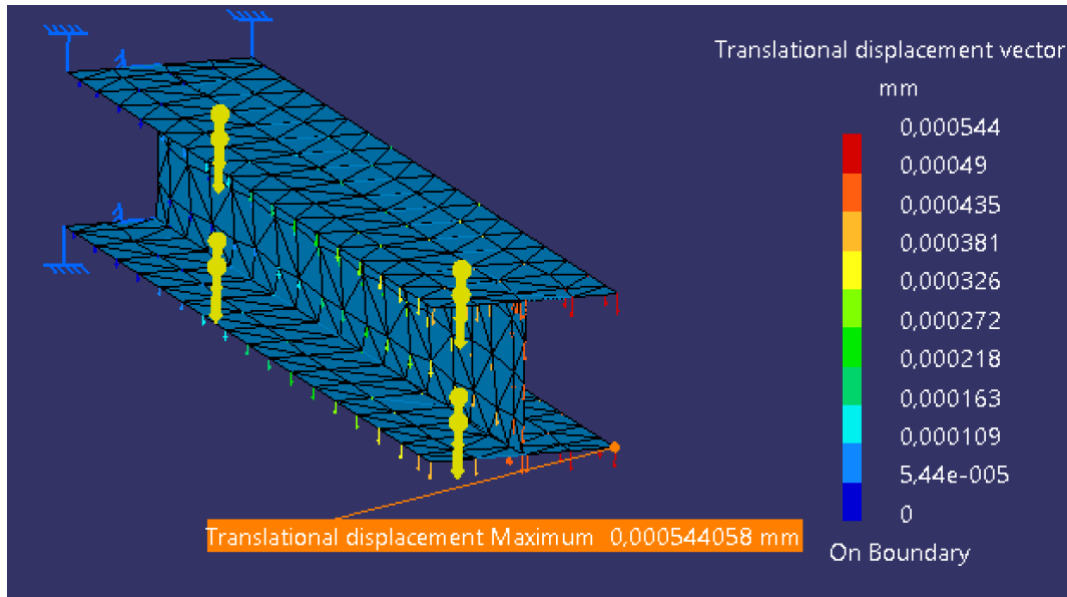


Figura 73. Desplazamientos de la viga en voladizo 2D.

Comparando este resultado con el teórico, se obtiene un error muy bajo.

$$\begin{aligned} \% \text{ err} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|0,544 \cdot 10^{-6} - 0,546 \cdot 10^{-6}|}{0,546 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 0,37 \% \end{aligned}$$

Ecuación 9. Error en el cálculo de desplazamientos 2D.

4.1.3 Desplazamientos mediante mallado 1D

A continuación, se procede a resolver el mismo ejercicio, pero esta vez mediante mallado 1D:

En este caso, en el apartado de diseño (*Part Design*) se va a dibujar solo una línea con la longitud total de la viga, mediante el comando *Line Definition* de la *Figura 74*.

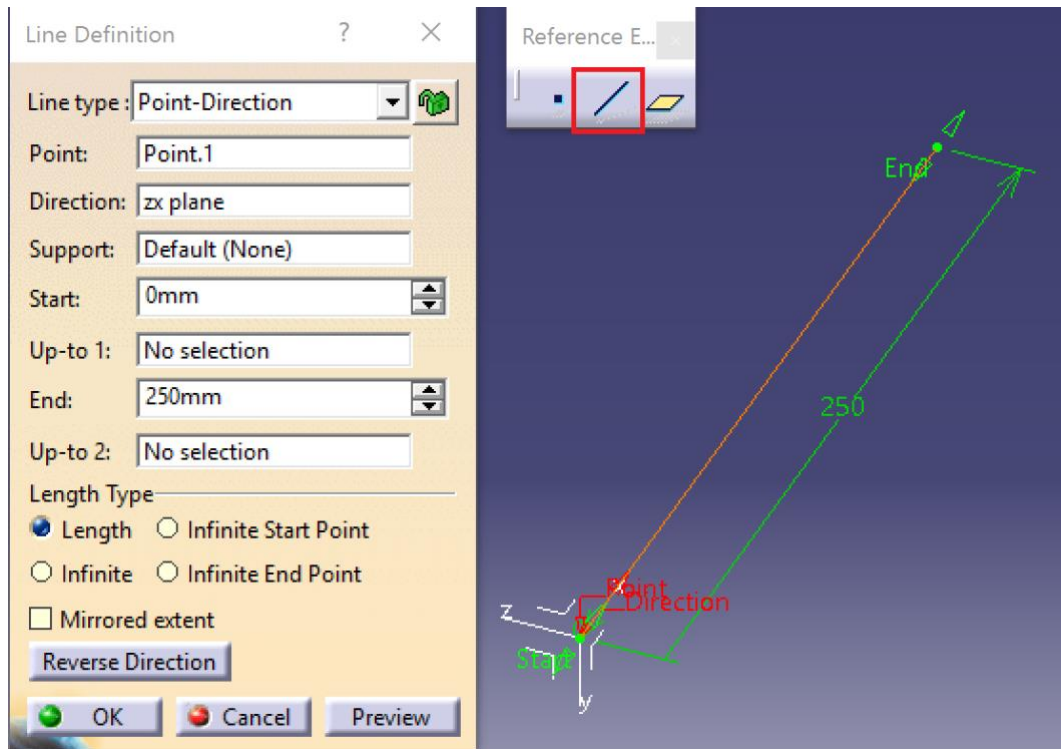


Figura 74. Comando Line Definition.

Mallándose con elementos de 15mm (Figura 75) como en los anteriores casos.

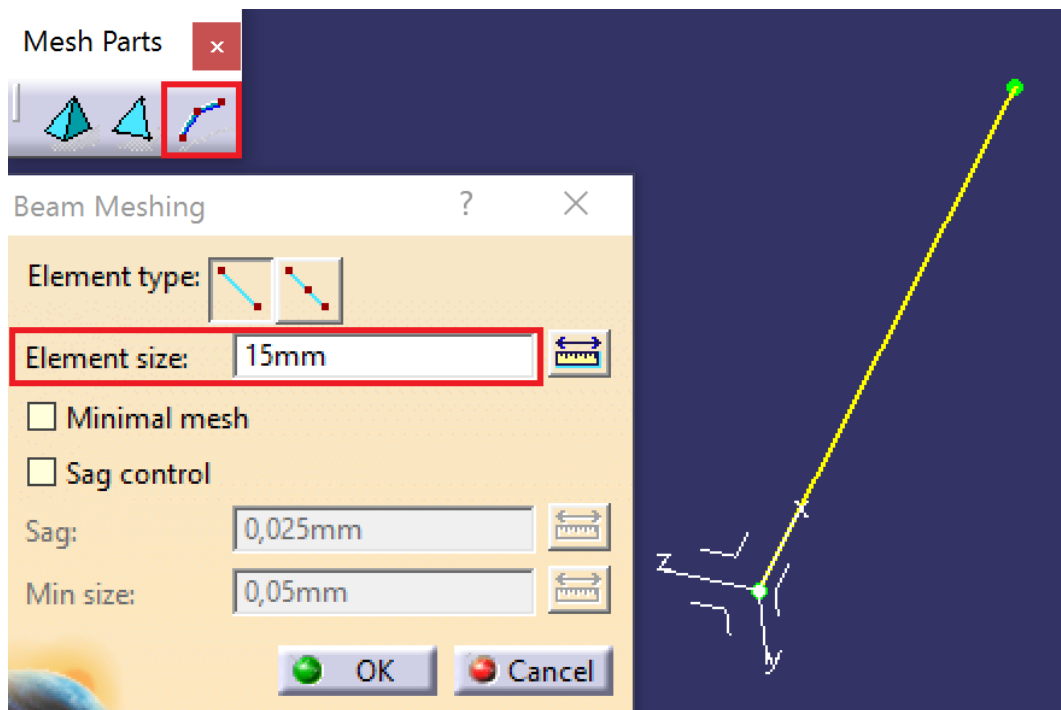


Figura 75. Mallado mediante elementos 1D.

Se definen las propiedades para el caso de vigas 1D, donde como se ve en la [Figura 76](#) se tienen que completar los siguientes apartados:

- *Supports*: se selecciona el mallado de la línea dibujada.
- *Material*: el cual se ha definido previamente como en los casos previos.
- *Type*: en este apartado se tiene una lista de los tipos de secciones más habituales. En este caso se selecciona la opción de sección en I y se completan las casillas de la ventana de *Beam Definition* de la [Figura 76](#).
- *Orientation geometry*: aquí se define la orientación de la sección. En este caso se ha escogido el eje z del sistema de referencia.

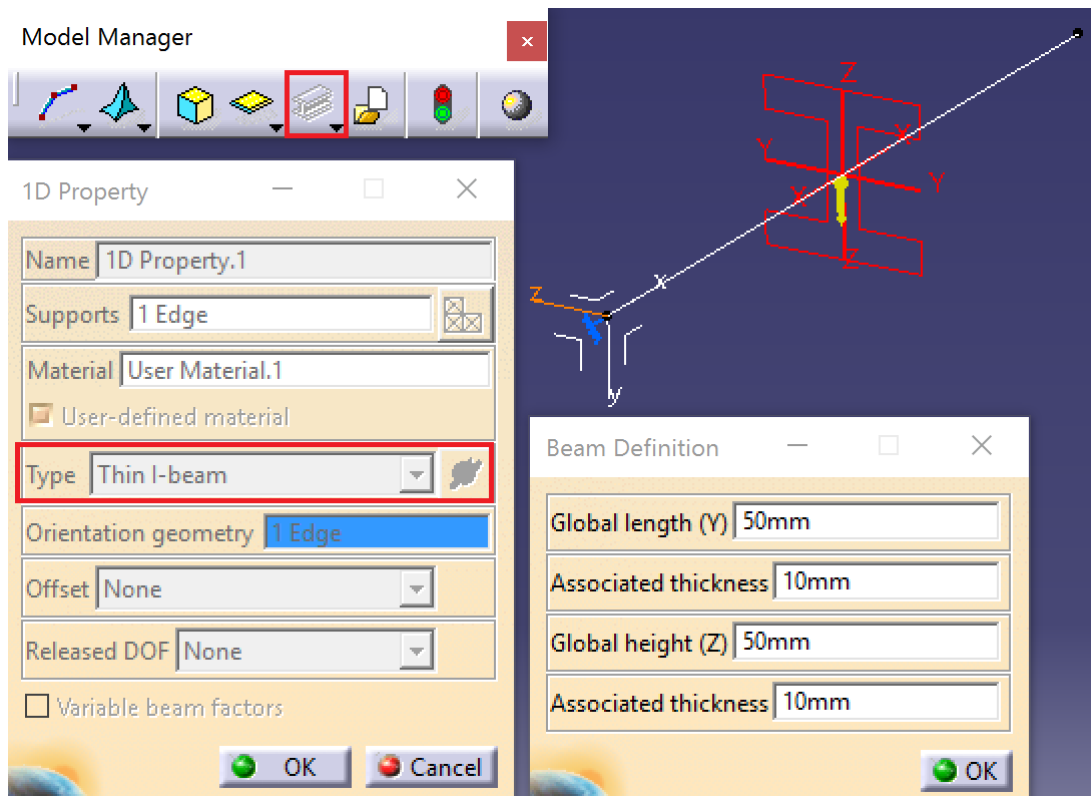


Figura 76. Propiedades del objeto 1D.

Tras definir el empotramiento y la carga asociada a su propio peso, se lanzan los cálculos, y según se ve en la [Figura 77](#) el tiempo de cálculo es el menor de los tres casos:

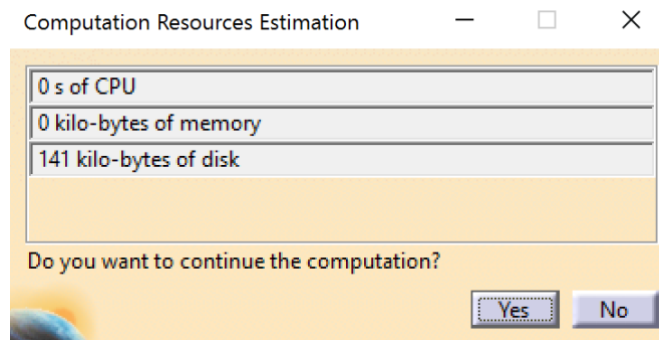


Figura 77. Ventana de tiempo de computación viga 1D.

Como resultado, el desplazamiento máximo de la viga en el eje vertical es de $-0,5503 \cdot 10^{-6}m$.

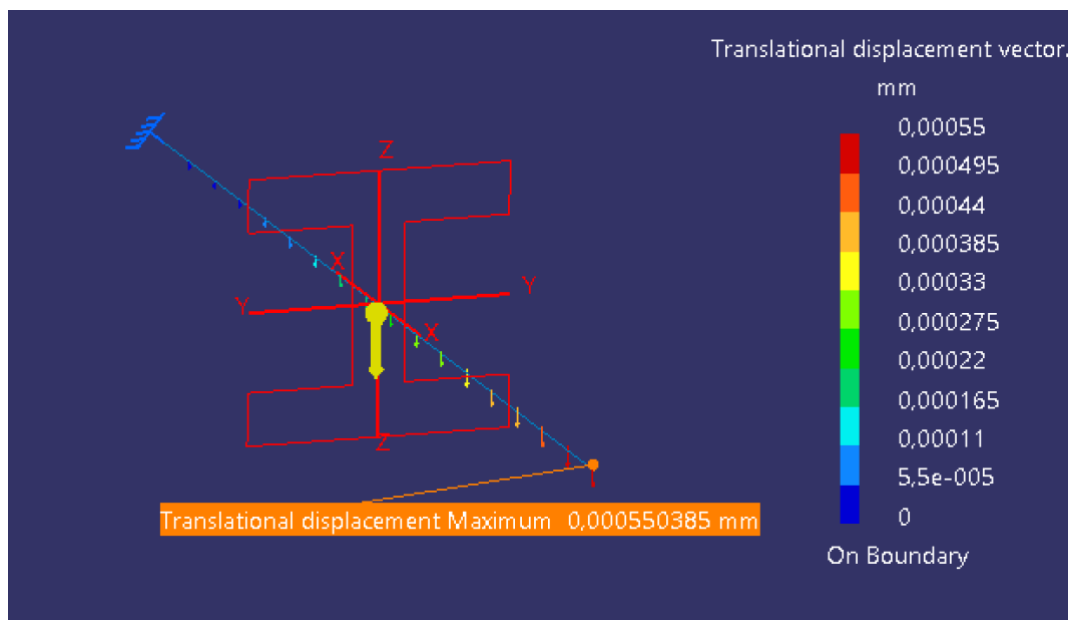


Figura 78. Desplazamientos de la viga en voladizo 1D.

Comparando este resultado con el obtenido teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|0,550 \cdot 10^{-6} - 0,546 \cdot 10^{-6}|}{0,546 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 0,73 \% \end{aligned}$$

Ecuación 10. Error en el cálculo de desplazamientos 1D.

En este caso el número de nodos y elementos que se tienen en la [Figura 79](#), es fácil de calcular, siendo la longitud de la viga de 250mm y los elementos de malla de 15mm

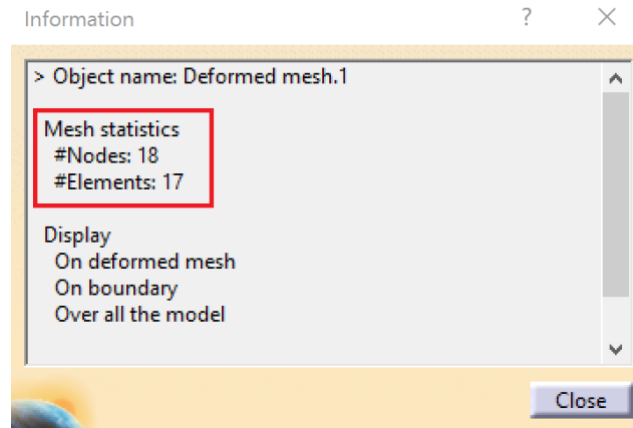


Figura 79. Ventana Information, número nodos y elementos viga 1D.

En conclusión, en los tres casos se han obtenido errores por debajo del 1%, los cuales permiten corroborar el objetivo de este capítulo de validar los resultados del cálculo de desplazamientos mediante el módulo de elementos finitos de CATIA. Por otra parte como era de esperar los mayores tiempos de cálculo se tienen para el caso del mallado 3D y los menores para el 1D.

4.2 Validación del cálculo de tensiones

Otra de las actividades características del análisis estructural estático es el estudio de la distribución de tensiones. En este apartado va a validarse la utilidad de la herramienta de CATIA de cálculo de tensiones para su uso en el ámbito educativo mediante la comparación de los resultados de un problema teórico con los obtenidos mediante elementos finitos.

En este caso en vez de continuar la validación con el problema del capítulo anterior, se va a plantear un nuevo problema obtenido de [\[4\]](#), para así describir otros tipos de cargas.

Por lo que se procederá a calcular la tensión normal teórica de la viga de la [Figura 80](#).

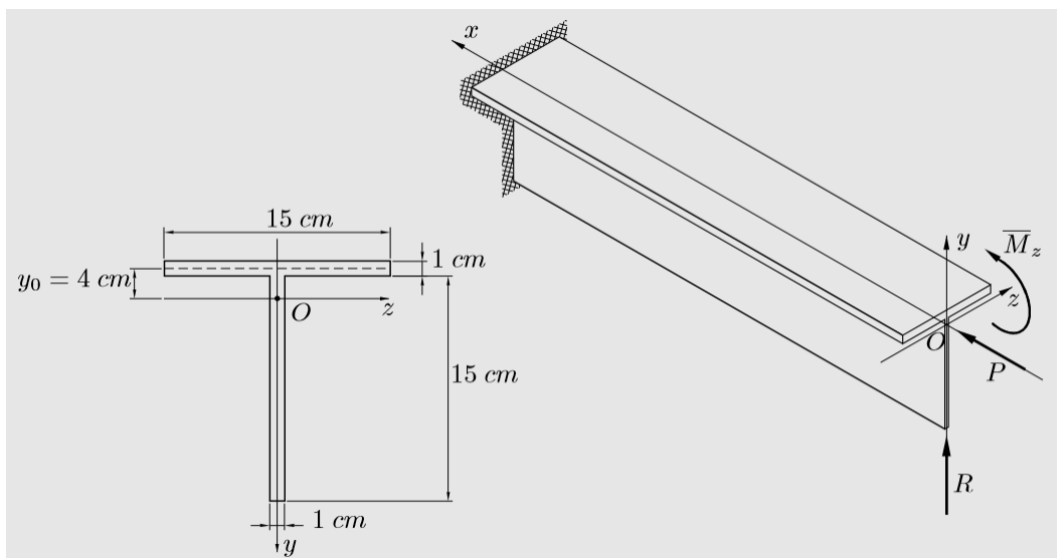


Figura 80. Viga en T empotrada.

Se trata de una viga en T de 5m de longitud empotrada en un extremo y que tiene aplicadas en el otro extremo una carga puntual vertical, una carga puntual horizontal y un momento puntual en sentido negativo del eje z, cuyos valores son:

$$R = 3000 \text{ N}$$

$$P = 10000 \text{ N}$$

$$\overline{M}_z = 1000 \text{ Nm}$$

La tensión nominal teórica viene definida según la siguiente ecuación:

$$\sigma_x = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{M_y(x) \cdot I_z - M_z(x) \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \cdot z + \frac{M_z(x) \cdot I_y - M_y(x) \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \cdot y$$

Ecuación 11. Tensión Normal.

Inicialmente se calcula el área, el momento de inercia, el esfuerzo axial y el momento flector:

$$A = 2 \cdot 15 \cdot 1 = 30 \text{ cm}^2 = 0,003 \text{ m}^2$$

Ecuación 12. Área de sección de una viga en T.

Se considera el sistema de referencia con origen en el extremo empotrado donde; el eje x se dirige hacia el extremo libre de la barra y el eje y coincide con el eje de simetría de la sección, por lo tanto, los ejes adoptados son los principales de inercia. De acuerdo con esta disposición, al ser el eje y un eje de simetría, se tiene que $I_{yz} = 0$.

Al tener solo un momento aplicado en el eje z, solo es necesario calcular el momento de inercia en z.

$$I_z = \frac{1}{12} b^3 e + be \left(\frac{1}{2} b + \frac{1}{2} e - y_0 \right)^2 + \frac{1}{12} be^3 = \frac{1525}{2} \text{ cm}^4 = 762,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Ecuación 13. Momento de inercia en z.

Para calcular el esfuerzo axial y el momento flector, se tiene que tener en cuenta que el origen del sistema de referencia se encuentra en el extremo empotrado de la viga, por lo tanto.

$$N_x(0) = -P = -10000 \text{ N}$$

Ecuación 14. Axil de viga en T.

$$M_z(0) = \overline{M_z} + R \cdot L = 1000 + 3000 \cdot 5 = 16000 \text{ Nm}$$

Ecuación 15. Momento flector de viga en T.

Finalmente, se calcula la tensión normal que se tiene en el empotramiento, es decir, para $x = 0$ y para cada punto del eje vertical.

$$\sigma_x(0, y) = \frac{N_x(0)}{A} + \frac{M_z(0)}{I_z} \cdot y = \frac{-10000}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{16000}{762,5 \cdot 10^{-8}} \cdot y \left[\text{N/m}^2 \right]$$

Ecuación 16. Tensión normal en el extremo libre.

De acuerdo con el sistema de referencia adoptado, la tensión máxima se produce en el extremo inferior del alma, cuya coordenada y es 0,115m.

$$\sigma_x(0, 0.115) = \frac{-10000}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{16000}{762,5 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,115 = 237,98 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Ecuación 17. Tensión Máxima.

Por otro lado, la tensión mínima se produce en el extremo superior del ala, cuya coordenada en y es -0,045m.

$$\sigma_x(0, -0.045) = \frac{-10000}{3 \cdot 10^{-3}} - \frac{16000}{762,5 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,045 = -97,76 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Ecuación 18. Tensión mínima.

Para comparar el resultado teórico con el experimental, igual que se ha hecho en el capítulo [Validación del cálculo de desplazamientos.](#), donde se calculaba el desplazamiento de la viga mallada con elementos 3D, 2D y 1D, en este caso se va a proceder de la misma forma, para poder comparar los diferentes modelos de cálculo.

4.2.1 Tensión normal mediante mallado 3D

En este apartado se van a definir todos los pasos a seguir para calcular la tensión normal de la viga mostrada en la *Figura 80*.

Para el caso de un mallado 3D, se empieza diseñando la viga en el módulo *Part Design*, mediante el *Sketch* de la *Figura 81* y una extrusión (*Pad*) de 5m.

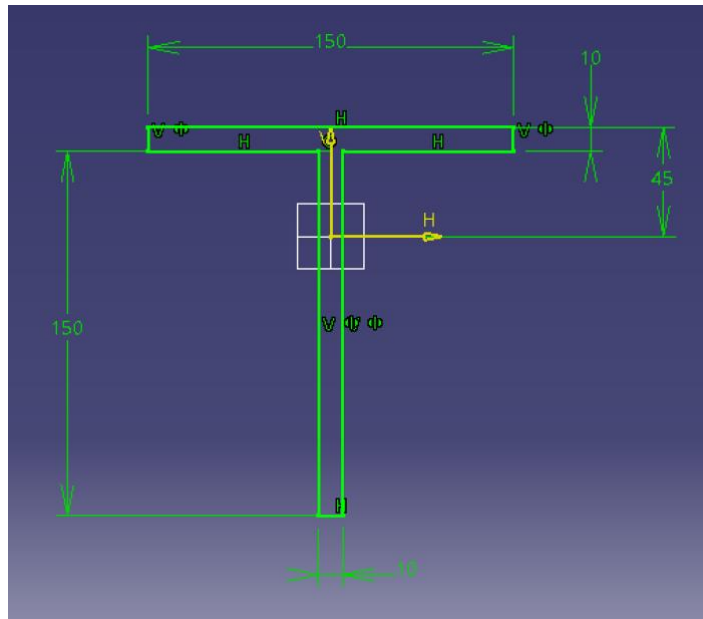


Figura 81. Sketch de una viga en T.

Se empieza mallando la viga con tetraedros lineales para así simplificar los cálculos y por ejemplo de 20mm, sin embargo en los siguientes capítulos se explica cómo determinar el tamaño de malla idóneo.

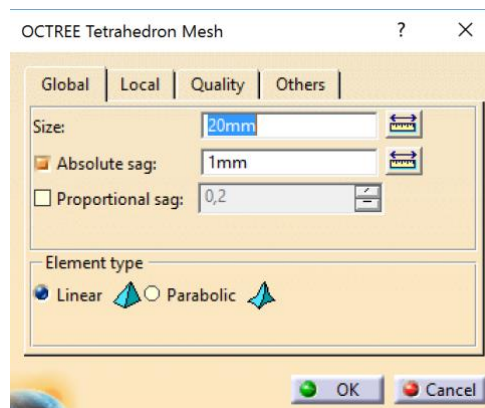


Figura 82. Ventana de Octree Tetrahedron Mesh.

A continuación se define el material, las propiedades del objeto, se añade un empotramiento en el extremo izquierdo de la viga y en el otro extremo se definen las cargas y momentos.

- Carga puntual vertical negativa de 3000 N, para la cual se hace uso del segundo comando de la barra de herramientas *Load* y en la ventana que se abre (*Figura 83*), se define como:
 - *Supports*: la cara superior de la viga.
 - *Current axis*: el sistema de referencia local (el cual se ha creado previamente).
 - *Y*: la carga con el sentido.
 - *Handler*: se define el punto en el que se concentra la carga, en este caso como se ve en la *Figura 80*, este punto corresponde al baricentro, por lo que, se va a crear previamente un punto mediante el comando *Point* con las coordenadas del baricentro, las cuales vienen definidas en la sección de la *Figura 80*.

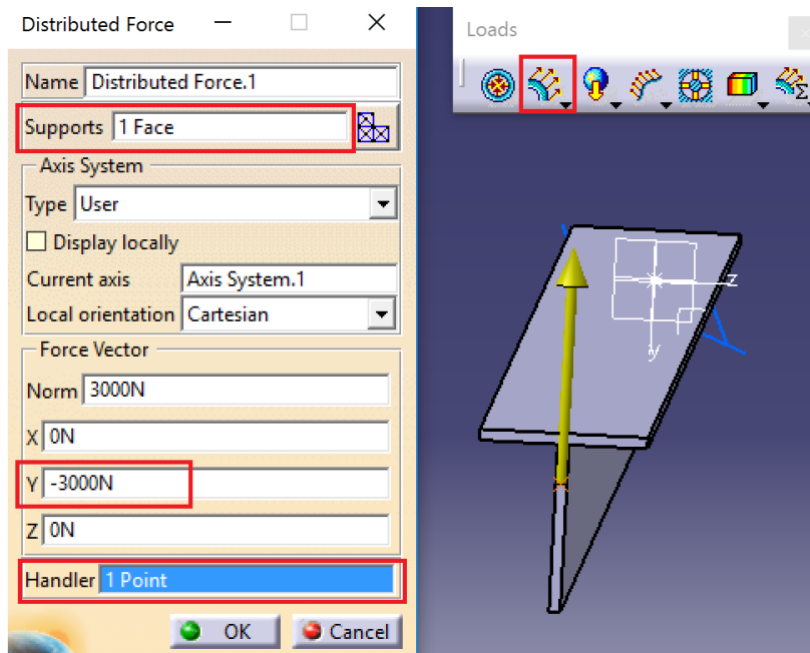


Figura 83. Comando Distributed Force para una carga puntual vertical.

- Carga puntual horizontal negativa de 10000 N (*Figura 84*).

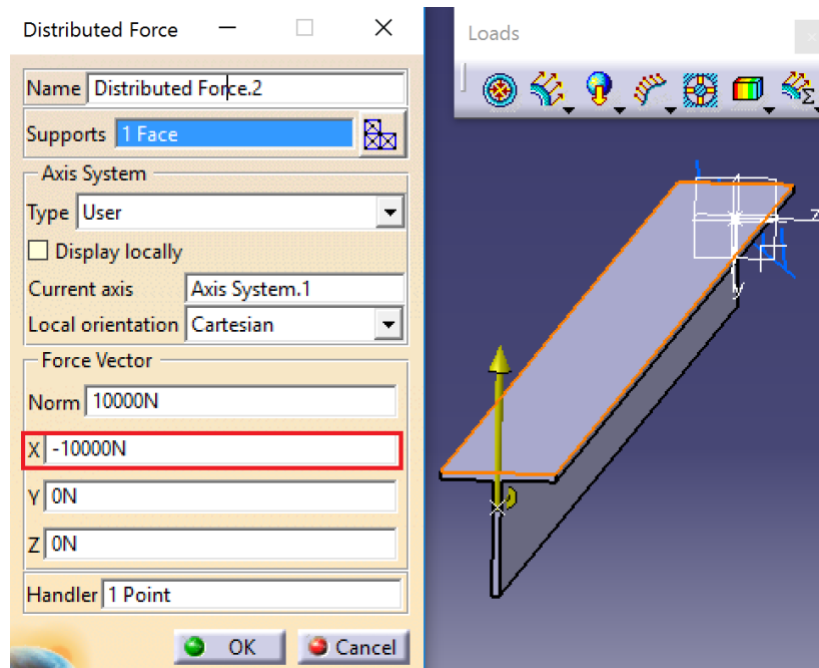


Figura 84. Comando Distributed Force para una carga puntual horizontal.

- Momento puntual en el eje z de sentido negativo de 1000 Nm: en este caso se hace uso del segundo comando de la sub-barra *Forces*. (Figura 85). A diferencia de las cargas puntuales, aquí solo se permite seleccionar superficies como *Supports*, por lo que se elige la cara del extremo de la viga.

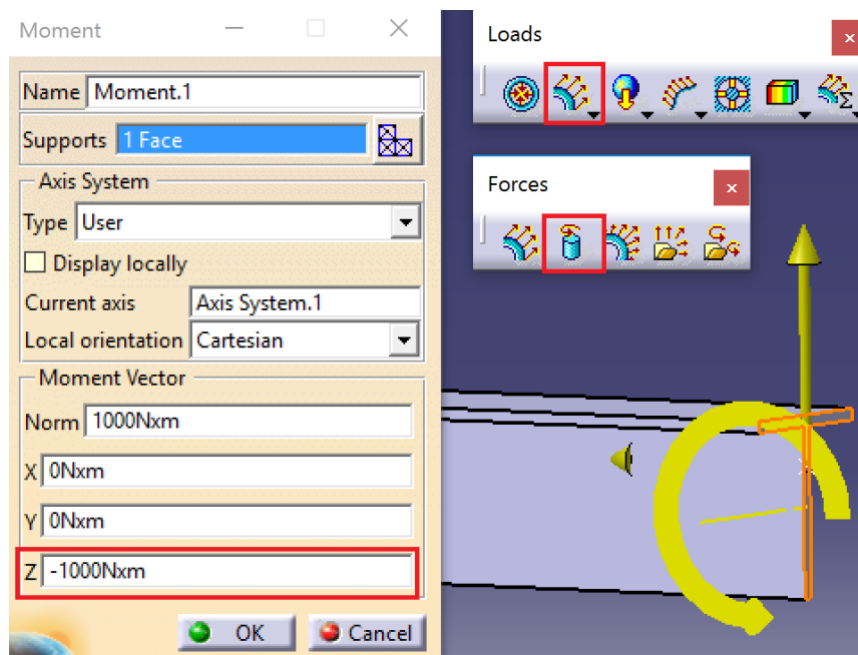


Figura 85. Comando Moment.

Una vez que se tienen definidas todas las cargas, ya se pueden lanzar los cálculos, los cuales como se aprecia en la [Figura 86](#) conllevan 0,02 seg de computación:

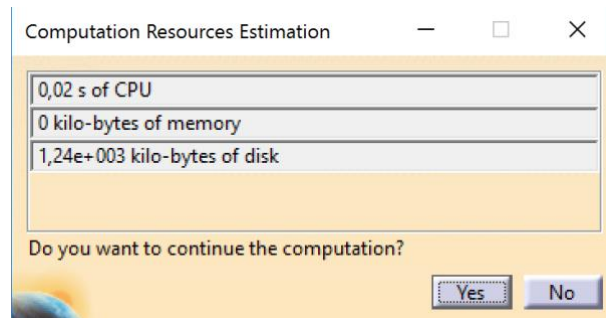


Figura 86. Tiempo de computación de la viga en T.

Previamente a resolver las tensiones se calcula la deformada, pero para poder apreciar las diferencias, en la [Figura 87](#) se ha superpuesto el resultado de la deformada (verde) con la viga original (gris).

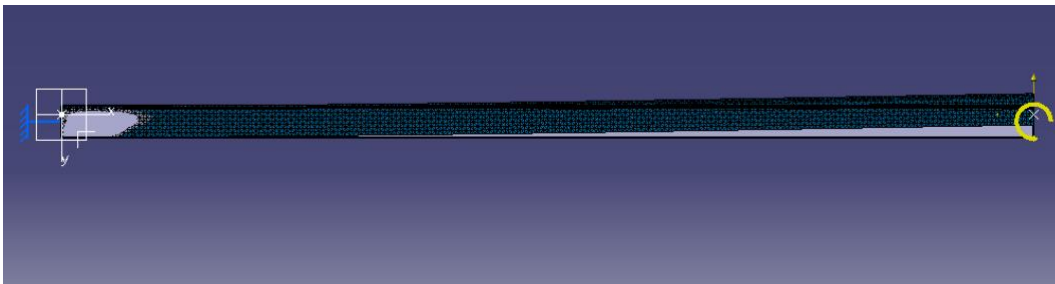


Figura 87. Deformada de la viga en T.

En la cual se disponen del siguiente número de nodos y elementos ([Figura 88](#)).

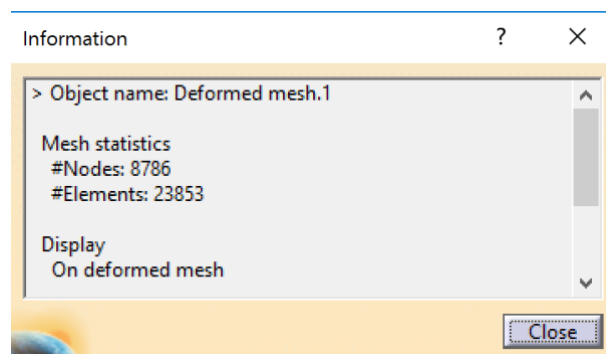


Figura 88. Número de Nodos y Elementos de la viga en T.

Para calcular las tensiones, se utiliza el comando **Principal Stress** de la subbarra de herramientas *Other Image* de la [Figura 89](#).



Figura 89. Comando *Principal Stress*.

Sin embargo, para obtener los valores de la tensión normal, se hace doble clic sobre el apartado de *Stress full tensor component* de la [Figura 90](#) y en *Types* se selecciona *Discontinuous iso*, en *Criteria* se elige la opción *Tensor component* (todas estas opciones se han descrito en el capítulo 3.6) y en la parte derecha de la ventana *Image Edition*, se escoge la componente *C11*, ya que es la correspondiente al eje x del sistema de referencia local previamente definido, el cual se selecciona en el apartado de *Axis System*:

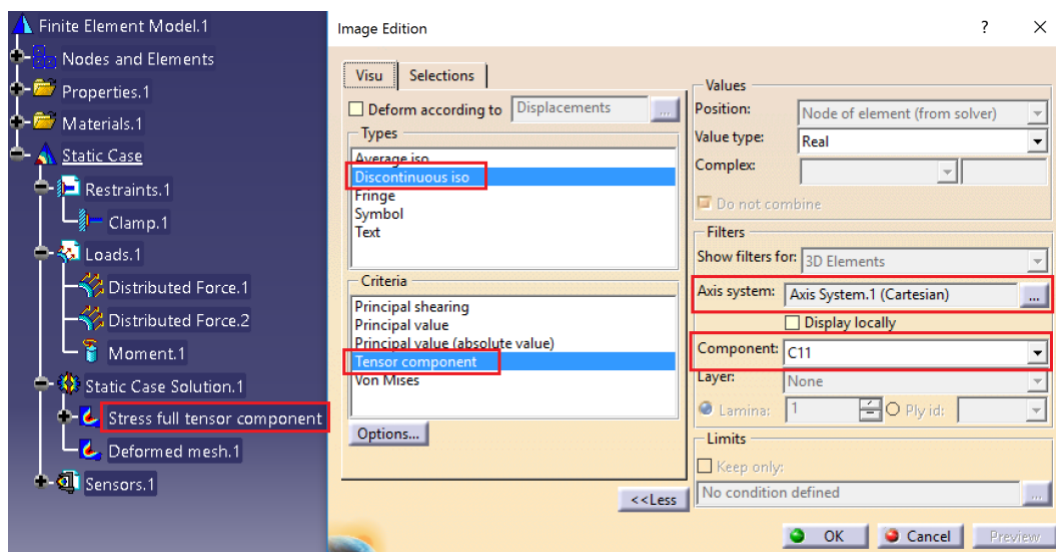


Figura 90. Configuración de *Stress full tensor component*.

En la [Figura 91](#) se tienen los resultados de la tensión normal de algunos elementos de malla del extremo superior del ala en el extremo empotrado de la viga, por lo que se va a tomar el valor promedio de la tensión de los nudos de la arista en cuestión.

En el extremo superior se tiene un valor promedio de **99,5 MPa**.

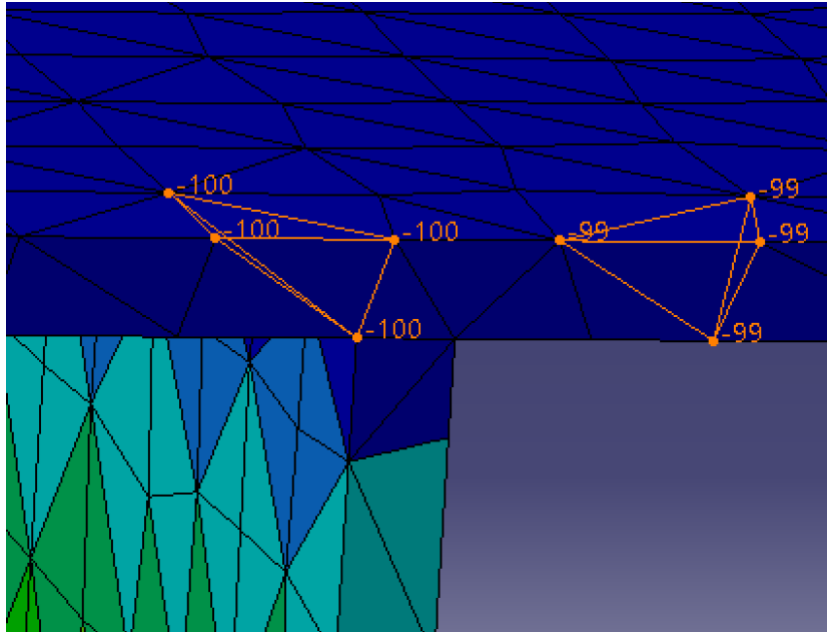


Figura 91. Tensión en el ala.

En la [Figura 92](#) se observan los valores de la tensión normal de los elementos de malla del extremo inferior del alma, por lo tanto, se obtiene un valor promedio de la tensión normal de **208 MPa**.

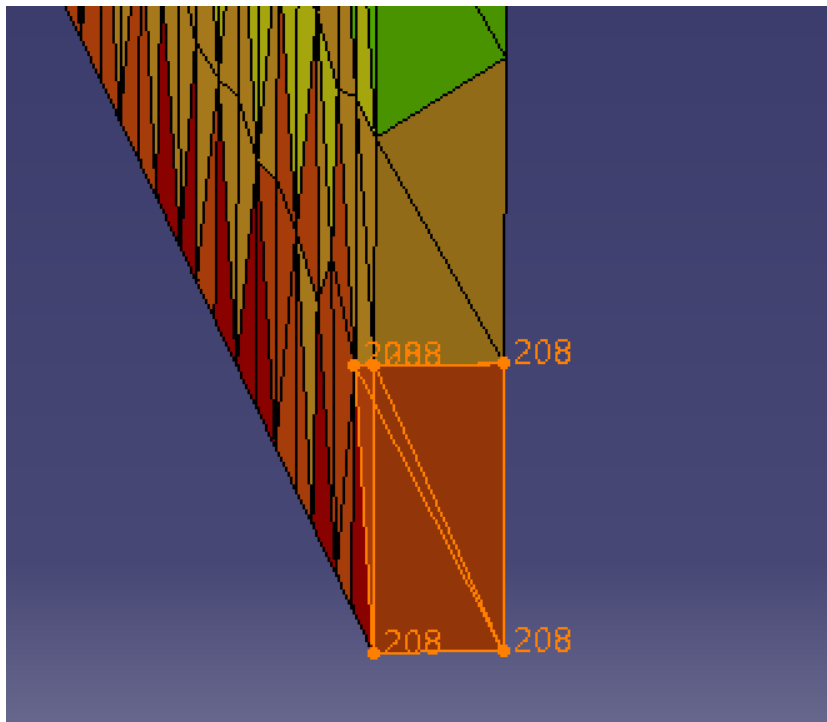


Figura 92. Tensión en el alma.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|99,5 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 2,1 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ err, inf} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|208 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 12,6 \% \end{aligned}$$

Ecuación 19. Error de cálculo de tensión en viga T

Una de las posibles causas de los errores observados es el tamaño de malla escogido, que es en cierta medida arbitraria y dependiente de la persona que realiza el mallado. Por lo tanto, para hacer una estimación de si el tamaño del mallado elegido es el correcto se va a calcular el error global estimado mediante el comando de **Precision** de la sub-barra *Other Image* y el comando de **Information** (Figura 93).

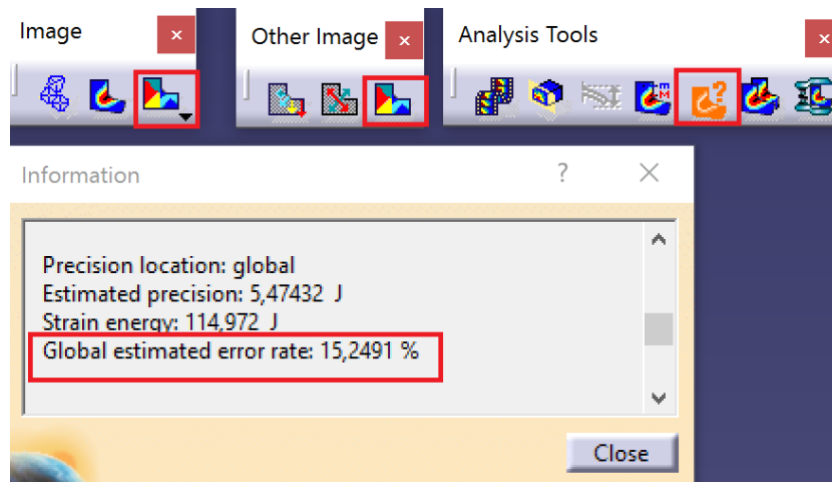


Figura 93. Comando del error global.

Se tiene un error del 15,3%, que en principio es excesivo teniendo en cuenta que el problema que se pretende resolver es relativamente simple. Para mejorar este resultado actuando sobre el mallado, se tienen varias vías de actuación:

- Pasar de mallado con tetraedros lineales a tetraedros parabólicos, lo cual permitiría que con el mismo tamaño de elemento de malla, conseguir mejores resultados, ya que los tetraedros lineales se componen de cuatro nodos, en cambio los parabólicos de 10 nodos.
- Reducir el tamaño de los elementos de malla, pero para conseguir valores óptimos, implicaría aumentar considerablemente el tiempo de computación, lo que compromete la utilidad de esta estrategia en problemas complejos.
- Hacer un mallado local en la zona que se considere más crítica para los cálculos. En este caso, se haría un mallado más fino en la cara del empotramiento, pero al tener una viga tan larga, no se van a obtener grandes mejoras.
- Realizar un mallado adaptativo, donde el propio programa realiza automáticamente un refinado de la malla en las zonas donde considera que son críticas para los cálculos.

Por lo tanto, se va a aprovechar este caso, para analizar las cuatro opciones que se acaban de describir y así poder comparar los resultados y comprobar estas hipótesis.

- **Tetraedros parabólicos:**

En este caso, simplemente dentro del apartado de *OCTREE Tetrahedron Mesh* de la *Figura 94* se pasa de tetraedros lineales a parabólicos:

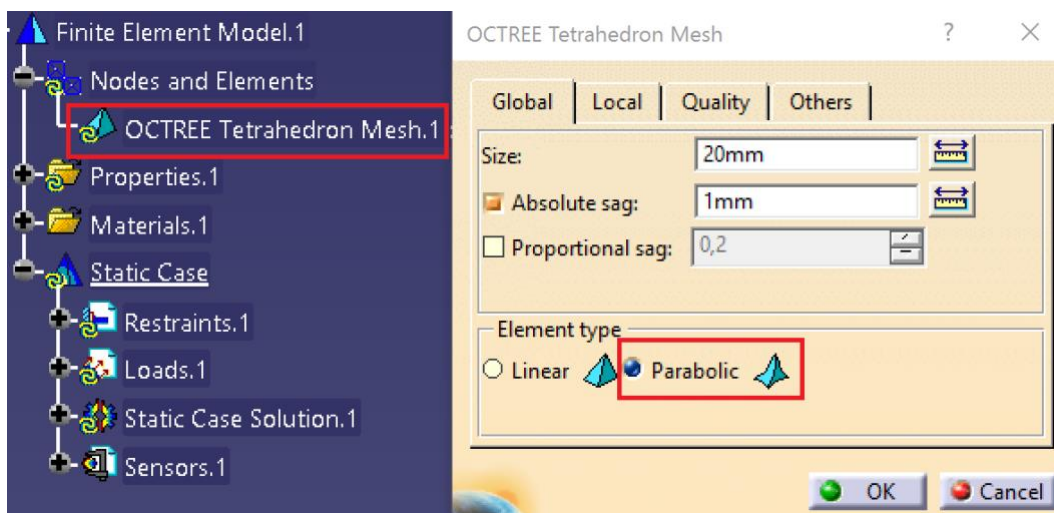


Figura 94. Definición de tetraedros parabólicos.

Con esta modificación se lanzan los cálculos y en la [Figura 95](#) se aprecia que el tiempo de computación ha aumentado considerablemente, ya que se ha pasado de 0,02 seg a 7 seg.

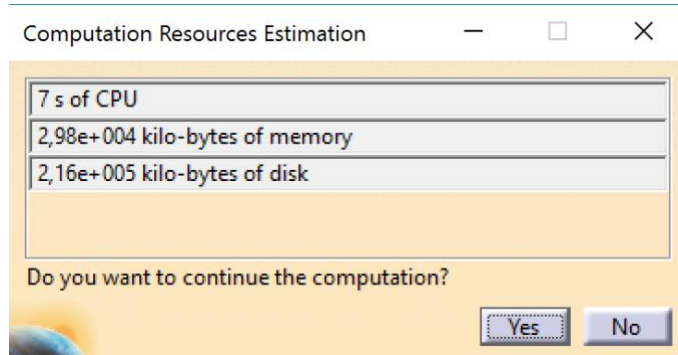


Figura 95. Tiempo de computación para tetraedros parabólicos.

Ahora el error global estimado ([Figura 96](#)) es mucho menor.

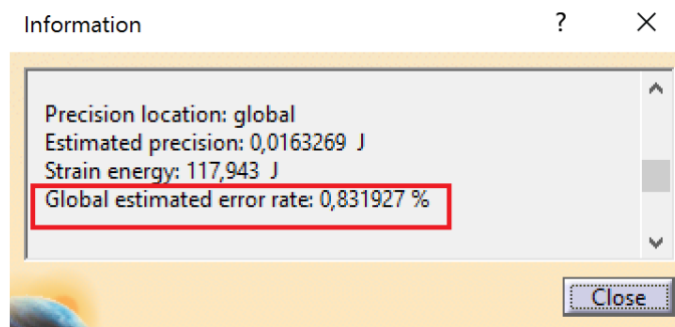


Figura 96. Error global para tetraedros parabólicos.

Al relanzar los cálculos, en el extremo superior del ala de la [Figura 97](#) se tiene un valor promedio de la tensión normal de **-98,4 MPa**.

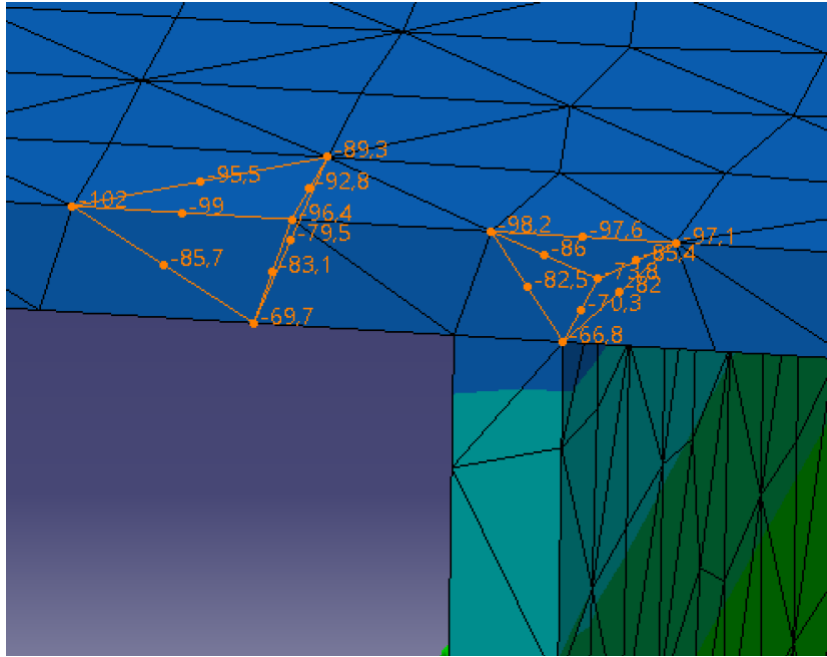


Figura 97. Tensión en el ala para tetraedros parabólicos.

En el extremo inferior del alma de la [Figura 98](#) se ha obtenido un valor promedio de la tensión normal de **265 MPa**.

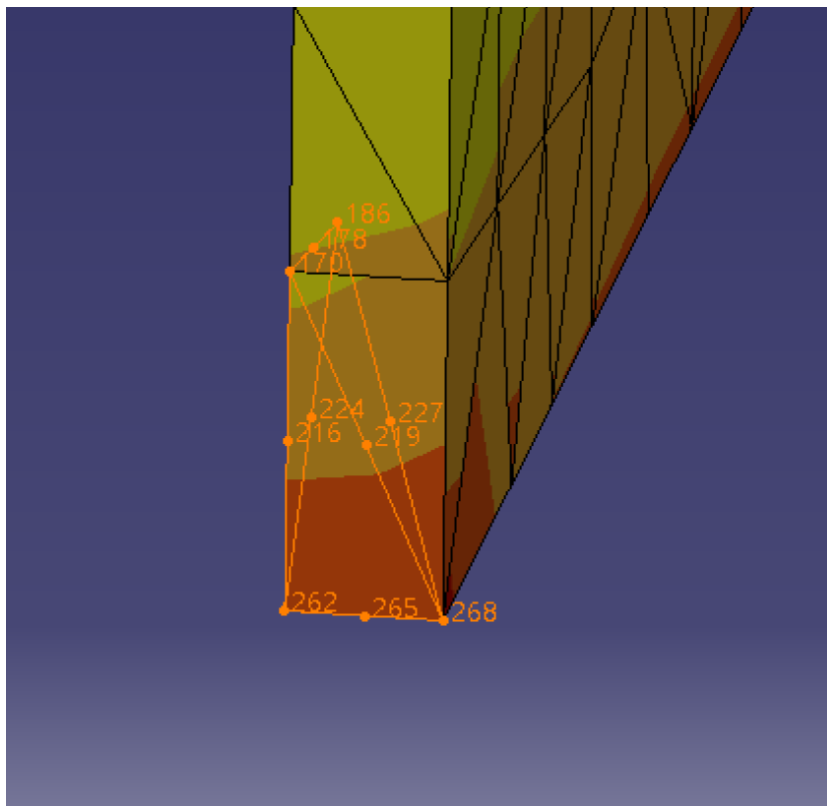


Figura 98. Tensión en el alma para tetraedros parabólicos.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|98,4 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,6 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ err, inf} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|265 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 11,4 \% \end{aligned}$$

Ecuación 20. Error de cálculo de tensión con tetraedros parabólicos.

En conclusión, los resultados son un poco mejores, una diferencia del 1% en el error, sin embargo, el tiempo de computación es mayor ya que los tetraedros lineales se componen de cuatro nodos, en cambio los parabólicos de 10 nodos.

- **Reducción tamaño malla:**

Si se opta por reducir el tamaño de los tetraedros lineales, por ejemplo, a 5 mm como se ve en la [Figura 99](#).

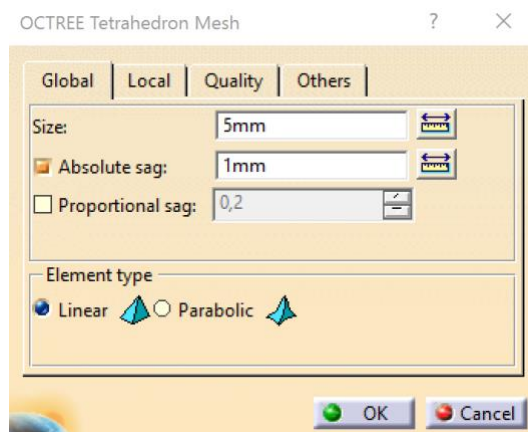


Figura 99. Ventana Octree Tetrahedron Mesh.

Según el resultado de la [Figura 100](#) el tiempo de computación es mucho mayor.

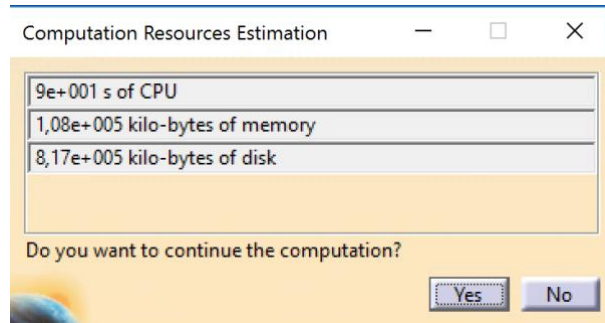


Figura 100. Tiempo de computación para reducción de tamaño malla.

En cambio el error global estimado mejora (Figura 101).

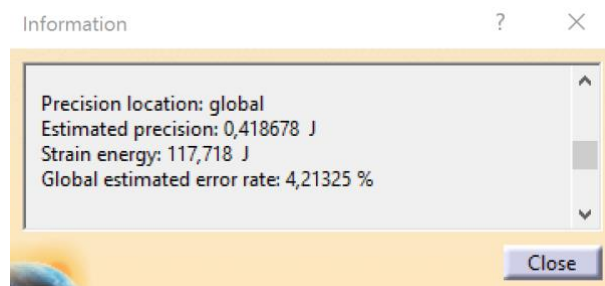


Figura 101. Error global para reducción de tamaño malla.

El valor promedio de la tensión normal en el extremo superior del ala de la Figura 102 es de **-105,3 MPa**.

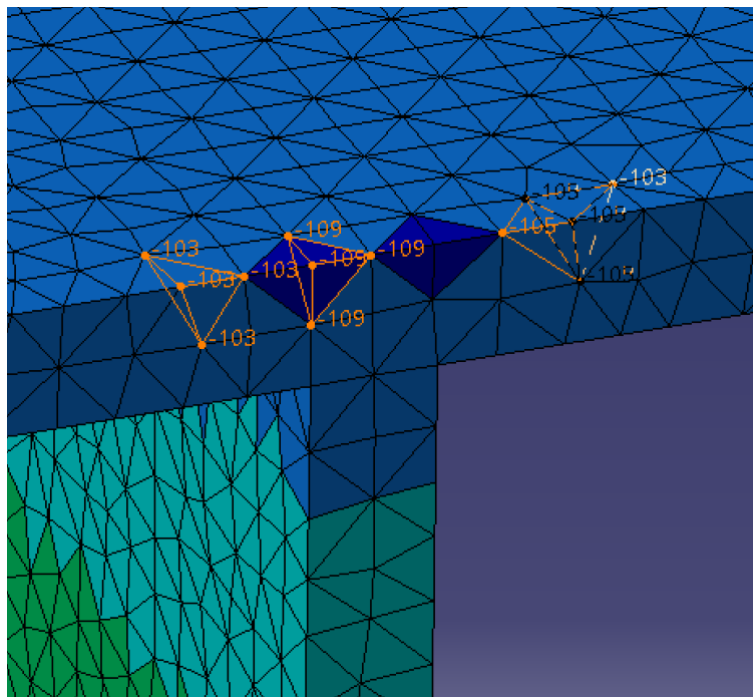


Figura 102. Tensión en el ala para reducción de tamaño malla.

El valor promedio de la tensión normal en el extremo inferior del alma de la [Figura 103](#) es de **369,7 MPa**.

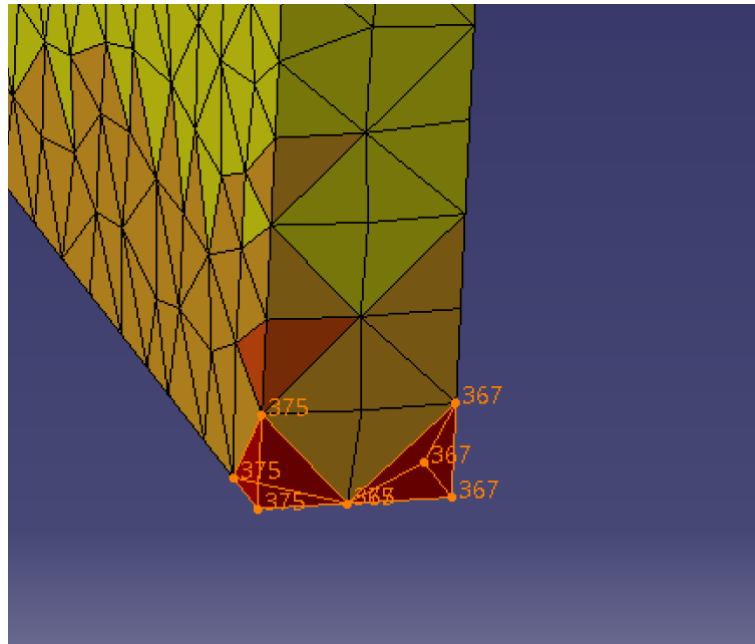


Figura 103. Tensión en el alma para reducción de tamaño malla.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|105,3 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 7,7 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ err, inf} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|369,7 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 55,40 \% \end{aligned}$$

Ecuación 21. Error de cálculo de tensión con reducción tamaño malla.

Según estos resultados, se observa que no es aconsejable utilizar este método en caso de vigas largas.

- **Mallado local:**

Para realizar un mallado local, se utiliza el comando **Local Mesh Size** de la sub-barra **Mesh Special** de la [Figura 104](#) donde se debe seleccionar la superficie a la que se le va a asignar un elemento de malla de distinto tamaño y el tamaño de este.

En este caso, se selecciona la cara empotrada y se define un tamaño de 5 mm, como en el caso anterior.

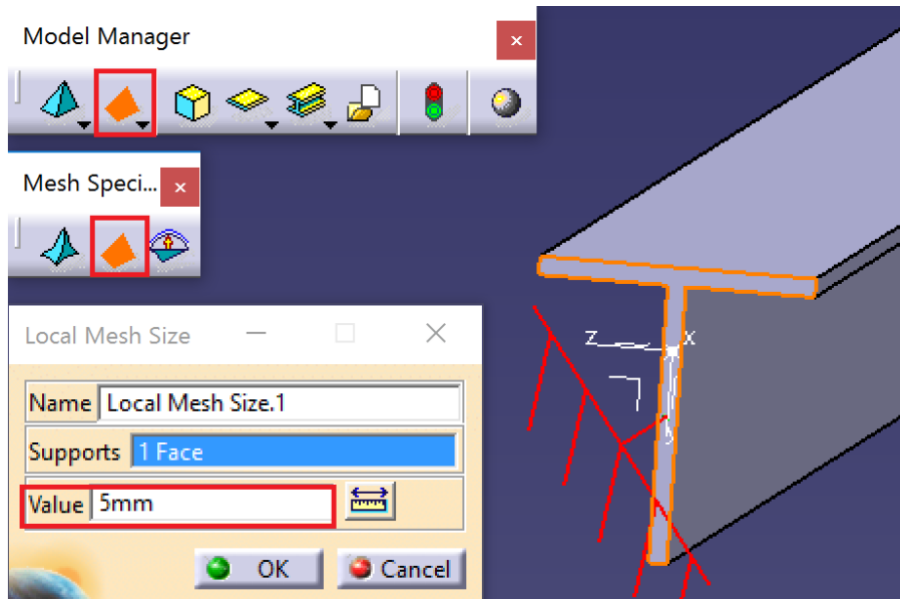


Figura 104. Comando Local Mesh Size.

Se lanzan los cálculos y según la [Figura 105](#) se observa que el tiempo de computación es menor en comparación con los dos casos anteriores:

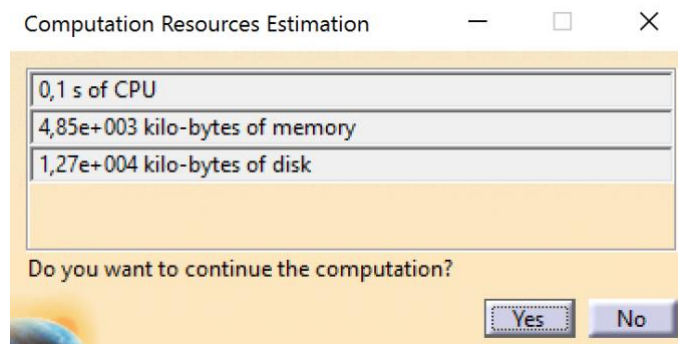


Figura 105. Tiempo de computación para mallado local.

Sin embargo, el error global estimado sigue siendo alto:

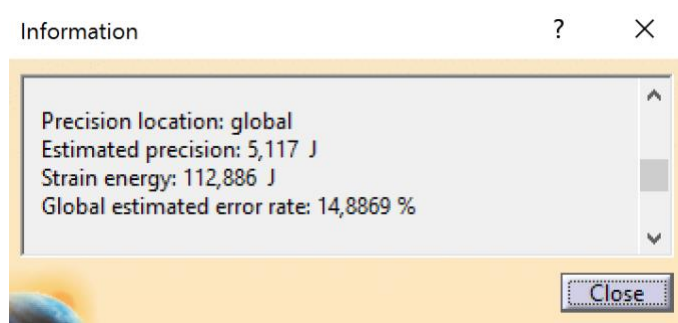


Figura 106. Error global para mallado local.

A la hora de calcular las tensiones, se aprecia en la [Figura 107](#) la diferencia entre el tamaño de los elementos de la cara del empotramiento con los del resto de la viga.

En el extremo superior del ala de la [Figura 107](#) se tiene un valor promedio de la tensión normal de **-111,3 MPa**.

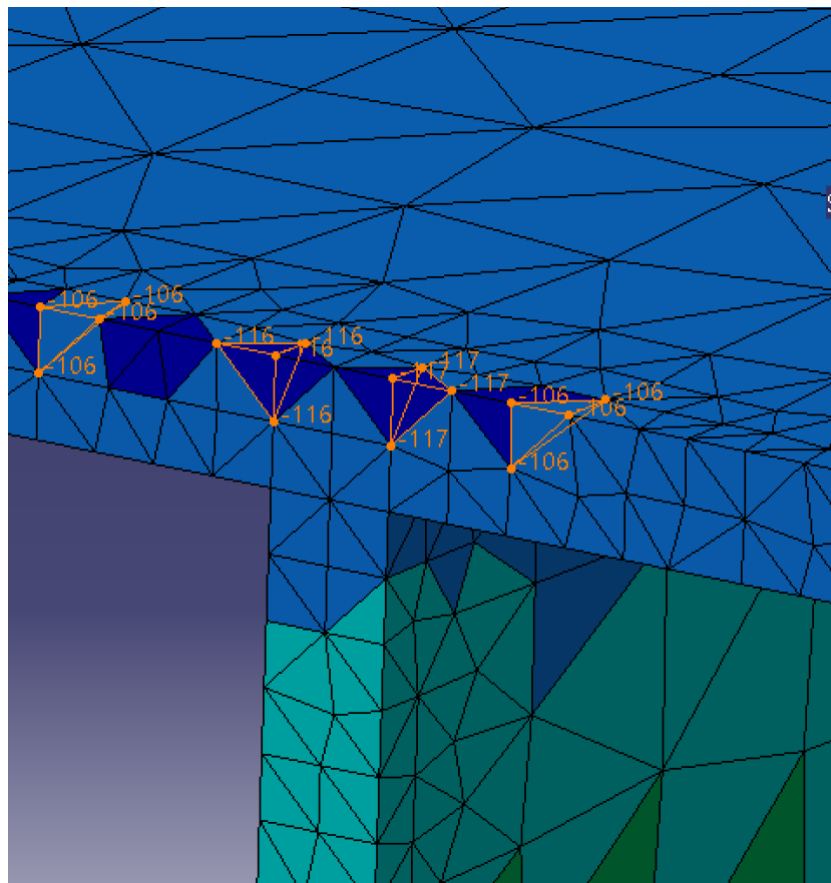


Figura 107. Tensión del ala para mallado local.

En el extremo inferior del alma de la [Figura 108](#) se tiene un valor promedio de la tensión normal de **363,5 MPa**.

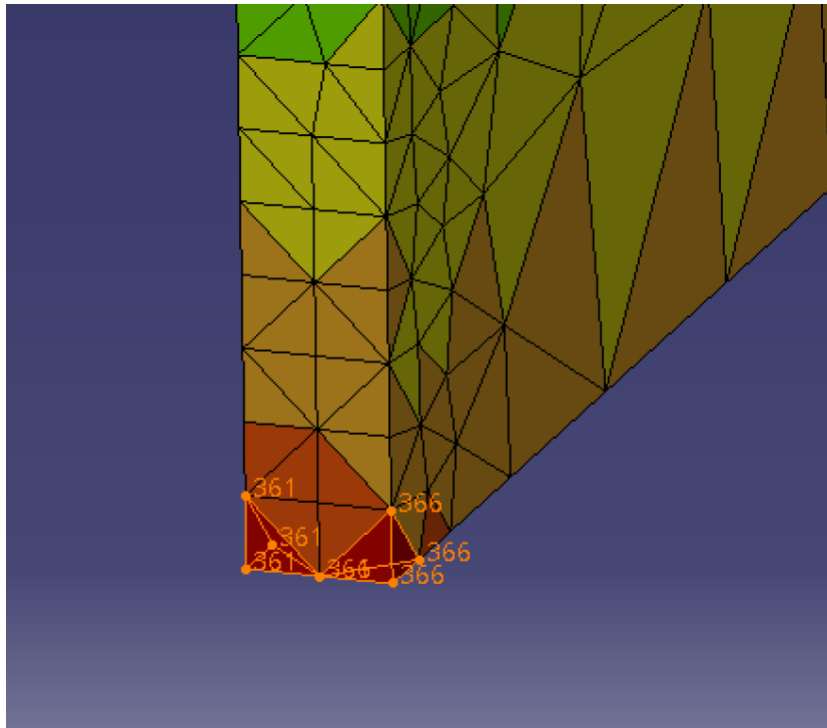


Figura 108. Tensión del alma para mallado local.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|111,3 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 13,8 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ err, inf} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|363,5 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 52,8 \% \end{aligned}$$

Ecuación 22. Error de cálculo de tensión con mallado local.

En comparación con el resto de casos ya tratados, en cuanto a resultados es el peor de los casos por lo tanto la solución no es apta para el problema que aquí se plantea.

- **Mallado adaptativo:**

Para definir un mallado adaptativo, se hace uso del comando **Adaptivity** de la [Figura 109](#) donde se selecciona el mallado que se había creado en un principio, se define el error global deseado y además, se puede visualizar el error actual.

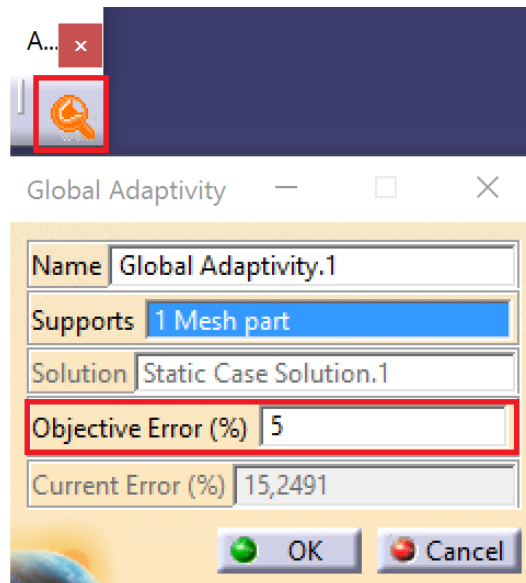


Figura 109. Comando Adaptivity.

Sin embargo, a la hora de lanzar los cálculos, a diferencia del resto de casos, aquí se utiliza el comando de la [Figura 110](#), *Compute with Adaptivity*

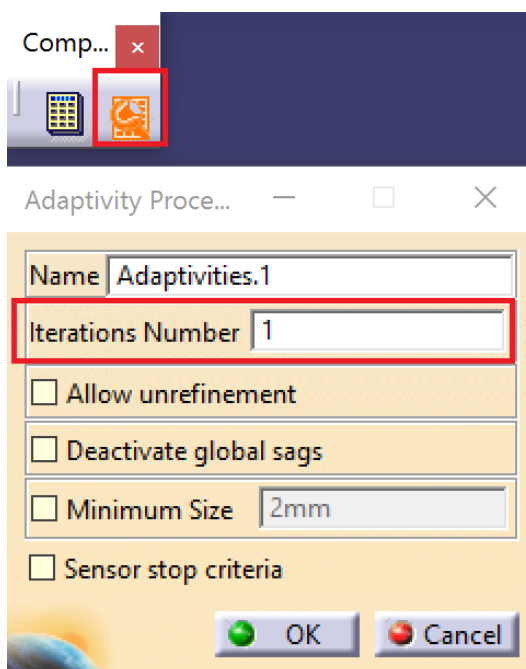


Figura 110. Comando Compute with Adaptivity.

En la [Figura 111](#) se puede comprobar que se ha alcanzado el error global deseado en una sola iteración:

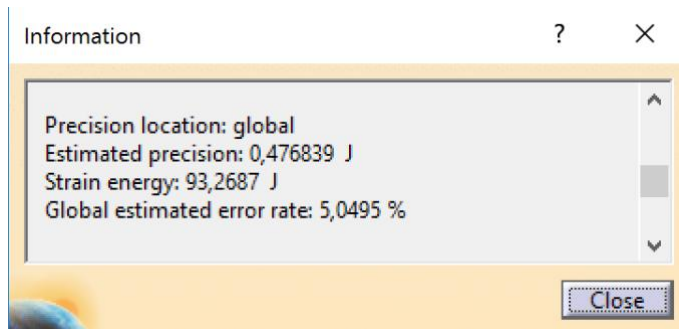


Figura 111. Error global para mallado adaptativo.

Como se puede observar en la [Figura 112](#), el mallado es más fino en el empotramiento y va aumentando de tamaño de este a medida que se aproxima al extremo opuesto de la viga.

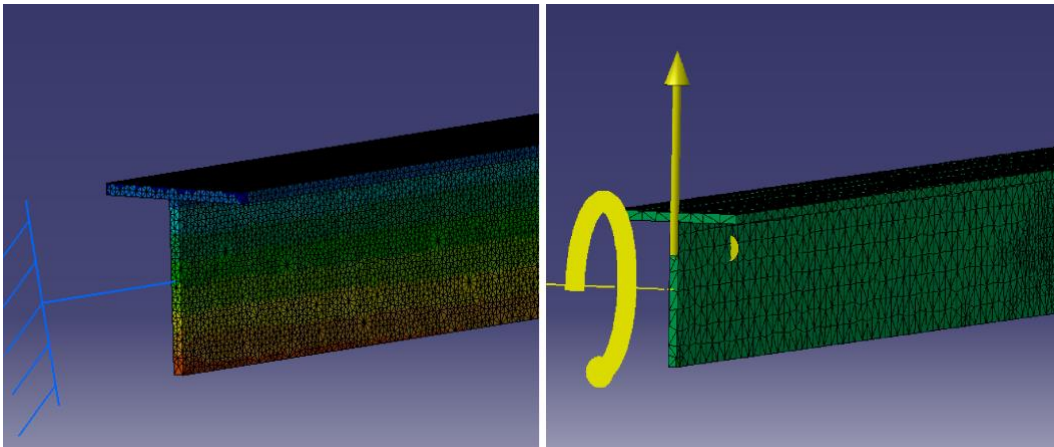


Figura 112. Mallado 3D adaptativo.

En cuanto a la tensión normal, en el extremo superior del ala de la [Figura 113](#) se tiene un valor promedio de la tensión normal de **-101,6 MPa**.

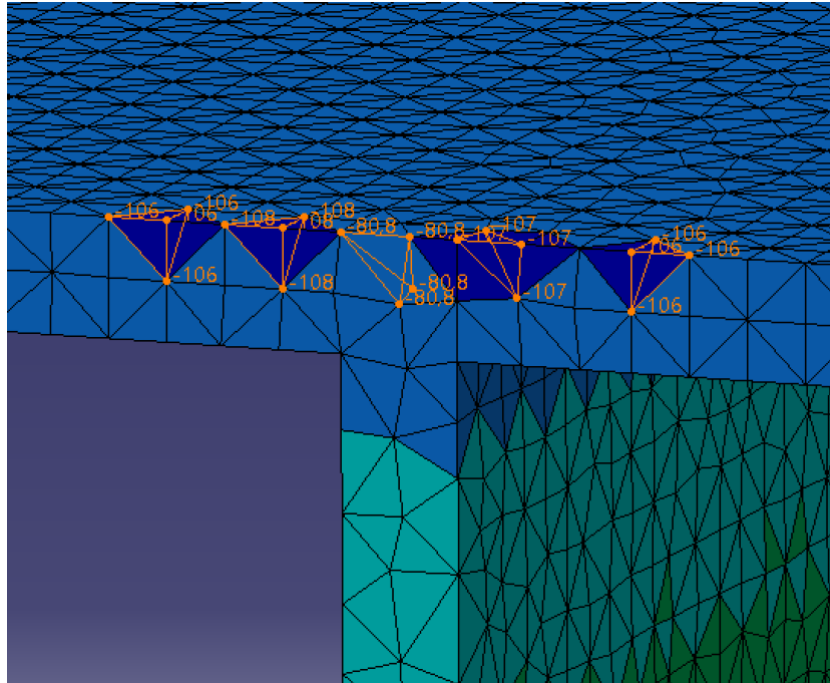


Figura 113. Tensión del ala para mallado adaptativo.

Y en el borde inferior del alma de la [Figura 114](#) se tiene un valor promedio de la tensión normal de **233 MPa**.

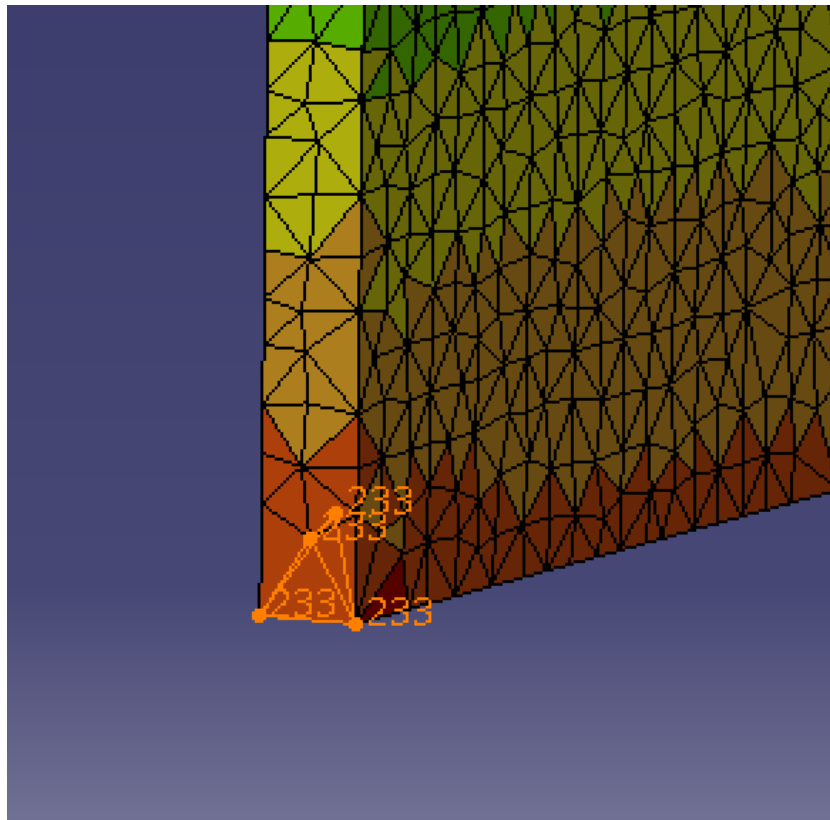


Figura 114. Tensión del alma para mallado adaptativo.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|101,6 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 3,88 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ err, inf} &= \frac{|experimental - teorico|}{teorico} \cdot 100 \\ &= \frac{|233 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,02 \% \end{aligned}$$

Ecuación 23. Error de cálculo de tensión con mallado adaptativo.

Se observa que con este método se obtienen los resultados más exactos.

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos de los 4 métodos, para así poder compararlos.

Tabla 1. Comparación de resultados.

	Tiempo computación (s)	Error global (%)	% err σ_{xx} <i>sup</i>	% err σ_{xx} <i>inf</i>
Tetraedros parabólicos	7	0,83	0,6	11,4
Reducción tamaño malla	9	4,2	7,7	55,4
Mallado local	0,1	14,9	13,8	52,8
Mallado adaptativo	-	5	3,88	0,02

En conclusión, el método de mallado más recomendado en el caso de vigas de gran longitud, se trata del mallado adaptativo.

4.2.2 Tensión normal mediante mallado 2D

En este caso se va a resolver la misma viga en T, pero mediante mallado 2D. El procedimiento va a ser el mismo que se ha seguido en el apartado [4.1.2](#), por

lo tanto, se comienza diseñando un **Sketch** con las **líneas medias** de la sección, donde las cotas son las indicadas en la [Figura 115](#).

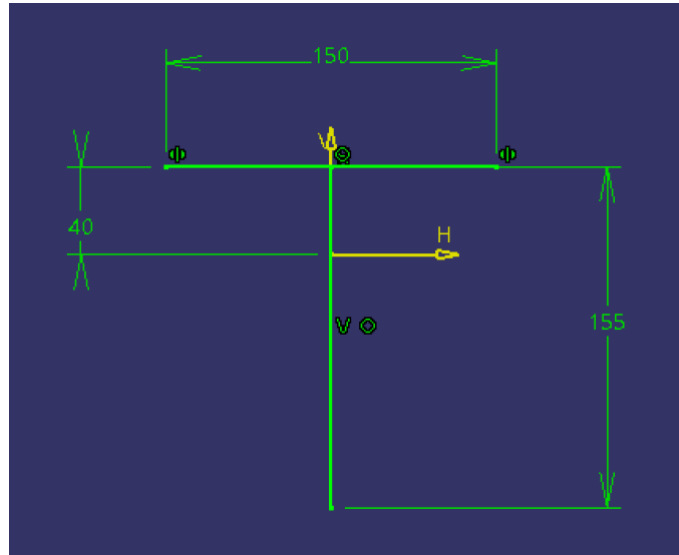


Figura 115. Sketch de las líneas medias de la viga en T.

Seguidamente, en el módulo **Generative Shape Design** mediante el comando **Extrude** de la Figura 116 se extruye la sección 5m.

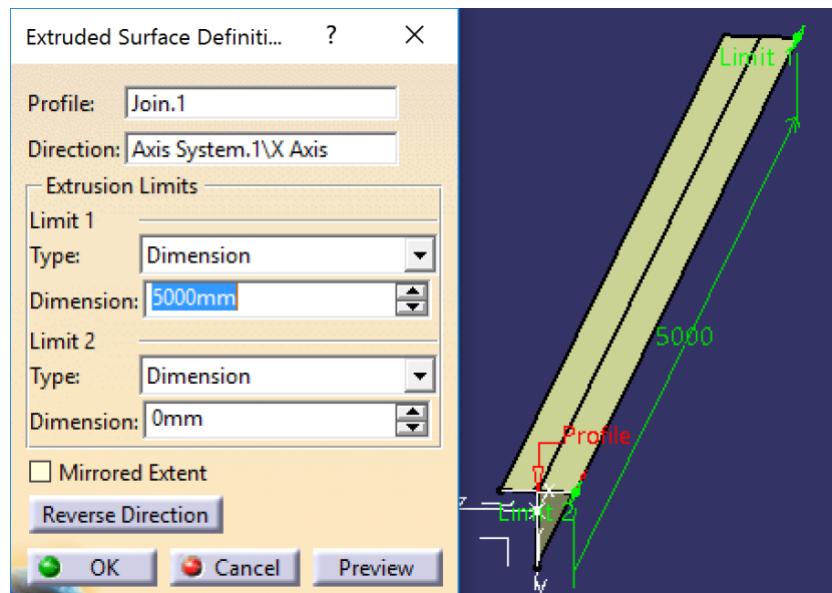


Figura 116. Comando Extrude para superficies.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el modelo 3D, los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó un mallado adaptativo, por lo que se seguirá esta misma estrategia en este caso. Por lo tanto, se define un mallado adaptativo a partir de triángulos lineales, con un objetivo máximo del 5% de error global como se ve en la [Figura 117](#).

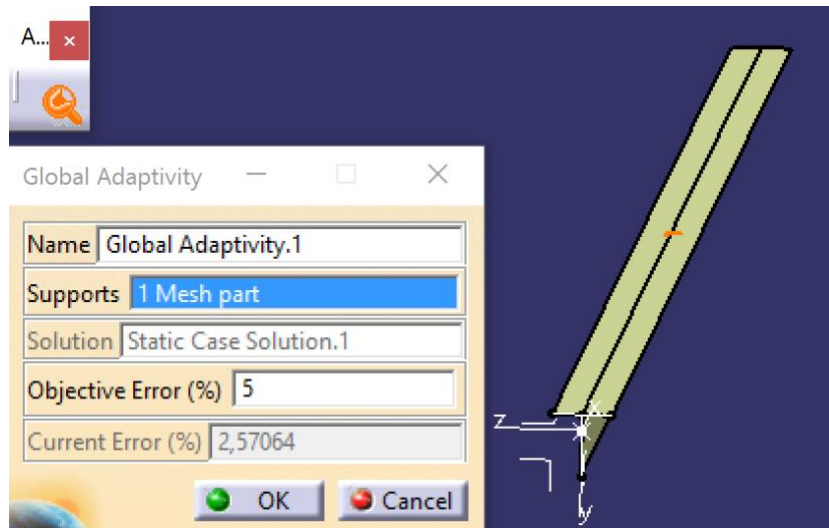


Figura 117. Comando Adaptivity.

Acto seguido se completan las propiedades para objetos 2D. Teniendo en cuenta que en el *Sketch* se representan las líneas medias del perfil, por lo que como se ve en la [Figura 118](#) se define un espesor de 10mm y un offset de 5mm.

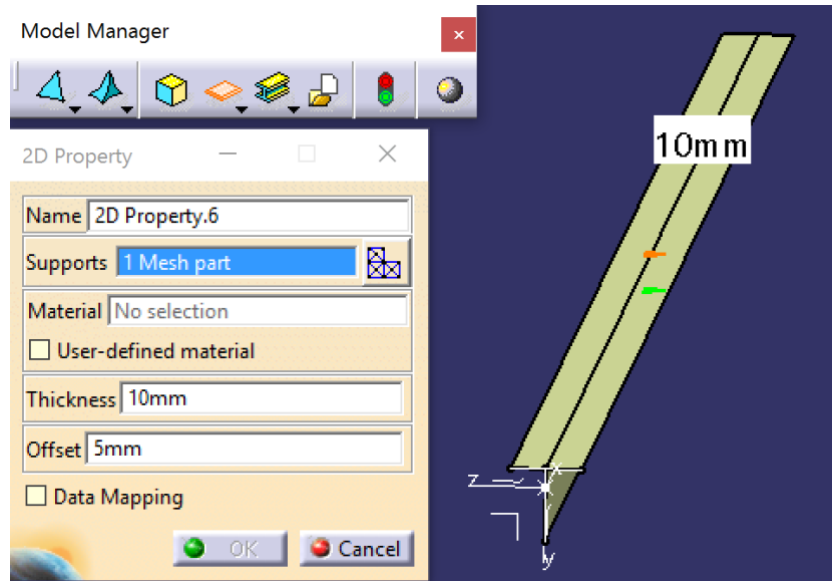


Figura 118. Propiedades del objeto 2D.

Finalmente, para poder lanzar los cálculos, igual que se hacía en el apartado 4.2.1, se define; el empotramiento, las dos cargas puntuales y el momento flector.

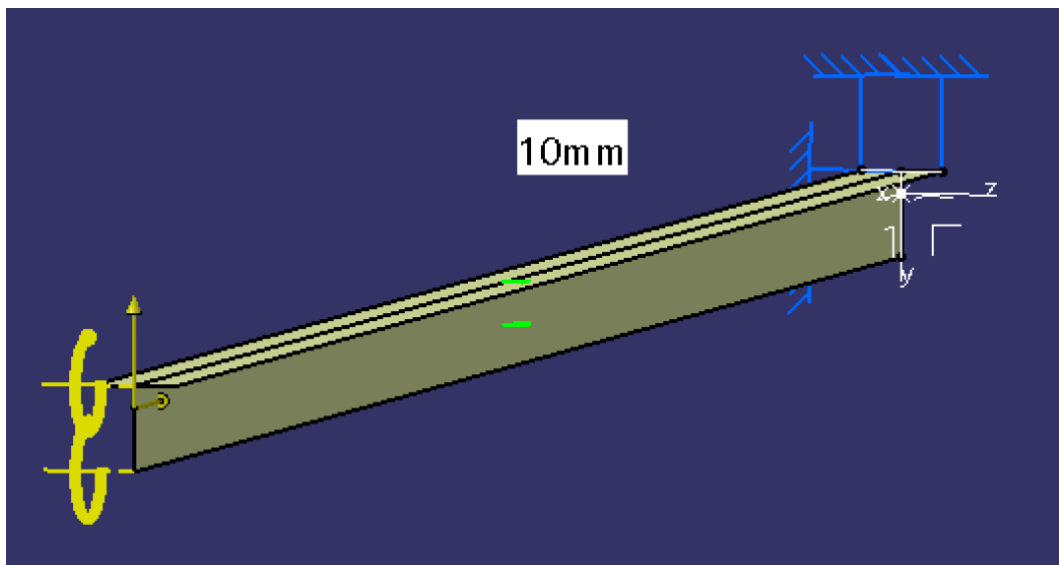


Figura 119. Cargas y momento viga en T.

Se lanzan los cálculos, pero en este caso al tener mallado adaptativo, estos se ejecutan mediante el comando **Compute with Adaptivity** y donde se obtienen tensiones normales máximas y mínimas de la [Figura 120](#).

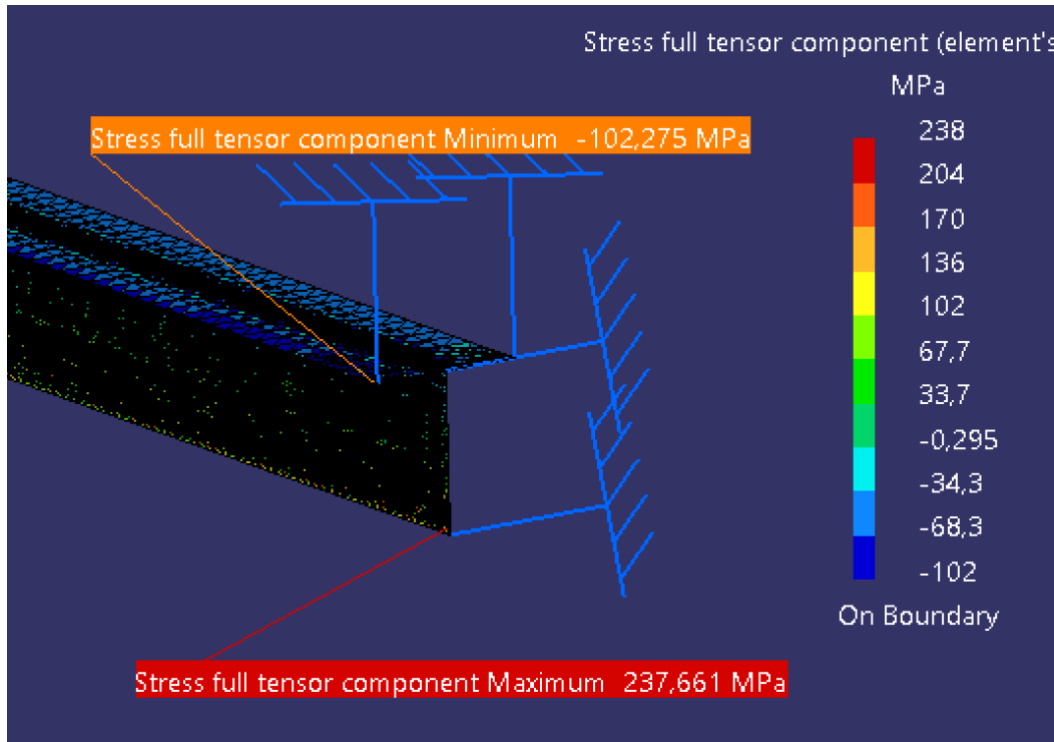


Figura 120. Tensión para mallado 2D adaptativo.

Comparando estos resultados con los obtenidos teóricamente:

$$\begin{aligned} \% \text{ err, sup} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|102,3 \cdot 10^6 - 97,8 \cdot 10^6|}{97,8 \cdot 10^6} \cdot 100 = 4,6 \% \\ \\ \% \text{ err, inf} &= \frac{|\text{experimental} - \text{teorico}|}{\text{teorico}} \cdot 100 \\ &= \frac{|237,7 \cdot 10^6 - 237,9 \cdot 10^6|}{237,9 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,08 \% \end{aligned}$$

Ecuación 24. Error de cálculo de tensión con mallado 2D adaptativo.

Por lo tanto, se obtienen unos resultados muy parecidos a los del mallado adaptativo en 3D.

4.2.3 Tensión normal mediante mallado 1D

Por último, para finalizar la comparativa, se va a resolver la viga mediante mallado 1D, siguiendo los mismos pasos que en el apartado 4.1.3. Por lo tanto, en este caso se empieza creando una línea de 5m de longitud, un mallado lineal formado por elementos de 10mm (para este tipo de mallados no está habilitada la herramienta de mallado adaptativo) y en las propiedades de objetos 1D (Figura 121), se define la sección de la viga.

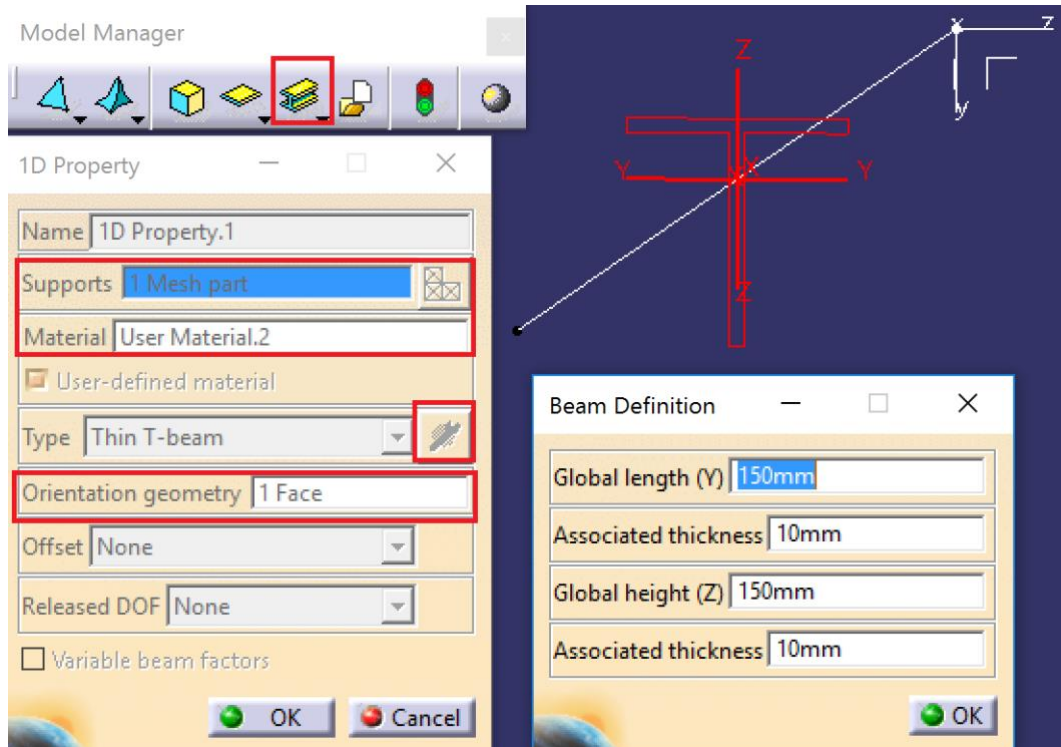


Figura 121. 1D Property de la viga en T.

Por último, antes de lanzar los cálculos, se define en un extremo el empotramiento y en el otro extremo, las dos cargas puntuales y el momento, como se puede observar en la [Figura 122](#).

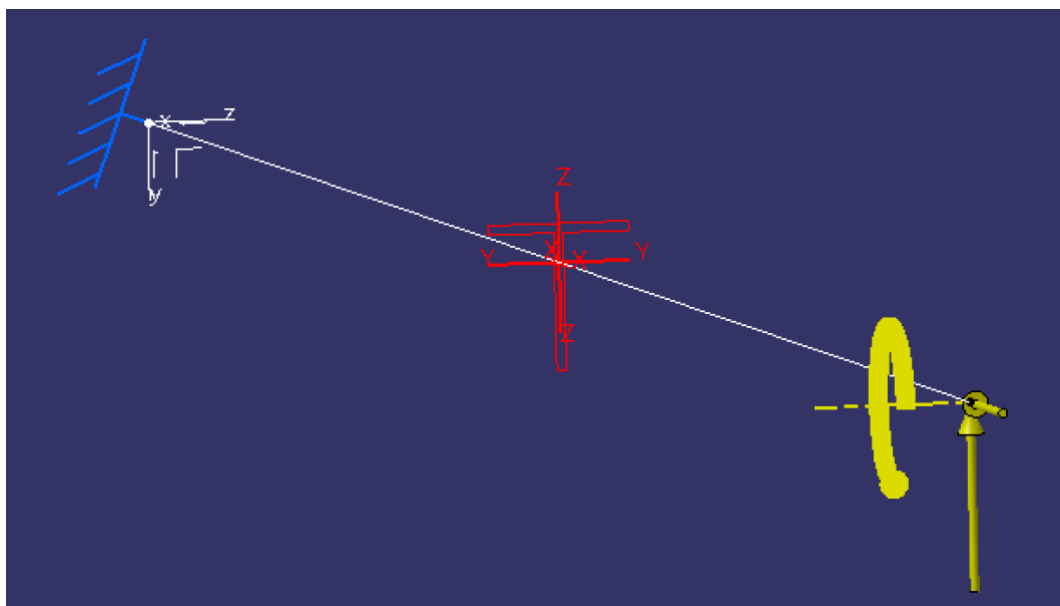


Figura 122. Cargas y momento viga 1D en T.

Como resultado, en el extremo empotrado de la *Figura 123* se tiene una tensión normal de **-3,44 MPa**.

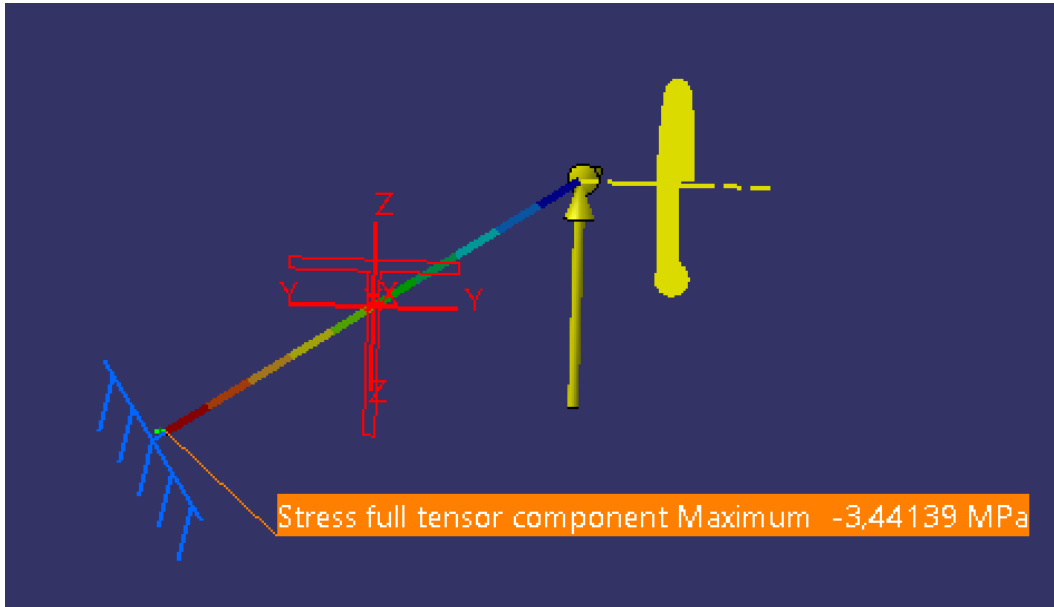


Figura 123. Tensión de la viga en T

Se observa que el resultado es el correspondiente a la tensión normal en el baricentro, es decir, para $y = 0$.

$$\sigma_x(x = 0, y = 0) = \frac{N_x(0)}{A} + \frac{M_z(0)}{I_z} \cdot y = \frac{-10000}{3 \cdot 10^{-3}} = -3,33 \cdot 10^6 Pa$$

Ecuación 25. Tensión normal en el baricentro.

En la siguiente tabla se comparan los resultados del cálculo de la tensión normal calculado para el caso de mallado adaptativo 3D y 2D, ya que en el caso 1D no se dispone de las tensiones máximas y mínimas.

Tabla 2. Comparación de resultados de mallado adaptativo.

	Error global (%)	% err $\sigma_{xx sup}$	% err $\sigma_{xx inf}$
Mallado adaptativo 3D	5	3,88	0,02
Mallado adaptativo 2D	2,5	4,6	0,08

Al obtener resultados muy similares tanto con un modelo 3D como con uno 2D, permite concluir que existe la posibilidad de utilizar mallado 2D en vez de mallado 3D a la hora de repetir este tipo de cálculos, ya que eso supone un ahorro de tiempo y de costes.

5 Aplicaciones en cálculo de estructuras

En este capítulo, se va a desarrollar como se puede aplicar el módulo Generative Structural Analysis, para definir diferentes ejercicios que se pueden encontrar en el cálculo estático de estructuras y resistencia de materiales.

5.1 Cálculo de reacciones

En este módulo de CATIA, existe la posibilidad de calcular las reacciones de los elementos de apoyo, debidas a las cargas aplicadas.

Para describir el procedimiento de este calculo y comprobar que los resultados son correctos, se van a calcular las reacciones de la viga de la [Figura 80](#), en el que se dispone de una viga empotrada en un extremo y sometida a dos cargas puntuales y un momento puntual en el otro extremo.

A continuación, se tienen los resultados teóricos de las reacciones, cuyos signos corresponden a los de la [Figura 124](#), [4]:

:

$$R_1 = -N_x(0) = P = 10000 \text{ N}$$

$$R_2 = V_y(0) = -R = -3000 \text{ N}$$

$$R_3 = V_z(0) = 0 \text{ N}$$

$$R_4 = -M_x(0) = 0 \text{ N}$$

$$R_5 = -M_y(0) = 0 \text{ N}$$

$$R_6 = M_z(0) = R \cdot L + \overline{M_z} = 16000 \text{ Nm}$$

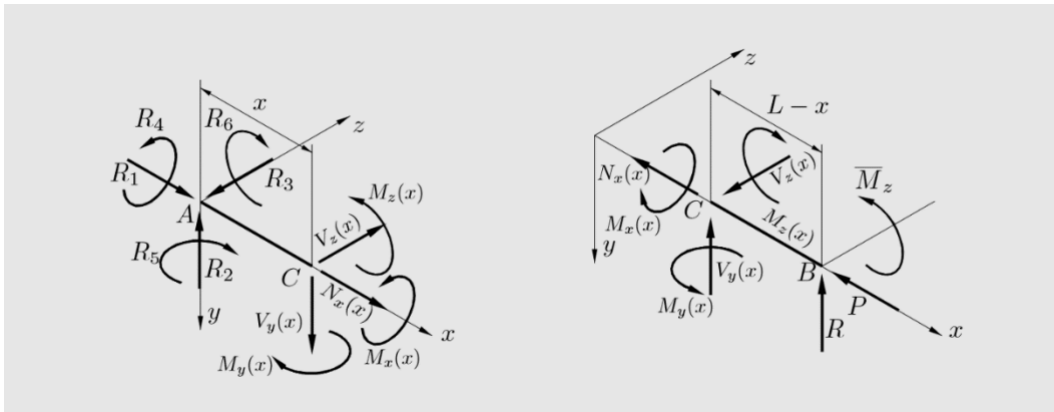


Figura 124. Reacciones y esfuerzos de la viga en T.

Para obtener las reacciones en CATIA, una vez lanzados los cálculos previos (deformada, desplazamientos, tensiones...) se hace clic derecho sobre el apartado de Sensor de la *Figura 125* y se selecciona la opción de **Reaction Sensor**.

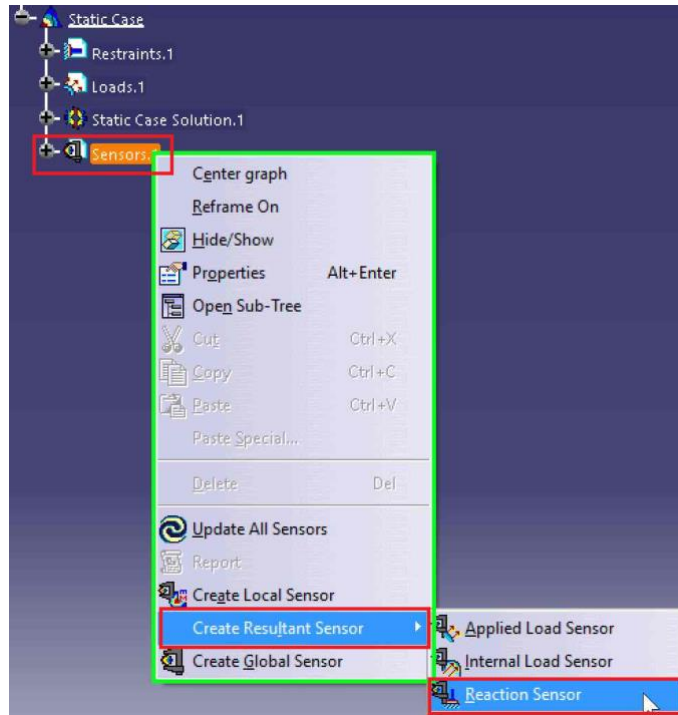


Figura 125. Comando Reaction Sensor.

En la ventana que se abre (*Figura 126*), se selecciona el empotramiento y el sistema de referencia local en caso de que no se desee trabajar con un sistema de referencia distinto al global.

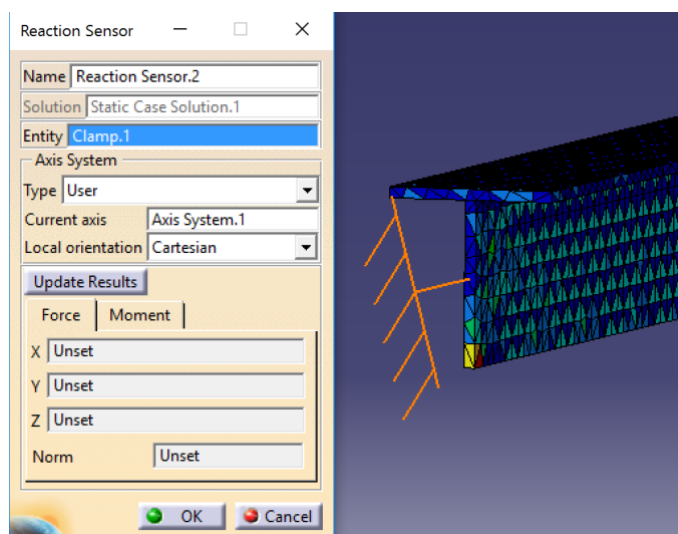


Figura 126. Ventana Reaction Sensor.

Como resultado se genera dentro del apartado de *Reaction Sensor* de la [Figura 127](#) los valores de las reacciones y momentos, del empotramiento.

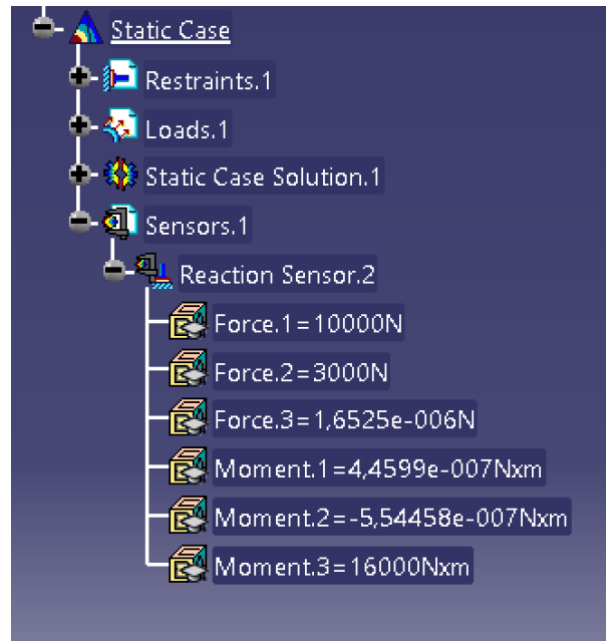


Figura 127. Apartado Reaction Sensor del árbol.

Como se ve a continuación, estos coinciden con los valores calculados teóricamente.

$$Force.1 = 10000 \text{ N} \ll \text{---} \gg R_1 = 10000 \text{ N}$$

$$Force.2 = 3000 \text{ N} \ll \text{---} \gg R_2 = 3000 \text{ N}$$

$$Force.3 = 0,0000017 \text{ N} \ll \text{---} \gg R_3 = 0 \text{ N}$$

$$Moment.1 = 0,00000045 \text{ Nm} \ll \text{---} \gg R_4 = 0 \text{ Nm}$$

$$Moment.2 = -0,00000055 \text{ Nm} \ll \text{---} \gg R_5 = 0 \text{ Nm}$$

$$Moment.3 = 16000 \text{ Nm} \ll \text{---} \gg R_6 = 16000 \text{ Nm}$$

5.2 Apoyos fijos y móviles

Hasta ahora, en todos los casos estudiados, los apoyos han sido empotramientos, por eso en este punto se va a describir cómo definir apoyos fijos y móviles.

Siguiendo con el mismo ejemplo que en el apartado anterior, se va a sustituir el empotramiento por un apoyo fijo y en el otro extremo se añade un apoyo móvil, el cual libera el desplazamiento horizontal.

Para ello se va a utilizar el comando **User-defined Restraint** de la barra de herramientas **Restraints** de la [Figura 128](#).

En el apoyo fijo se marcan las tres opciones de *Restrain Translation* y en el apoyo móvil se desmarca la correspondiente al eje x.

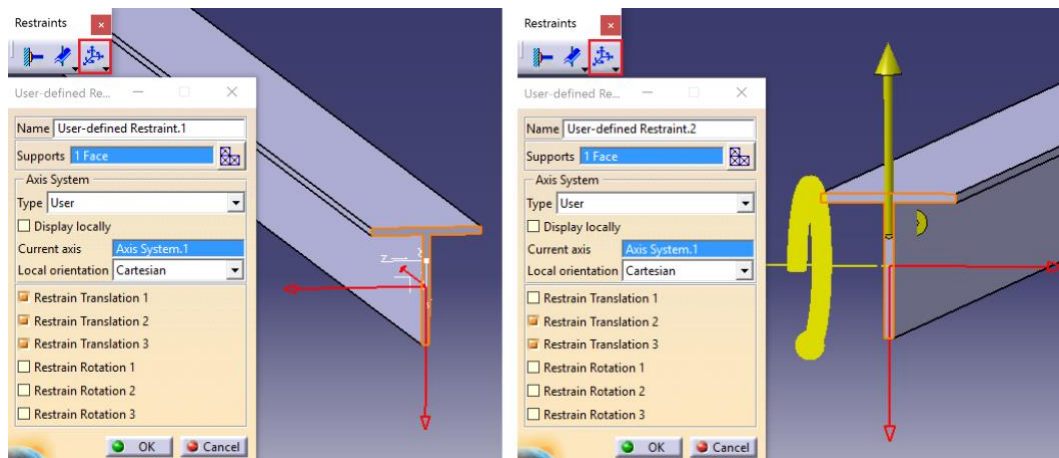


Figura 128. Comando User-defined Restraint.

Sin embargo, se debe prestar especial atención a la hora de definir este tipo de apoyos, ya que si se selecciona como soporte del apoyo toda la cara de la sección, el programa lo que hace es crear infinitos apoyos fijos sobre esta superficie, lo que simula un empotramiento.

Por lo tanto, la solución es utilizar **elementos virtuales**, los cuales se encuentran en el primer comando de la barra de herramientas **Virtual Part** ([Figura 129](#)).



Figura 129. Barra de herramientas Virtual Part.

Este comando entrelaza virtualmente una superficie a un punto. Esta comunicación entre el punto y la superficie se comporta como un objeto exageradamente rígido, que no permite ningún tipo de transmisión de movimiento.

Por lo que previamente, se va a crear un elemento virtual rígido en cada una de las caras. Como apreciación, en la [Figura 130](#) el punto de unión coincide exactamente con el baricentro de la sección.

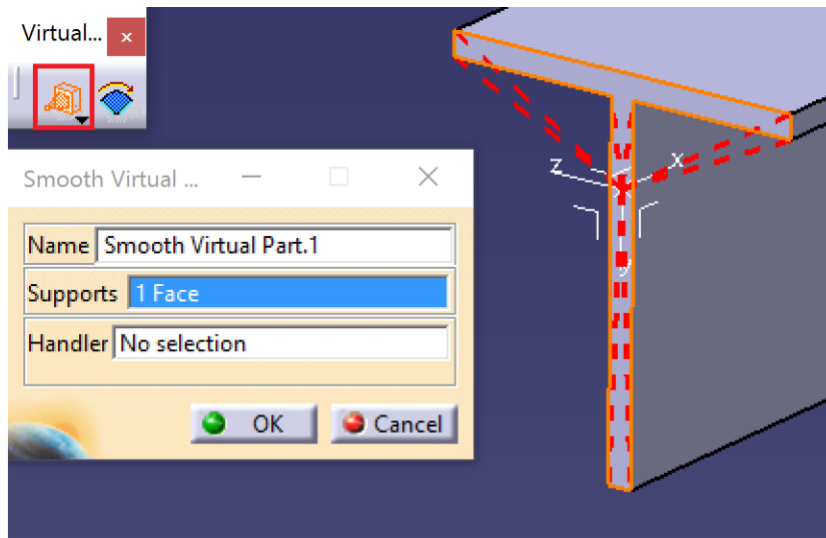


Figura 130. Comando Smooth Virtual Part.

Ahora ya se puede asociar cada apoyo a su elemento virtual correspondiente. Definiendo como soporte de los apoyos el elemento virtual y no la superficie, como se puede apreciar en la [Figura 131](#).

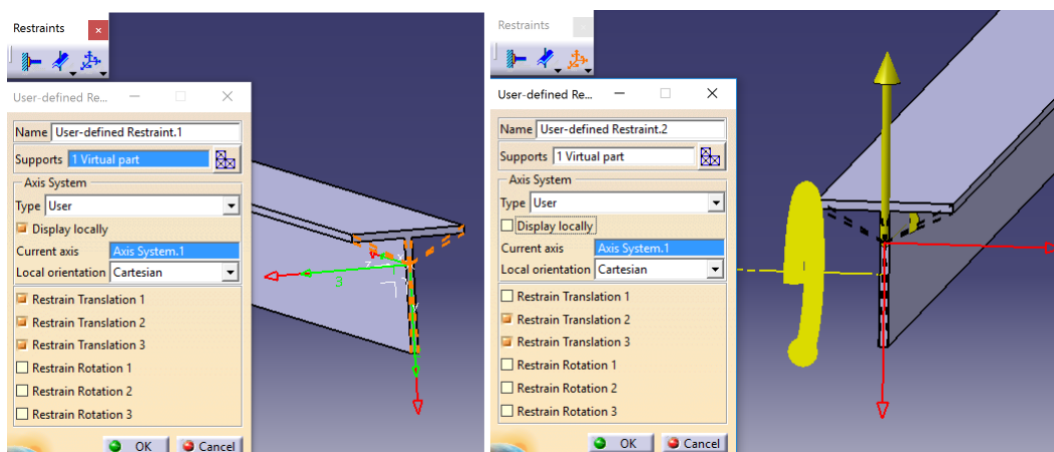


Figura 131. Comando User-defined Restraint.

Sin embargo, se ha de tener en cuenta que, en función de la geometría, la distribución de las cargas y de los apoyos, el cálculo puede arrojar un mensaje de error y no dar resultados, como sucede en este caso particular ([Figura 132](#)).

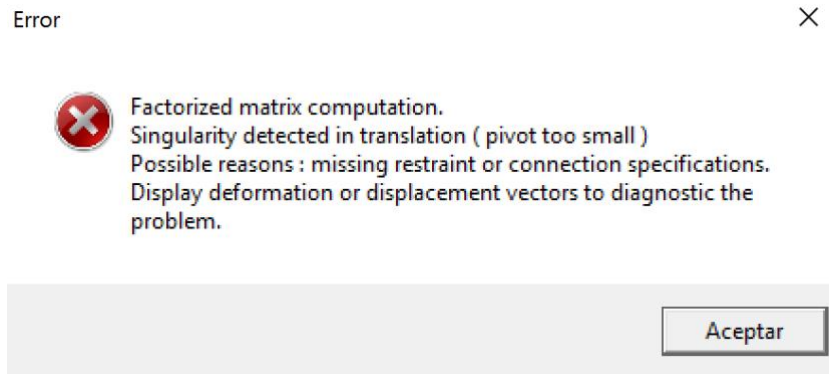


Figura 132. Mensaje de error.

Esto es debido a que se tienen dos apoyos que se concentran en un único punto, y además los dos en el mismo punto (baricentro). Por lo tanto, una solución a este problema es crear en una de las dos caras, dos elementos virtuales asociados a dos puntos muy cercanos al baricentro. Esta estrategia permite solventar el problema introduciendo un error en los resultados que, en la mayor parte de los casos, será despreciable.

Es decir, primero se crean dos puntos situados a los lados del baricentro como en la [Figura 133](#).

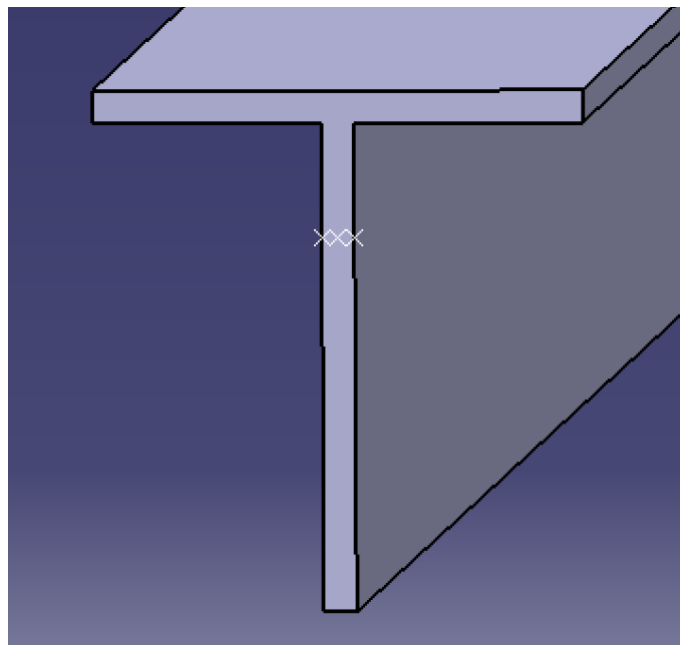


Figura 133. Puntos de soporte de elementos virtuales.

A continuación, se definen dos elementos virtuales en la cara del apoyo móvil, donde como soporte se selecciona la cara y concentrados (*Handler*) en cada uno de los dos puntos de la [Figura 134](#).

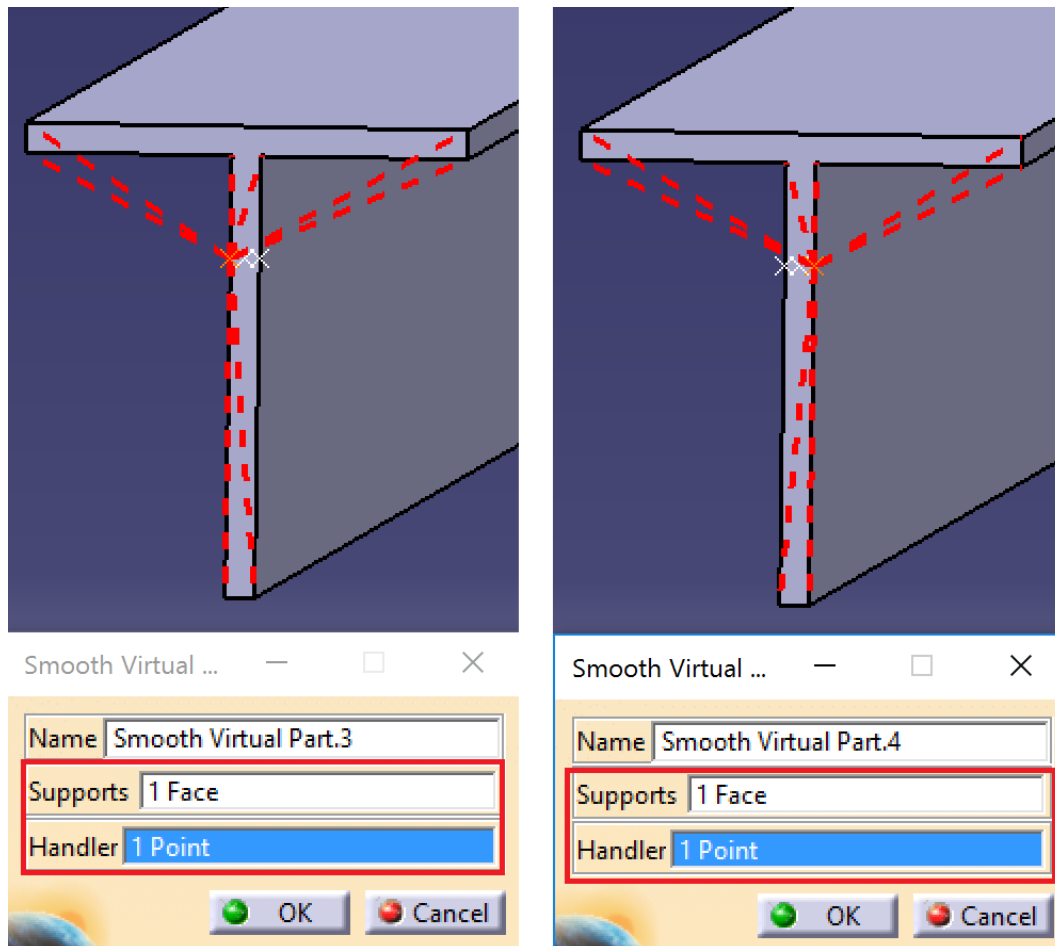


Figura 134. Elementos virtuales.

Por último, a la hora de definir el soporte del apoyo móvil ([Figura 131](#)), se seleccionan los dos puntos creados, no los elementos virtuales, ya que el comando *User-defined Restraint* no permite seleccionar como soporte más de un elemento virtual, por lo cual, la solución es seleccionar los dos puntos, los cuales a su vez están asociados a los elementos virtuales.

Para este tipo de situaciones, con esta conjuración se evita que surjan problemas a la hora de ejecutar los cálculos.

5.3 Cálculo de pórticos

Uno de los ejercicios a destacar en la teoría de estructuras, es el cálculo de pórticos, ya que supone un salto de dificultad respecto a lo que se ha visto en los capítulos anteriores al ser un sistema formado por varias barras.

En este apartado se va a describir cómo resolver un problema de un pórtico común. Además, para poder comparar los resultados obtenidos, previamente se va a resolver el pórtico mediante el uso del programa MdrFx, el cual se trata de un software específico para este tipo de estructuras, se trata de un programa que utilizan los alumnos de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid en las prácticas de laboratorio de la asignatura *Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales* [5].

Por tanto, se va a empezar resolviendo en MdrFx el pórtico de la [Figura 135](#), donde cada elemento de la cuadrícula mide 1 m:

- Tres barras de sección cuadrada de $0,05 \times 0,05 \text{ m}$.
- Con un empotramiento y un apoyo móvil en el eje vertical.
- Dos cargas puntuales de 80 KN ; una horizontal y la otra vertical.
- Acero S275, Modulo Young = $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.
- Densidad = 7700 kg/m^3 .
- Coeficiente de dilatación térmica = $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- Inercia = $(0,5 \cdot 0,5^3)/12 = 5,2083 \text{ E} - 3 \text{ m}^4$.

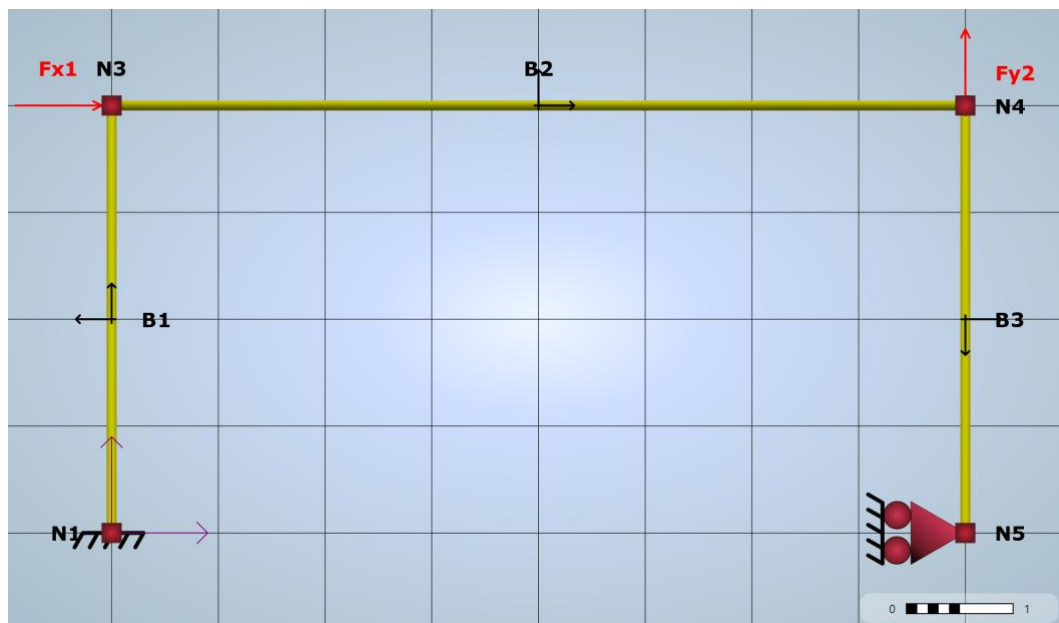


Figura 135. Pórtico en MdrFx.

En CATIA se va a resolver este problema mediante mallado 1D. Como en los casos 1D anteriores, se empieza diseñando el pórtico en el módulo de *Part Design*. Lo más fácil y rápido es crear un *Sketch* con la forma del pórtico. Sin embargo, se ha comprobado que con este método, al intentar mallar en el módulo de *Generatyve Structural Analysis* no resulta posible. Así, la solución adoptada consiste en crear el pórtico a partir de líneas independientes, una por cada barra y unirlas mediante el comando **Join** de la [Figura 136](#) el cual se encuentra en el módulo de *Generative Shape Design*

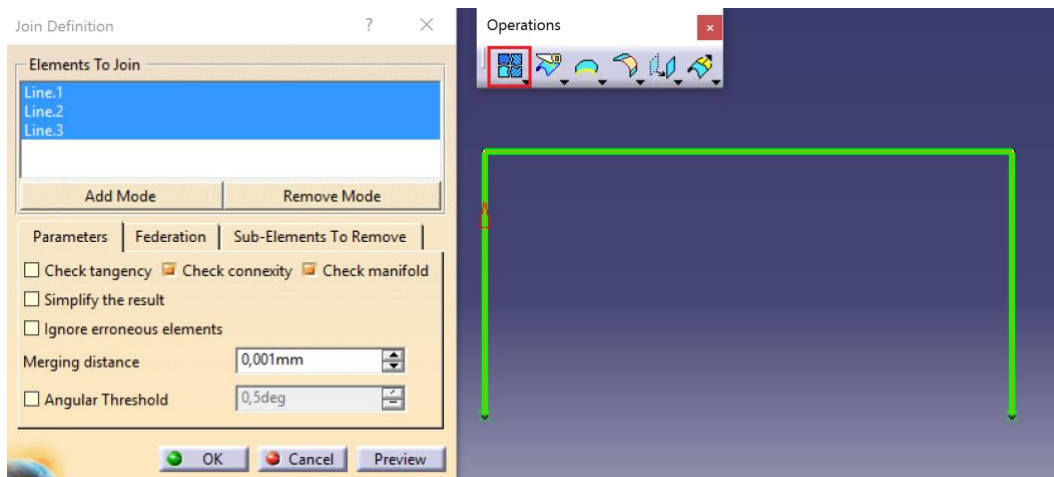


Figura 136. Comando Join.

Ahora ya se puede empezar el cálculo estático, pasando al módulo *Generatyve Structural Analysis*.

Se define un mallado 1D donde como se ven en la [Figura 137](#) cada elemento mida 10mm.

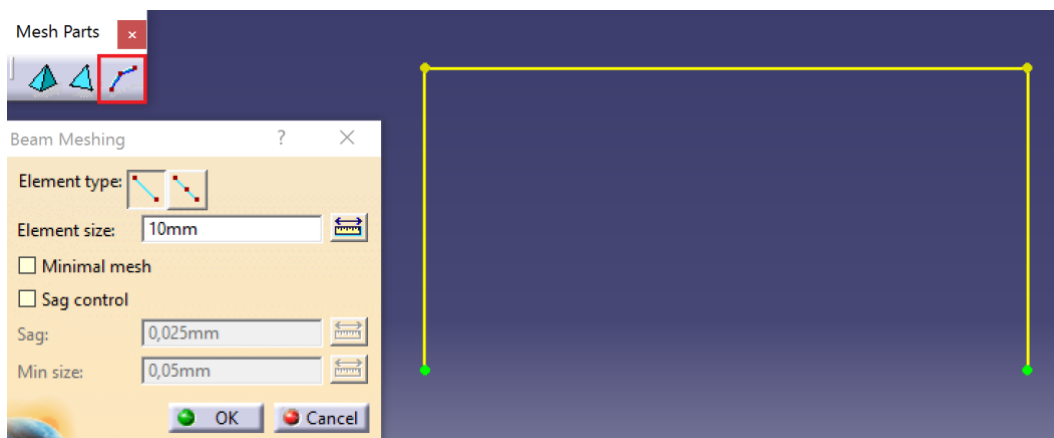


Figura 137. Comando Beam Mesher.

Se define la sección mediante el comando *1D Property*, donde como se ve en la *Figura 138* se selecciona el material previamente definido, la sección de tipo rectangular de 500mm x 500mm y la orientación de esta.

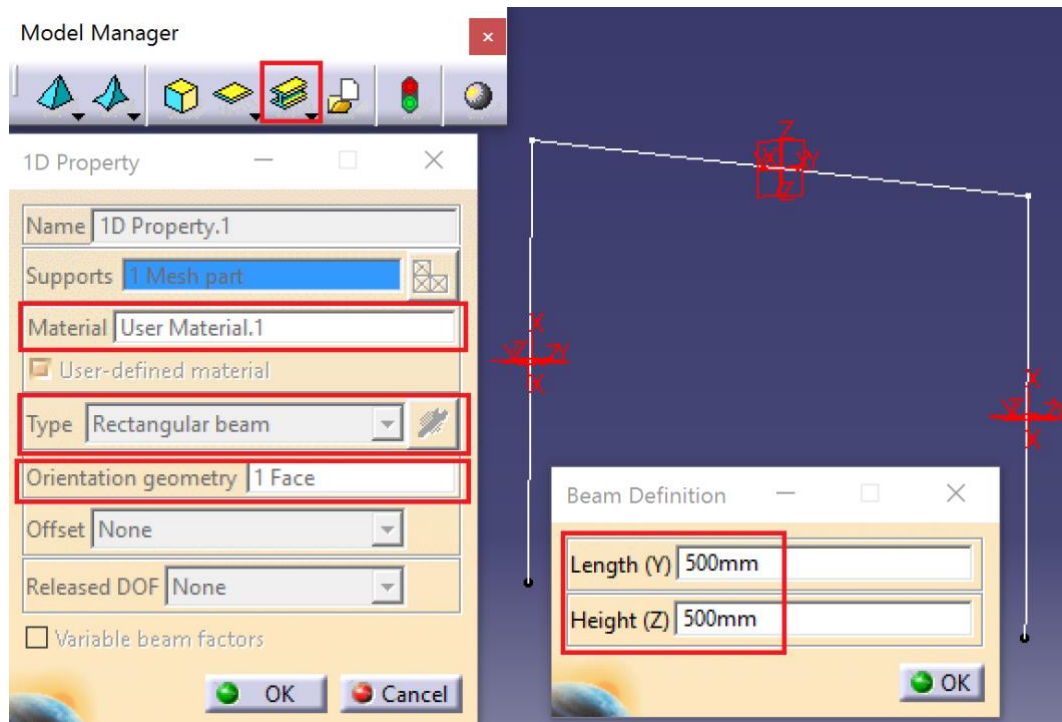


Figura 138. Comando 1D Property.

Se crean las restricciones, es decir, un empotramiento y un apoyo móvil en el eje y (*Figura 139*).

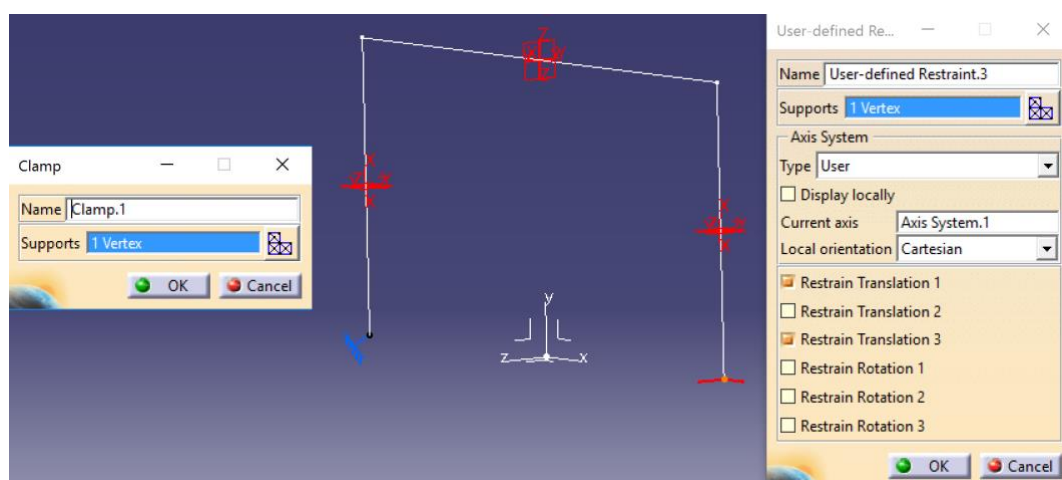


Figura 139. Comando User-defined Restraint.

Se definen las dos cargas puntuales de 80kN, seleccionando para cada caso en el apartado de **Handler**, el vértice donde está concentrada cada carga:

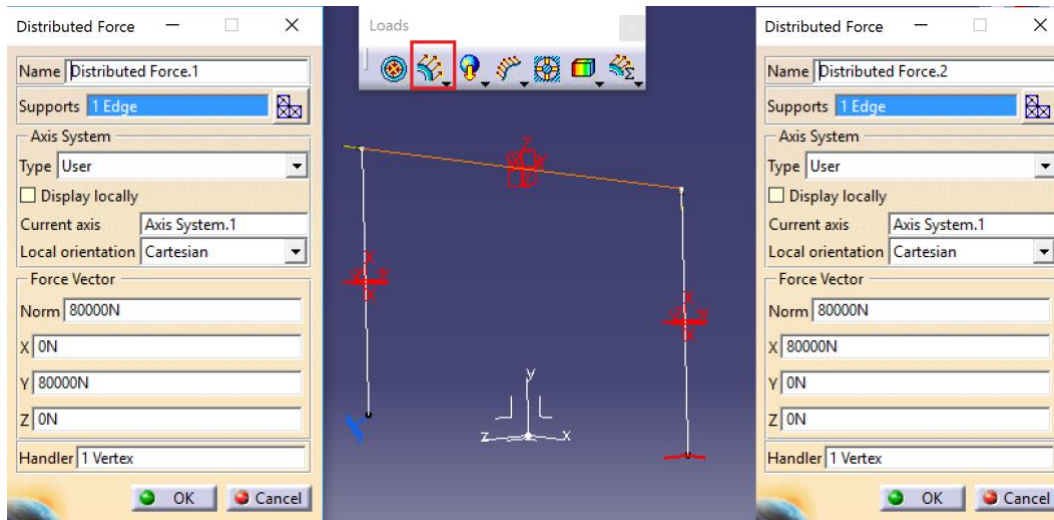


Figura 140. Comando Distributed Force.

Finalmente, ya se pueden lanzar los cálculos en ambos programas y así compararlos:

Deformada de la [Figura 141](#) calculada en MdrFx.



Figura 141. Deformada del pórtico en MdrFX.

Deformada de la [Figura 142](#) calculada en CATIA.

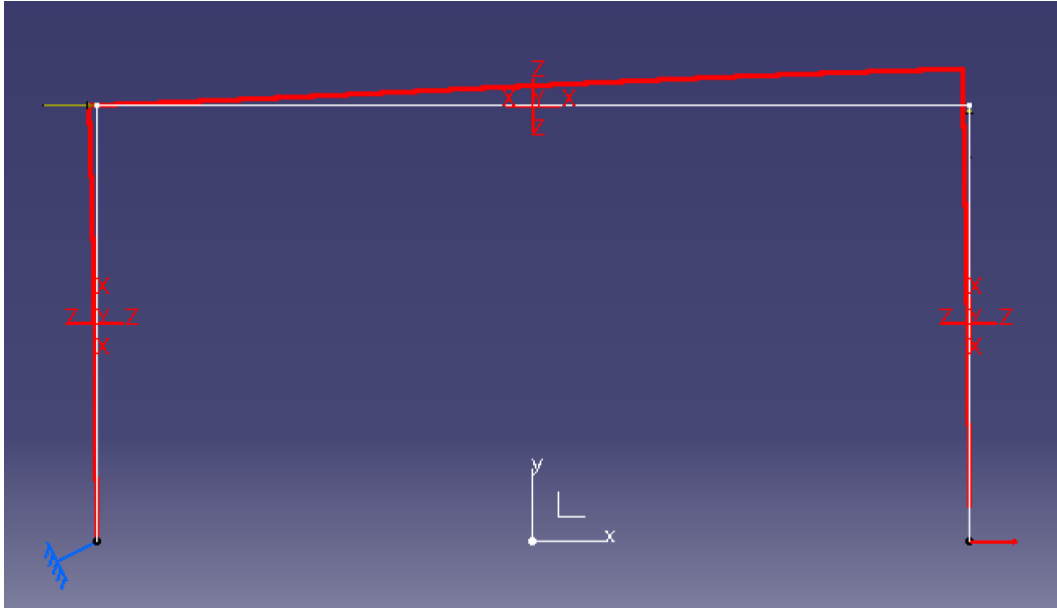


Figura 142. Deformada del pórtico en CATIA.

Se ve que la deformada es análoga en ambos casos, si bien en apariencia el resultado no parece idéntico debido a la escala que define cada programa.

Desplazamientos de la [Figura 143](#) calculados en MdrFx.

MdrFx

Desplazamientos

Barra 1											
x:	0,00	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00
Ux:	0E00	-2920E-08	-1,165E-04	-2,617E-04	-4,643E-04	-7,239E-04	-10,4E-04	-14,13E-04	-18,42E-04	-23,26E-04	-28,66E-04
Uy:	0E00	76,19E-08	152,4E-08	228,6E-08	304,8E-08	381E-08	457,1E-08	533,3E-08	609,5E-08	685,7E-08	761,9E-08
Barra 2											
x:	0,00	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00
Ux:	-28,66E-04	-28,67E-04	-28,69E-04	-28,71E-04	-28,72E-04	-28,74E-04	-28,75E-04	-28,77E-04	-28,79E-04	-28,8E-04	-28,82E-04
Uy:	761,9E-04	12,44E-04	26,53E-04	41,88E-04	58,03E-04	74,5E-04	90,82E-04	106,5E-04	121,2E-04	134,3E-04	145,3E-04
Barra 3											
x:	0,00	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00
Ux:	-28,82E-04	-24,17E-04	-20,07E-04	-16,48E-04	-13,32E-04	-10,53E-04	-8,05E-04	-5,82E-04	-3,776E-04	-1,857E-04	0E00
Uy:	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04	145,3E-04

Figura 143. Desplazamientos del pórtico en MdrFx.

Desplazamientos de la *Figura 144* calculados en CATIA.

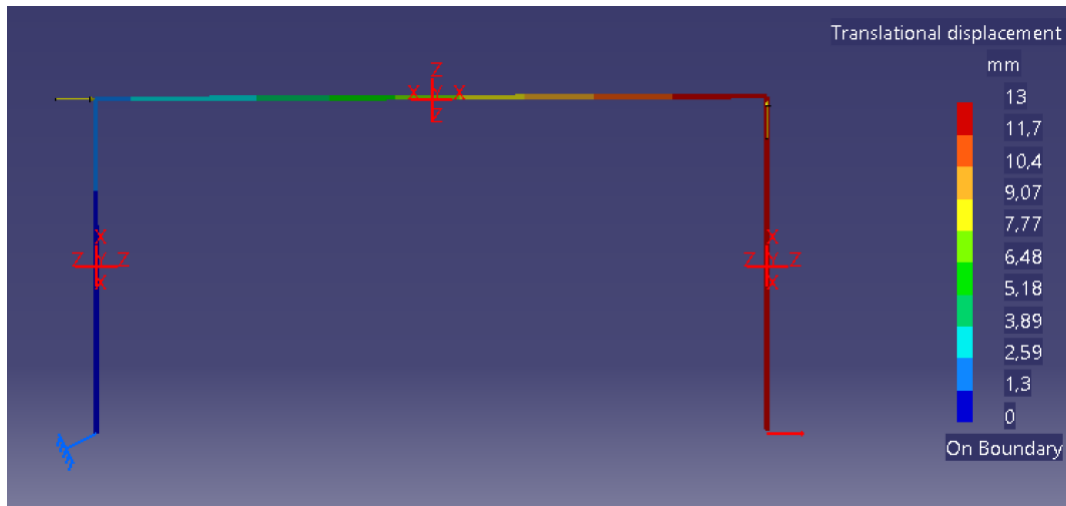


Figura 144. Diagrama de desplazamientos del pórtico en CATIA.

Debido a que en el caso de los desplazamiento, en MdrFx se obtiene una tabla de valores y en CATIA un histograma de colores, se va a seleccionar los nudos de los cuatro vértices de la *Figura 144* y se va a calcular el desplazamiento horizontal y vertical de estos vértices, y para ello, se hace doble clic en el apartado de *Traslational displacement* de la *Figura 145* y en la ventana que se abre, se selecciona la opción de *C1 & C2* dentro de *Component*, pero previamente se define el sistema de referencia local, en *Axis system*, si este es distinto al global.

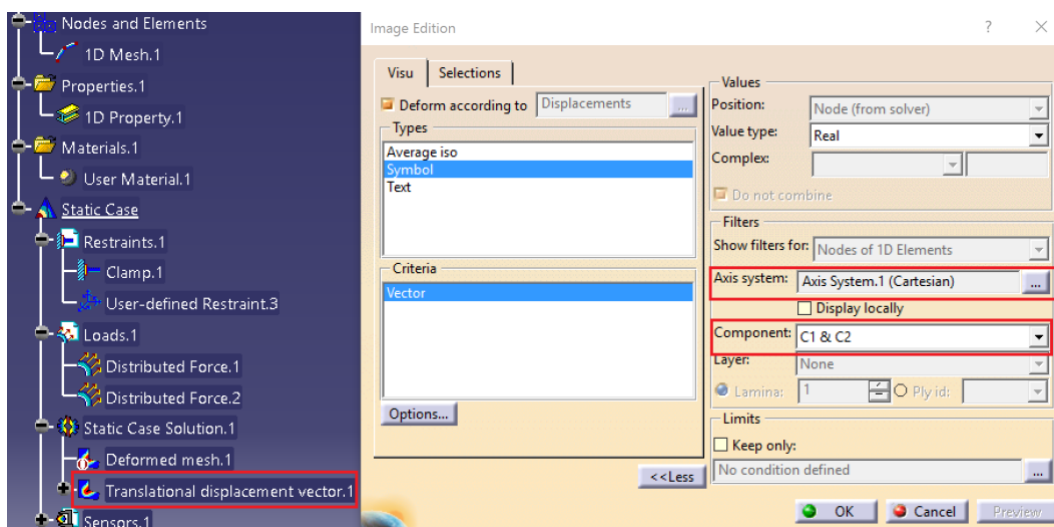


Figura 145. Ventana de Traslational displacement .

Y como resultado se tienen los desplazamientos de los cuatro vértices de la [Figura 146](#).

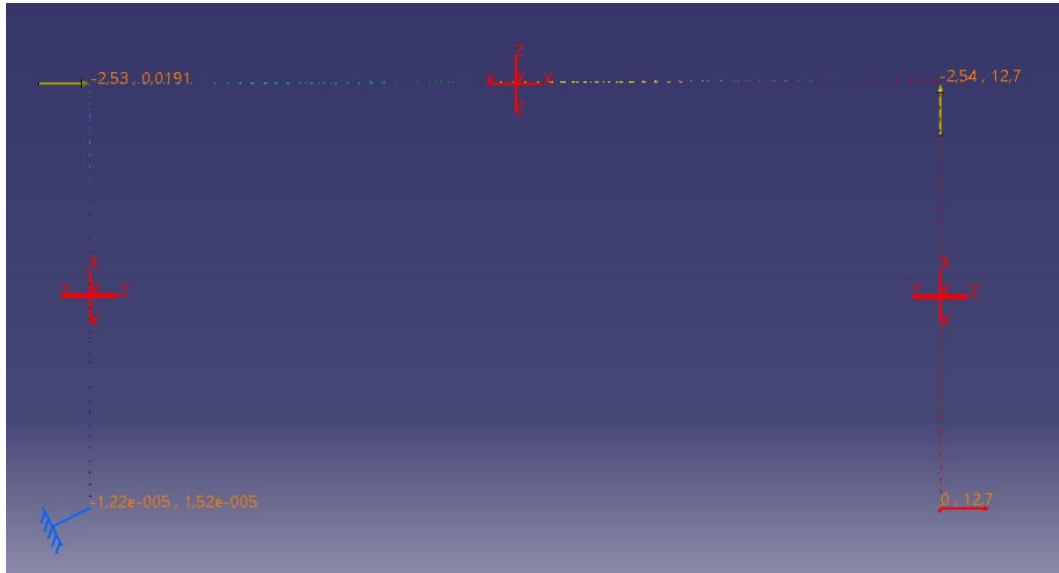


Figura 146. Desplazamientos del pórtico en CATIA.

Se comparan los valores en milímetros mediante la siguiente tabla.

Tabla 3. Comparación de resultados MdrFx-CATIA.

	NUDO 1		NUDO 2		NUDO 3		NUDO 4	
	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y
MdrFx	0	0	-2,86	0,0076	-2,88	14,5	0	14,5
CATIA	0	0	-2,53	0,019	-2,54	12,7	0	12,7

Observando y comparando las diferencias entre los desplazamientos se puede concluir que los resultados son válidos.

5.4 Cálculos con desplazamientos prescritos

En este apartado se va a describir cómo definir **desplazamientos prescritos** en apoyos, y para ello se procede a resolver una viga con un empotramiento en un

extremo y un apoyo móvil en el otro extremo, que únicamente impide el desplazamiento vertical, cuyas características son:

- Longitud 8 m.
- Desplazamiento vertical y hacia abajo en el apoyo móvil de 0,02 m.
- Fuerza puntual horizontal de 80 kN. en el apoyo móvil.
- Sección cuadrada de 0,01 x 0,01 m.
- Inercia = $(0,1 \cdot 0,1^3)/12 = 8,3333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$.
- Material, acero S275:
 - Modulo Young = $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.
 - Densidad = 7700 kg/m^3 .
 - Coeficiente de dilatación = $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

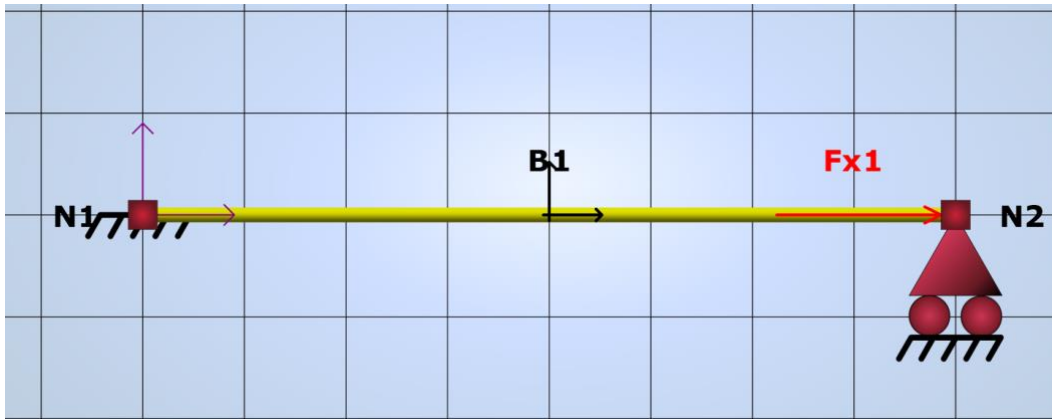


Figura 147. Viga empotrada-apoyada en MdrFx.

Para comparar los resultados, se va a utilizar el programa MdrFx (Figura 147), como en el apartado anterior, pero previamente se procede a definir el problema en CATIA.

En primer lugar se crea la línea de 8 m que define la barra en el módulo de *Part Design*, se definen los distintos apartados del problema estático al igual que en los casos anteriores:

- Mallado 1D formado por elementos de 1mm de longitud.
- Propiedades asociadas a modelos 1D, donde se define la sección cuadrada de 0,1 x 0,1m.
- Se crea un empotramiento y un apoyo móvil.
- La carga puntual de 80kN.

Obteniendo el resultado de la Figura 148.

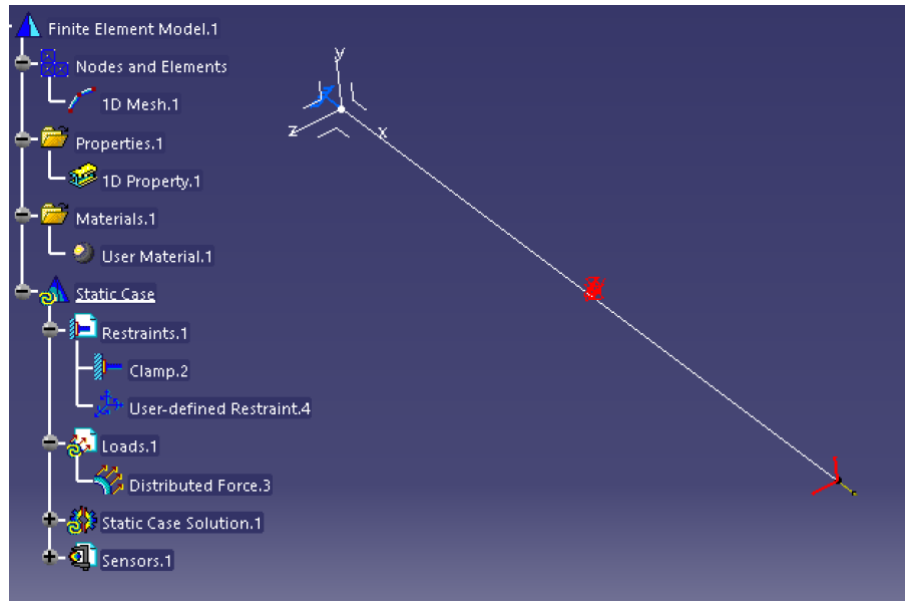


Figura 148. Viga empotrada-apoyada en CATIA.

Todos estos aspectos se definen según lo explicado en apartados previos. La novedad en este caso radica en cómo definir desplazamientos prescritos, y para ello se va a hacer uso del comando **Enforced Displacement** de la [Figura 149](#), que se encuentra en la barra de herramientas *Loads*:

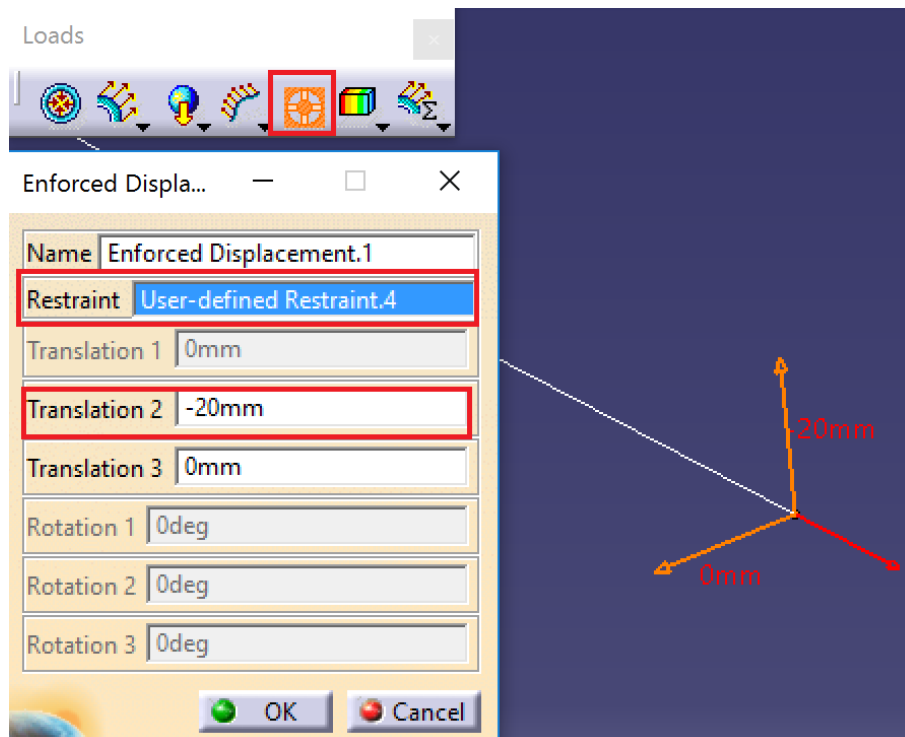


Figura 149. Comando *Enforced Displacement*.

Donde se selecciona como soporte, el apoyo móvil y se define en el eje vertical (*Traslacion 2*) un desplazamiento negativo de 20mm, de acuerdo con el sistema de referencia elegido a la hora de definir el apoyo de dicha barra.

Por último, ya se pueden lanzar los cálculos y compararlos con los obtenidos de MdrFx:

Deformada de la [Figura 150](#) calculada en MdrFx.

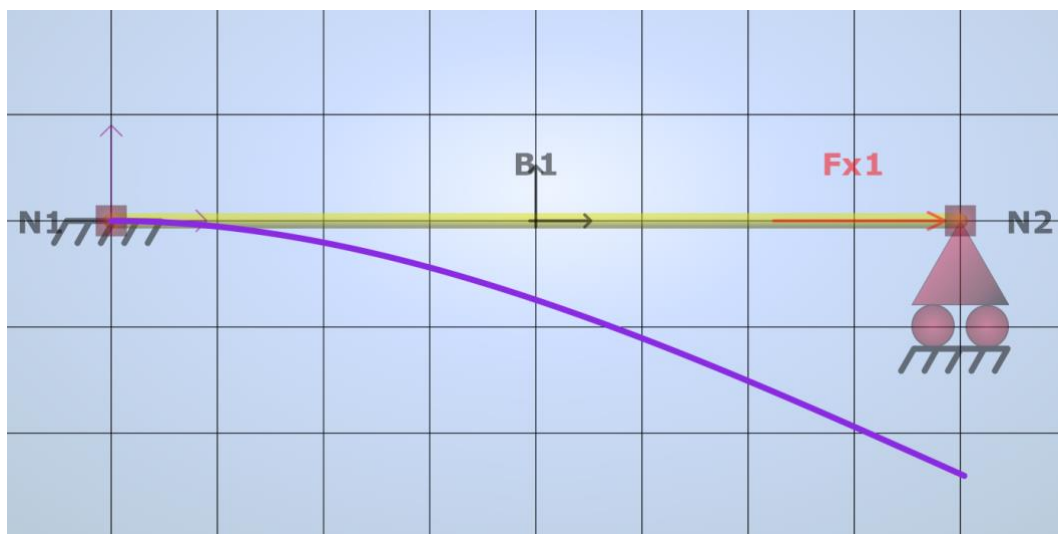


Figura 150. Deformada viga empotrada-apoyada en MdrFx.

Deformada de la [Figura 151](#) calculada en CATIA.

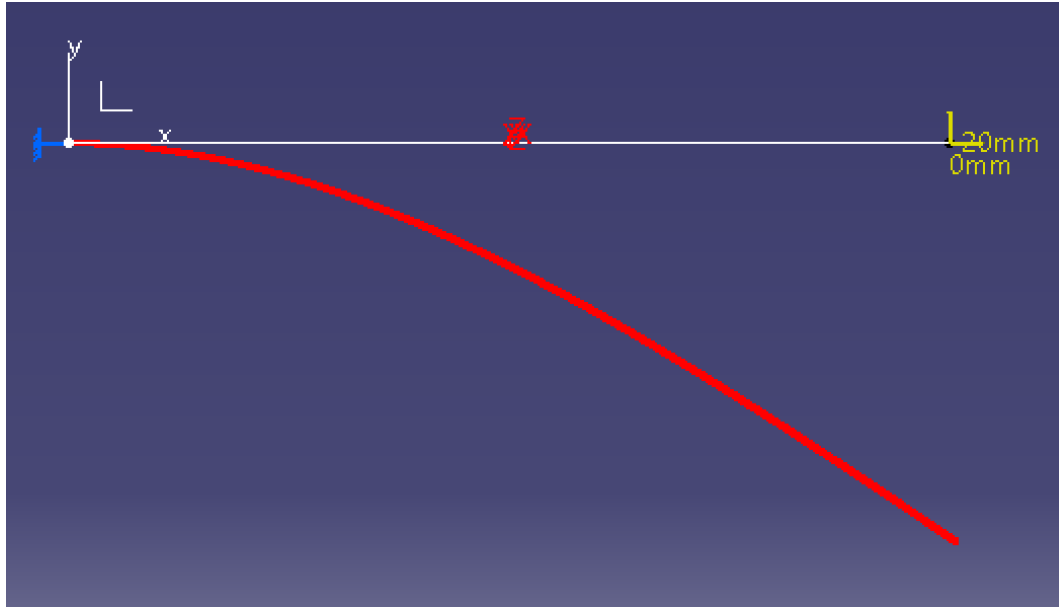


Figura 151. Deformada viga empotrada-apoyada en CATIA.

Desplazamientos de la [Figura 152](#) calculados en MdrFx.

MdrFx

Desplazamientos

Barra 1	0,00	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00
Ux:	0E00	3048E-08	6095E-08	9143E-08	1,219E-04	1,524E-04	1,829E-04	2,133E-04	2,438E-04	2,743E-04	3,048E-04
Uy	0E00	-2,9E-04	-11,2E-04	-24,3E-04	-41,6E-04	-62,5E-04	-86,4E-04	-112,7E-04	-140,8E-04	-170,1E-04	-200E-04

Figura 152. Desplazamientos viga empotrada-apoyada en MdrFx.

En la [Figura 153](#) en el extremo derecho se tiene un desplazamiento horizontal máximo de $3,048 \cdot 10^{-8} \text{ m}$, exactamente igual que el obtenido en MdrFx.

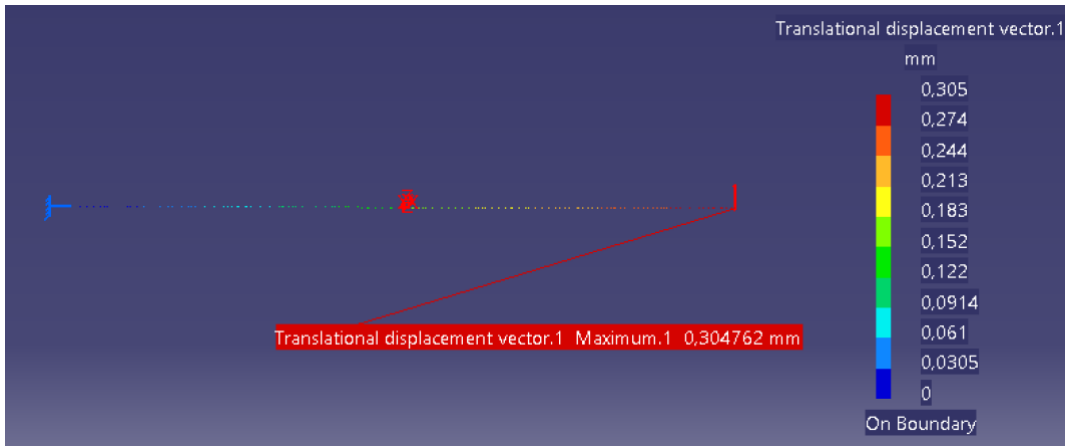


Figura 153. Desplazamiento horizontal viga empotrada-apoyada en CATIA.

En la [Figura 154](#) se tiene un desplazamiento vertical de **0,02 m**, asociado al desplazamiento prescrito, ya que el apoyo impide el desplazamiento vertical.

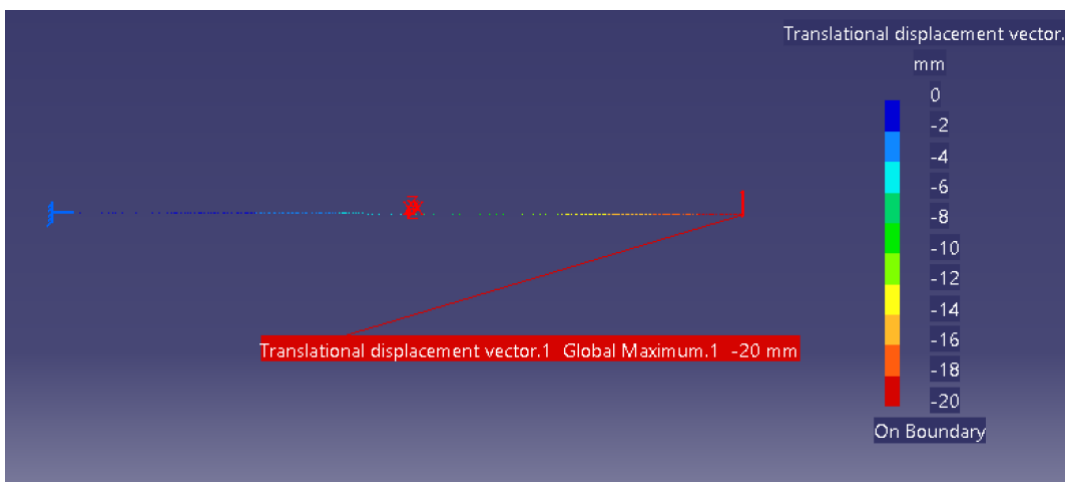


Figura 154. Desplazamiento vertical viga empotrada-apoyada en CATIA.

En conclusión, se observa que entre los dos software no se encuentran diferencias en cuanto a resultados para el tipo de ejercicios que son objeto de estudio en este TFG.

6 Conclusiones y líneas futuras

6.1 Conclusiones

Con estas múltiples validaciones, comparando los resultados con cálculos teóricos y programas diseñados concretamente para este tipo de cálculos, se ha comprobado que el módulo de CATIA *Generative Sturctural Analysis* es una herramienta apta para realizar cálculos estructurales estáticos según los contenidos de las asignaturas de Teoría de Estructuras y Resistencia de Materiales, cumpliéndose con ello los objetivos de este TGF planteados en el capítulo de Introducción.

Sin embargo, para desarrollar algunos de los apartados de este TFG, ha sido necesario la aplicación de adaptaciones o simplificaciones de las herramientas del módulo de elementos finitos de CATIA, las cuales seguramente no sean necesarias en otros softwares desarrollados para realizar concretamente este tipo de cálculos. Aun así, la base de esta validación es debida a que CATIA, se trata de una herramienta de la que todos los Ingenieros Mecánicos de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid tienen conocimientos.

Por la tanto, cualquier diseño de una pieza mecánica realizado en CATIA, este TFG, puede servir de ayuda para adquirir los conocimientos necesarios y las pautas para obtener los resultados estructurales con el módulo *Generative Sturctural Analysis*, ya que se trata de un módulo que no se estudia en ninguna de las asignaturas del Grado en Ingeniería Mecánica.

Por otra parte, en cuanto a competencias personales, desarrollar este Trabajo Fin de Grado, ha supuesto ampliar los conocimientos del módulo *Generative Sturctural Analysis*, sobre todo gracias al enfoque teórico que se ha dado, el cual ha supuesto descubrir nuevas herramientas y por lo tanto mejorar las habilidades en el uso de este software.

6.2 Líneas futuras

Las actividades de este TFG solamente se enfocan en el análisis estático. Sin embargo, el módulo *Generative Sturctural Analysis* dispone de otros tipos de análisis que se describen a continuación y los cuales podrían complementar nuestros cálculos estructurales, por lo que sería interesante que fuesen objeto de estudio en posteriores trabajos.

- Pandeo (*Buckling Case*)

Se trata del sub-módulo enfocado a análisis de estabilidad y hace posible el cálculo del pandeo o la abolladura de un objeto. Sin embargo, este proceso de cálculo solo es posible realizarlo si se cuanta previamente con los resultados del análisis estático.

- Analisis modal (*Frequency Analysis*)

El sub-módulo *Frequency Analysis* permite hacer un análisis modal de nuestro problema y por lo tanto conocer sus frecuencias naturales.

Conocer estas características permite que los diseños en CATIA sean más funcionales.

- Ensamblados (*Generative Assembly Structural Analysis*)

Se trata del módulo a partir del cual se realiza el análisis mecánico de modelos ensamblados por varias piezas, en el cual se dispone de las herramientas necesarias para definir las propiedades, las cargas y las condiciones de contorno entre las distintas piezas que forman el conjunto.

Referencias

- [1] E. Oñate, «Calculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos», CIMNE, 1992.
- [2] J. A. Vasquez Angulo, «Análisis y diseño de piezas con Catia V5», Marcombo, 2011.
- [3] CATIA V5 Help, «Generative Structural Analysis», Version 5 Release 14.
- [4] A. Foces y J.A. Garrido, «Apuntes de Elasticidad y Resistencia de Materiales», Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid.
- [5] «Manual de prácticas de Laboratorio de Estructuras y Construcciones Industriales», Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid.

ANEXOS

En el capítulo *Calculo de resultados* en la *Figura 41* se veía que mediante el comando **Generate Report**, se puede obtener un informe de todos los cálculos, resultados, gráficas y tablas de datos, de cada uno de los modelos realizados, es por ello que a continuación se adjunta los informes de algunos de los ejercicios más representativos de este Trabajo Fin de Grado, en este caso corresponden a los modelos descritos en los capítulos:

- *Desplazamientos mediante mallado 3D.*
- *Tensión normal mediante mallado 3D*

Desplazamientos_3D

MESH:

Entity	Size
Nodes	521
Elements	1498

ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
TE4	1498 (100,00%)

ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	1498 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,365	0,583
Aspect Ratio	1121 (74,83%)	377 (25,17%)	0 (0,00%)	4,550	2,188

Materials.1

Material	User Material.2 : Iron
Young's modulus	210000,00307MPa
Poisson's ratio	0,291
Density	7700kg_m3
Coefficient of thermal expansion	0,00001_Kdeg
Yield strength	275MPa

Static Case

Boundary Conditions

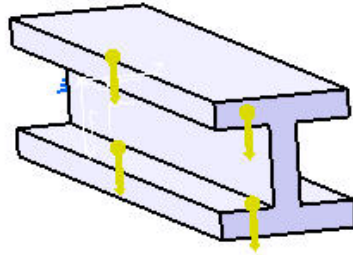


Figure 1

STRUCTURE Computation

Number of nodes	:	521
Number of elements	:	1498
Number of D.O.F.	:	1563
Number of Contact relations	:	0
Number of Kinematic relations	:	0

Linear tetrahedron : 1498

RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 81

LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

Fx	=	0	.	000e+000	N
Fy	=	0	.	000e+000	N

Fz	=	-2	.	502e+001	N
Mx	=	1	.	255e-010	Nxm
My	=	-3	.	128e+000	Nxm
Mz	=	0	.	000e+000	Nxm

STRUCTURAL MASS Computation

Name: StructuralMassSet.1

Number of lines	:	1563		
Number of coefficients	:	25428		
Number of blocks	:	1		
Maximum number of coefficients per bloc	:	25428		
Total matrix size	:	0	.	30 Mb

Structural mass : 2.503e+000 kg

Inertia center coordinates

Xg	:	-1	.	250e+002	mm
Yg	:	-5	.	015e-009	mm
Zg	:	4	.	346e-009	mm

Inertia tensor at origin: kgxm2

1.235e-003	-1.569e-012	1.360e-012
-1.569e-012	5.296e-002	-2.719e-013
1.360e-012	-2.719e-013	5.254e-002

STIFFNESS Computation

Number of lines	:	1563		
Number of coefficients	:	25428		
Number of blocks	:	1		
Maximum number of coefficients per bloc	:	25428		
Total matrix size	:	0	.	30 Mb

SINGULARITY Computation

Restraint: Restraints.1

Number of local singularities	:	0
Number of singularities in translation	:	0
Number of singularities in rotation	:	0
Generated constraint type	:	MPC

CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

```

Number of constraints      : 81
Number of coefficients    : 0
Number of factorized constraints : 81
Number of coefficients    : 0
Number of deferred constraints : 0
    
```

FACTORIZED Computation

```

Method                    : SPARSE
Number of factorized degrees : 1482
Number of supernodes      : 296
Number of overhead indices : 9771
Number of coefficients     : 87288
Maximum front width       : 183
Maximum front size        : 16836
Size of the factorized matrix (Mb) : 0 . 665955
Number of blocks          : 1
Number of Mflops for factorization : 8 . 809e+000
Number of Mflops for solve : 3 . 566e-001
Minimum relative pivot    : 8 . 165e-003
    
```

Minimum and maximum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1.2013e+008	Ty	521	-2.2343e+002	-1.6588e+000	-6.3134e+000
1.9596e+010	Ty	452	-2.0143e+002	-1.3000e+001	2.5000e+001

Minimum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1.7552e+008	Tz	521	-2.2343e+002	-1.6588e+000	-6.3134e+000
2.5669e+008	Ty	442	-1.2300e+002	-1.5710e+000	2.5000e+001
3.7355e+008	Ty	477	-2.0142e+002	3.3338e-001	1.3524e+001
3.9932e+008	Ty	515	-4.2214e+001	-1.0892e+000	-4.7271e+000
4.0135e+008	Tz	403	-3.4619e+001	1.4989e+001	1.5000e+001
4.3923e+008	Tz	442	-1.2300e+002	-1.5710e+000	2.5000e+001
4.5138e+008	Ty	403	-3.4619e+001	1.4989e+001	1.5000e+001
4.9990e+008	Ty	472	-1.2891e+002	-6.2916e-001	1.4220e+001
5.0070e+008	Ty	474	-1.5897e+002	-6.2587e-001	1.4177e+001

Translational pivot distribution

Value	Percentage
10.E8 --> 10.E9	4.1161e+000
10.E9 --> 10.E10	9.2510e+001
10.E10 --> 10.E11	3.3738e+000

DIRECT METHOD Computation

Name: Static Case Solution.1

Restraint: Restraints.1

Structural mass is taken into account

Load: Loads.1

Strain Energy : 2.934e-006 J

Equilibrium

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	0.0000e+000	2.8071e-012	2.8071e-012	1.8404e-013
Fy (N)	0.0000e+000	-9.9509e-013	-9.9509e-013	6.5241e-014
Fz (N)	-2.5025e+001	2.5025e+001	1.4381e-011	9.4288e-013
Mx (Nxm)	1.2550e-010	-1.2550e-010	-1.4778e-016	3.8756e-017
My (Nxm)	-3.1281e+000	3.1281e+000	2.7134e-012	7.1158e-013
Mz (Nxm)	0.0000e+000	1.9788e-013	1.9788e-013	5.1893e-014

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.2

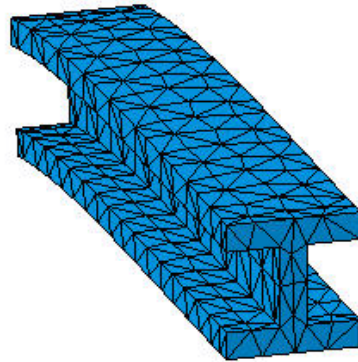
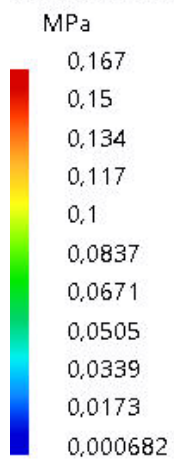


Figure 2

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Von Mises stress (nodal values).1

Von Mises stress (nodal values).1



On Boundary

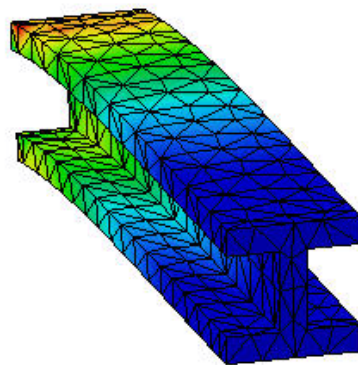


Figure 3

3D elements: : Components: : All

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Translational displacement vector.1

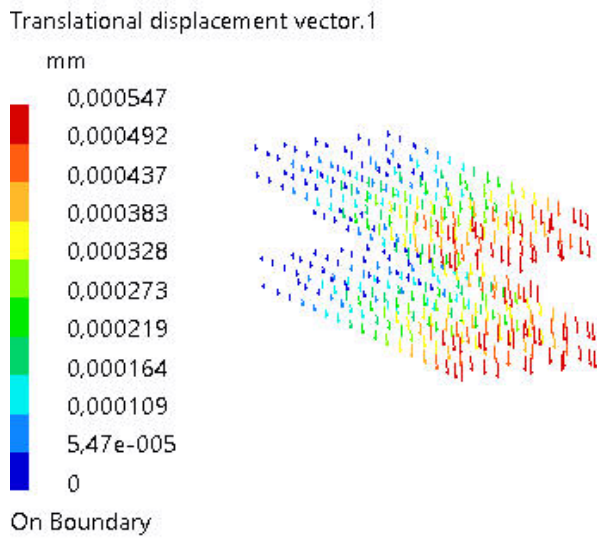


Figure 4

3D elements: : Components: : C2

On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.1

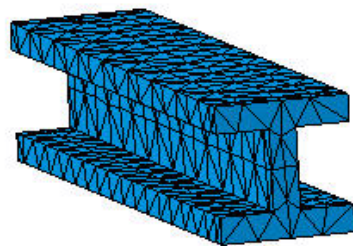


Figure 5

On boundary ---- Over all the model

Global Sensors

Sensor Name	Sensor Value
Energy	2,93405e-006J
Global Error Rate (%).2	32,480110168

Tension_3D

MESH:

Entity	Size
Nodes	8786
Elements	23853

ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
TE4	23853 (100,00%)

ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	23853 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0,402	0,537
Aspect Ratio	5496 (23,04%)	18357 (76,96%)	0 (0,00%)	3,057	2,653

Materials.1

Material	User Material.1 : Iron
Young's modulus	210000,00307MPa
Poisson's ratio	0,291
Density	7700kg_m3
Coefficient of thermal expansion	0,00001_Kdeg
Yield strength	275MPa

Static Case

Boundary Conditions

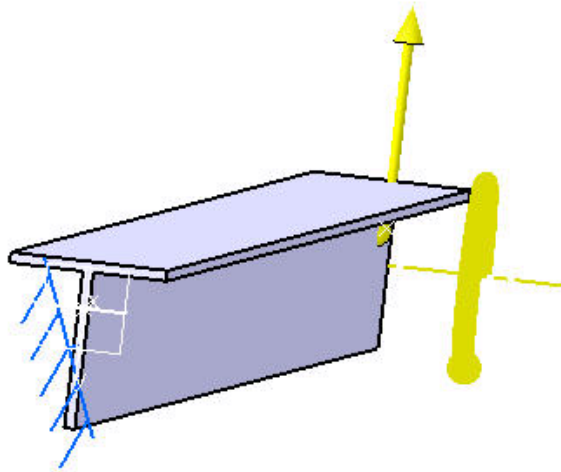


Figure 1

STRUCTURE Computation

Number of nodes	:	8786
Number of elements	:	23853
Number of D.O.F.	:	26358
Number of Contact relations	:	0
Number of Kinematic relations	:	0

Linear tetrahedron : 23853

RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 105

LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

Fx	=	-9	.	413e-011	N
Fy	=	-1	.	000e+004	N

Fz	=	3	.	000e+003	N
Mx	=	1	.	600e+004	Nxm
My	=	-4	.	507e-008	Nxm
Mz	=	4	.	698e-006	Nxm

STIFFNESS Computation

Number of lines	:	26358	
Number of coefficients	:	425505	
Number of blocks	:	1	
Maximum number of coefficients per bloc	:	425505	
Total matrix size	:	4	. 97 Mb

SINGULARITY Computation

Restraint: Restraints.1

Number of local singularities	:	0
Number of singularities in translation	:	0
Number of singularities in rotation	:	0
Generated constraint type	:	MPC

CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

Number of constraints	:	105
Number of coefficients	:	0
Number of factorized constraints	:	105
Number of coefficients	:	0
Number of deferred constraints	:	0

FACTORIZED Computation

Method	:	SPARSE
Number of factorized degrees	:	26253
Number of supernodes	:	2288
Number of overhead indices	:	106836
Number of coefficients	:	2081457
Maximum front width	:	264
Maximum front size	:	34980
Size of the factorized matrix (Mb)	:	15 . 8803
Number of blocks	:	3
Number of Mflops for factorization	:	2 . 566e+002
Number of Mflops for solve	:	8 . 457e+000
Minimum relative pivot	:	1 . 362e-005

Minimum and maximum pivot



Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
9.3093e+004	Tx	8786	3.0878e+001	2.4898e+003	4.0000e+001
1.6236e+010	Tx	7181	6.0730e+001	2.6609e+003	4.5000e+001

Minimum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1.4050e+005	Tz	8786	3.0878e+001	2.4898e+003	4.0000e+001
2.4445e+007	Tz	8729	3.7707e+001	5.2385e+002	4.5000e+001
4.0810e+007	Tx	2516	4.3075e+001	4.5221e+003	3.5000e+001
4.4010e+007	Tz	1943	-7.5000e+001	2.8800e+003	4.5000e+001
5.2425e+007	Tz	8780	-5.9500e+001	4.9800e+003	4.5000e+001
6.3777e+007	Tx	7234	5.9000e+001	3.7200e+003	4.5000e+001
6.3795e+007	Tx	7657	-6.0000e+001	1.4400e+003	4.5000e+001
6.8647e+007	Ty	1330	-5.0000e+000	8.4000e+002	3.5000e+001
7.0832e+007	Ty	8786	3.0878e+001	2.4898e+003	4.0000e+001

Translational pivot distribution

Value	Percentage
10.E4 --> 10.E5	3.8091e-003
10.E5 --> 10.E6	3.8091e-003
10.E6 --> 10.E7	0.0000e+000
10.E7 --> 10.E8	4.5709e-002
10.E8 --> 10.E9	2.5178e+000
10.E9 --> 10.E10	9.1456e+001
10.E10 --> 10.E11	5.9727e+000

DIRECT METHOD Computation

Name: Static Case Solution.1

Restraint: Restraints.1

Load: Loads.1

Strain Energy : 1.150e+002 J

Equilibrium

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	-9.4135e-011	-1.6525e-006	-1.6526e-006	7.9183e-011
Fy (N)	-1.0000e+004	1.0000e+004	-1.7544e-006	8.4061e-011
Fz (N)	3.0000e+003	-3.0000e+003	1.1091e-005	5.3141e-010
Mx (Nxm)	1.6000e+004	-1.6000e+004	4.5505e-005	4.3607e-010
My (Nxm)	-4.5069e-008	4.4599e-007	4.0092e-007	3.8420e-012
Mz (Nxm)	4.6976e-006	5.5446e-007	5.2520e-006	5.0329e-011

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.2

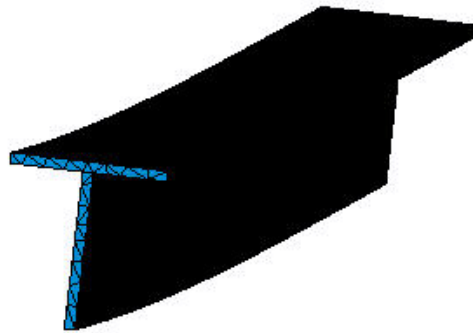


Figure 2

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Von Mises stress (nodal values).1

Von Mises stress (nodal values).1

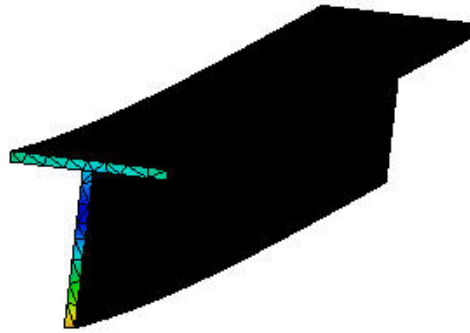
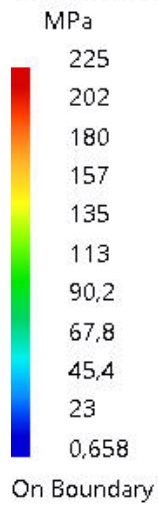


Figure 3

3D elements: : Components: : All

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Stress full tensor component (element's nodes values).1

Stress full tensor component (element's nodes values).1

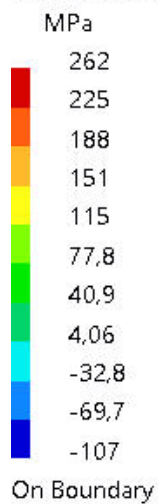


Figure 4

3D elements: : Components: : C11

On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.1

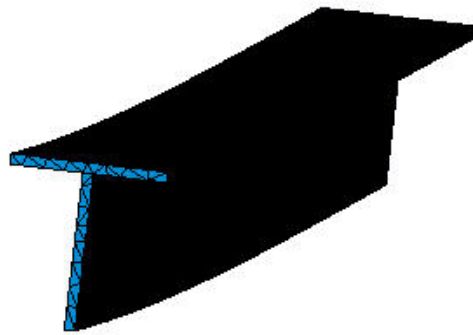


Figure 5

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Estimated local error.1

Estimated local error.1

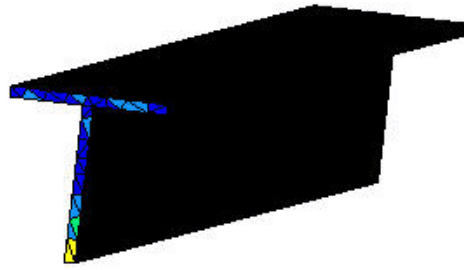


Figure 6

3D elements: : Components: : All

On all Elements ---- Over all the model