



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**COMPARATIVA DE PROGRAMAS PARA EL  
ANÁLISIS ESTÁTICO.**

**Autor:**

**Martín Rodríguez, David**

**Tutor:**

**Del Val Puente, Lara**

**Martín Fernández, Miguel Ángel**

**CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF**

**Valladolid, Julio del 2018.**



## **RESUMEN**

El siguiente trabajo se encuentra dentro de un proyecto docente que busca aportar una cierta carga práctica de simulación a la asignatura Diseño de Máquinas. La Universidad de Valladolid se encuentra dentro del EESS (Espacio Europeo de Educación Superior) donde la mayoría de las asignaturas equivalentes a Diseño de Máquinas ya cuentan con una carga práctica.

Este proyecto docente se inició el año pasado con dos TFG [1-2] donde se estudió como realizar análisis estáticos con Catia. En este trabajo, se va a realizar una continuación de los anteriores trabajos, de manera que se va a comparar Catia con otros programas, que permiten hacer análisis estáticos, como SolidWorks y FreeCAD. Se incluirá una guía de usuario para los tres programas, así como una comparativa entre los tres que acabará conduciendo a la elección del programa más idóneo para utilizar en la futura carga práctica.

## **PALABRAS CLAVE:**

Carga práctica, análisis estático, simulación, Catia, SolidWorks, FreeCAD.

## **ABSTRACT**

The following work is part of a teaching project that seeks to bring a certain practical load of simulation to the subject Machine Design. The University of Valladolid is located within the EESS (European Higher Education Area) where most of the subjects equivalent to Machine Design already have a practical load.

This teaching project began last year with two TFG [1-2] where it was studied how to perform static analysis with Catia. In this work, a continuation of the works will be carried out, so that Catia will be compared with other programs that allow static analysis, such as SolidWorks and FreeCAD. A user guide will be included for the three programs, as well as a comparison between them that will end up leading to the choice of the most suitable program to use in the future practical load.

## **KEY WORDS:**

Practical load, static analysis, simulation, Catia, SolidWorks, FreeCAD.



## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	13
1.1: OBJETIVOS .....	15
1.1.1: Objetivo principal .....	15
1.1.2: Objetivos secundarios .....	15
1.2: PROGRAMAS UTILIZADOS .....	15
1.3: CONOCIMIENTOS PREVIOS.....	16
1.4: DIFICULTADES .....	16
1.5: ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	16
CAPÍTULO 2: DISEÑO ESTÁTICO.....	19
2.1: CÁLCULO DE TENSIONES [3].....	20
2.2: TENSIONES PRINCIPALES [3].....	20
2.3: CONCENTRACIÓN DE TENSIONES [3].....	21
2.4: TEORÍAS DE FALLO.....	22
2.4.1: Teoría del Esfuerzo Normal máximo (ENM) [3] .....	22
2.4.2: Teoría del Esfuerzo Cortante máximo [4] .....	22
2.4.3: Teoría de la Energía de Distorsión [4].....	23
2.4.4: Teoría de Coulomb-Mohr [4].....	25
2.5: ELECCIÓN DE LA TEORÍA DE FALLO.....	26
CAPÍTULO 3: ELEMENTOS FINITOS. SOFTWARES DE SIMULACIÓN .....	29
3.1: MÉTODO ELEMENTOS FINITOS [4] .....	29
3.2: CATIA.....	30
3.2.1: Part Desing.....	31
3.2.2: Generative Structural Analysis .....	32
3.3: SOLIDWORKS .....	43
3.3.1 Pieza .....	44
3.3.2 SolidWorks Simulation .....	45
3.4: FREECAD.....	62
3.4.1: Part Design.....	63
3.4.2: FEM.....	63
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTÁTICOS .....	75



4.1: PALANCA EMPOTRADA .....	75
4.1.1: Deformación estática .....	80
4.1.2: Primera tensión principal .....	82
4.1.3: Segunda tensión principal .....	84
4.1.4: Tensión de Von Misses .....	86
4.1.5: Conclusiones.....	88
4.2: EJE ROTATIVO .....	89
4.2.3: Deformación estática .....	94
4.2.2: Primera tensión principal .....	96
4.2.3: Segunda tensión principal .....	98
4.2.4: Tensión de Von Misses .....	100
4.2.5: Conclusiones.....	102
4.3: MOMENTO TORSOR .....	102
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	109
5.1: COMPARATIVA ENTRE LOS TRES PROGRAMAS .....	109
5.2: CONCLUSIONES .....	111
5.3: LÍNEAS FUTURAS.....	113
BIBLIOGRAFÍA .....	115
ANEXO.....	117

## ÍNDICE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Horas de laboratorio.</i>	14
<i>Figura 1.2: Créditos laboratorio.</i>	14
<i>Figura 2.1: Diagrama esfuerzo-deformación material: a) dúctil, b) frágil - [4].</i>	19
<i>Figura 2.2: Tipos de carga: a) Tracción, b) Torsión, c) Flexión - [3].</i>	20
<i>Figura 2.3: Círculo de Mohr biaxial.</i>	20
<i>Figura 2.4: Gráficas de concentración de tensiones.</i>	21
<i>Figura 2.5: Teoría de esfuerzo normal máximo bidimensional [3].</i>	22
<i>Figura 2.4: Teoría de esfuerzo cortante máximo bidimensional [4].</i>	23
<i>Figura 2.6: Comparación entre ENM y Tresca.</i>	23
<i>Figura 2.5: Descomposición tensiones principales [4].</i>	24
<i>Figura 2.6: Teoría distorsión bidimensional [4].</i>	25
<i>Figura 2.7: Teoría Coulomb-Mohr bidimensional [4].</i>	26
<i>Figura 2.8: Teoría Coulomb-Mohr modificada bidimensional [3].</i>	26
<i>Figura 3.1: Geometría sencilla para FEM en Catia.</i>	29
<i>Figura 3.2: Geometría compleja para FEM en SolidWorks.</i>	30
<i>Figura 3.3: Módulos de Catia V5 de Catia.</i>	31
<i>Figura 3.4: Entorno Part Desing de Catia.</i>	32
<i>Figura 3.5: Tipo de análisis en Catia.</i>	32
<i>Figura 3.6: Entorno Generative Structural Anlaysia de Catia.</i>	33
<i>Figura 3.7: Árbol de operaciones de Catia.</i>	34
<i>Figura 3.8: Barra de herramientas Restraints en Catia.</i>	35
<i>Figura 3.9: Aplicación de un empotramiento en Catia.</i>	35
<i>Figura 3.10: Restringir desplazamientos y giros en Catia.</i>	36
<i>Figura 3.11: Ejemplo desplazamientos restringidos en Catia.</i>	36
<i>Figura 3.12: Barra de herramientas Loads en Catia.</i>	37
<i>Figura 3.13: Aplicación de una fuerza en Catia.</i>	37
<i>Figura 3.14: Ejemplo fuerza puntual en Catia.</i>	37
<i>Figura 3.15: Aplicación de un momento en Catia.</i>	38
<i>Figura 3.16: Ejemplo momento en Catia.</i>	38
<i>Figura 3.17: Barra de herramientas Virtual Parts en Catia.</i>	39



*Figura 3.18: Opción Octree Tetrahedron Mesh en Catia. ....39*

*Figura 3.19: Elección de la malla en Catia..... 40*

*Figura 3.20: Barra de herramientas Image en Catia..... 40*

*Figura 3.21: Deformada de una viga en voladizo en Catia. .... 41*

*Figura 3.22: Deformación estática de una viga en voladizo en Catia..... 41*

*Figura 3.23: Tensión principal en una viga en voladizo en Catia. .... 42*

*Figura 3.24: Tensión de Von Misses en una viga en voladizo en Catia. .... 42*

*Figura 3.25: Precisión de los cálculos en una viga en voladizo en Catia. .... 43*

*Figura 3.26: Barra de herramientas Analysis Tools en Catia. .... 43*

*Figura 3.27: Entornos de trabajo SolidWorks de SolidWorks. .... 44*

*Figura 3.28: Entorno Pieza de SolidWorks. .... 45*

*Figura 3.29: Localización de los Complementos de SolidWorks. .... 45*

*Figura 3.30: Complementos SolidWorks. .... 45*

*Figura 3.31: Elección del tipo de análisis en SolidWorks. .... 46*

*Figura 3.32: Entorno Simulation de SolidWorks. .... 46*

*Figura 3.33: Elección de material en SolidWorks. .... 47*

*Figura 3.34: Material personalizado en SolidWorks..... 48*

*Figura 3.35: Barra de herramienta de Sujeciones en SolidWorks. .... 48*

*Figura 3.36: Geometría fija en SolidWorks. .... 49*

*Figura 3.37: Rodillo/Control deslizante en SolidWorks..... 49*

*Figura 3.38: Bisagra fija en SolidWorks. .... 50*

*Figura 3.39: Sujeciones avanzadas en SolidWorks..... 50*

*Figura 3.40: Localización sujeción de rodamiento en SolidWorks..... 51*

*Figura 3.41: Opción sujeción de rodamiento en SolidWorks..... 51*

*Figura 3.42: Partición para rodamiento en SolidWorks. .... 52*

*Figura 3.43: Sujeción de rodamiento en SolidWorks. .... 52*

*Figura 3.44: Conectores en SolidWorks. .... 53*

*Figura 3.45: Cargas externas en SolidWorks..... 53*

*Figura 3.46: Definición de la fuerza en SolidWorks. .... 54*

*Figura 3.47: Fuerza en SolidWorks..... 54*

*Figura 3.48: Fuerza puntual en SolidWorks..... 55*

*Figura 3.49: Momento torsor en SolidWorks. .... 55*





<i>Figura 3.50: Elección del mallado en SolidWorks.</i>	56
<i>Figura 3.51: Malla basada en curvatura en SolidWorks.</i>	56
<i>Figura 3.52: Control de mallado en SolidWorks.</i>	57
<i>Figura 3.53: Opciones de resultados en SolidWorks.</i>	58
<i>Figura 3.54: Deformación estática de una viga en voladizo en SolidWorks.</i>	58
<i>Figura 3.55: Tensión principal de una viga en voladizo en SolidWorks.</i>	59
<i>Figura 3.56: Tensión de Von Misses de una viga en voladizo en SolidWorks.</i>	59
<i>Figura 3.57: Error de cálculo en una viga en voladizo en SolidWorks.</i>	60
<i>Figura 3.58: Anotación máxima en SolidWorks.</i>	60
<i>Figura 3.59: Herramientas de trazado en SolidWorks.</i>	61
<i>Figura 3.60: Identificar valores en SolidWorks.</i>	61
<i>Figura 3.61: Módulos de FreeCAD.</i>	62
<i>Figura 3.62: Módulo Part Design de FreeCAD.</i>	63
<i>Figura 3.63: Módulo FEM de FreeCAD.</i>	64
<i>Figura 3.64: Elección de material en FreeCAD.</i>	65
<i>Figura 3.65: Restricciones en FreeCAD.</i>	65
<i>Figura 3.67: Restricción de grados de libertad en FreeCAD.</i>	66
<i>Figura 3.68: Ejemplo de movimientos impedidos en FreeCAD.</i>	66
<i>Figura 3.69: Error para la restricción de rotación en FreeCAD.</i>	67
<i>Figura 3.70: Cargas en FreeCAD.</i>	67
<i>Figura 3.71: Definición de la fuerza en FreeCAD.</i>	68
<i>Figura 3.72: Fuerza en FreeCAD.</i>	68
<i>Figura 3.73: Transformación a cilíndricas en FreeCAD.</i>	69
<i>Figura 3.74: Momento torsor en FreeCAD.</i>	69
<i>Figura 3.75: Opciones de mallado en FreeCAD.</i>	70
<i>Figura 3.76: Malla Netgen en FreeCAD.</i>	70
<i>Figura 3.77: Malla GMSH en FreeCAD.</i>	70
<i>Figura 3.78: Ubicación CalculiXccxTools en FreeCAD.</i>	71
<i>Figura 3.79: Ejecución del problema en FreeCAD.</i>	71
<i>Figura 3.80: Mostrar resultados en FreeCAD.</i>	71
<i>Figura 3.81: Resultados de FreeCAD.</i>	72



Figura 3.82: Deformación estática de una viga en voladizo en FreeCAD..... 72

Figura 3.83: Tensión principal en una viga en voladizo en FreeCAD. .... 73

Figura 3.84: Tensión de Von Misses en una viga en voladizo en FreeCAD. . 73

Figura 4.1: Enunciado palanca empotrada..... 75

Figura 4.2: Diagrama momentos barra empotrada..... 76

Figura 4.3: Palanca empotrada: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 77

Figura 4.4: Malla sin concentración de tensiones en Catia..... 78

Figura 4.5: Malla sin concentración de tensiones en SolidWorks..... 78

Figura 4.6: Malla sin concentración de tensiones en FreeCAD..... 78

Figura 4.7: Malla con concentración de tensiones en Catia. .... 79

Figura 4.8: Malla con concentración de tensiones en SolidWorks. .... 79

Figura 4.9: Malla con concentración de tensiones en FreeCAD..... 79

Figura 4.10: Desplazamientos sin concentración de tensiones en la palanca:  
a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. .... 81

Figura 4.11: Desplazamientos con concentración de tensiones en la  
palanca: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 81

Figura 4.12: Primera tensión principal sin concentración de tensiones en la  
palanca: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 83

Figura 4.13: Primera tensión principal con concentración de tensiones en la  
palanca: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 83

Figura 4.14: Segunda tensión principal sin concentración de tensiones en la  
palanca: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 85

Figura 4.15: Segunda tensión principal con concentración de tensiones en  
la palanca: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD..... 85

Figura 4.16: Von Misses sin concentración de tensiones en la palanca:  
a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. .... 87

Figura 4.17: Von Misses con concentración de tensiones en la palanca:  
a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. .... 87

Figura 4.18: Enunciado eje rotativo..... 89

Figura 4.19: Diagrama momento flector del eje rotativo..... 89

Figura 4.20: Condiciones de contorno en Catia. .... 91

Figura 4.21: Particiones del eje. .... 91

Figura 4.22: Condiciones contorno en SolidWorks..... 92

Figura 4.23: Condiciones contorno en FreeCAD..... 92



<i>Figura 4.24: Eje rotativo: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.25: Mallas en Catia. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.26: Mallas en SolidWorks. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.27: Mallas en FreeCAD. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.28: Deformación estática sin concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.29: Deformación estática con concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.30: Primera tensión principal sin concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.31: Primera tensión principal con concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.32: Segunda tensión principal sin concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.33: Segunda tensión principal con concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.34: Tensión de Von Misses sin concentración de tensiones en el eje: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.36: Pieza para momento torsor.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.37: Momento torsor .....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.38: Momento torsor en FreeCAD. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.39: Deformación estática debida al momento: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.40: Tensión de Von Misses debida al momento: a)Catia b)SolidWorks c)FreeCAD. ....</i>	<i>105</i>



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Las Universidades que se encuentran dentro del EESS (Espacio Europeo de Educación Superior) [W1] incluyen dentro de sus programas una cierta carga práctica para que los alumnos puedan comprender mejor los contenidos de las diferentes asignaturas y así poder relacionar estos conocimientos con lo que se encontrarán en el mundo laboral.

La asignatura Diseño de Máquinas que se imparte en el Grado en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Valladolid [W2], es una asignatura donde se estudia cómo diseñar diferentes elementos de máquinas sometidos a diferentes esfuerzos. Esta asignatura cuenta con una carga docente de 6 créditos ECTS y se imparte en el segundo cuatrimestre del tercer curso del grado.

El modo en que se imparte esta asignatura en la Universidad de Valladolid consiste en unas clases de teoría que son complementadas con clases de aula en las que se resuelven diferentes problemas donde poder desarrollar los conocimientos adquiridos. Además la asignatura cuenta con la realización de un trabajo en grupo que permite profundizar más sobre el diseño de algún elemento de máquina, incluido en algún mecanismo.

Dentro de la guía docente de esta asignatura se puede echar en falta unas horas dedicadas a unas prácticas de laboratorio donde los alumnos puedan trabajar con un software de Elementos Finitos que les ayude a comprender mejor la asignatura y les permita adecuar sus conocimientos a su futuro mundo laboral.

Con el fin de introducir en los próximos años unas prácticas de laboratorio, dentro de la asignatura Diseño de Máquinas, donde los alumnos puedan utilizar un software de simulación, se va a buscar en las principales Universidades de España donde se imparte el Grado en Ingeniería Mecánica, las guías docentes [W3-W12] de las diferentes asignaturas equivalentes a Diseño de Máquinas y así poder tener una referencia sobre qué Universidades cuentan con una carga práctica de simulación en esta asignatura.

Las universidades que se han consultado son las siguientes: Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Universidad Politécnica del País Vasco (UP.Vasco), Universidad de Cantabria (UC), Universidad de Málaga (UMA), Universidad de Zaragoza (UZA) y Universidad de Sevilla (USE).

En las figuras 1.1 y 1.2 se pueden ver las horas de laboratorio con algún software de simulación que las diferentes universidades incluyen dentro de sus guías docentes.



Figura 1.1: Horas de laboratorio.

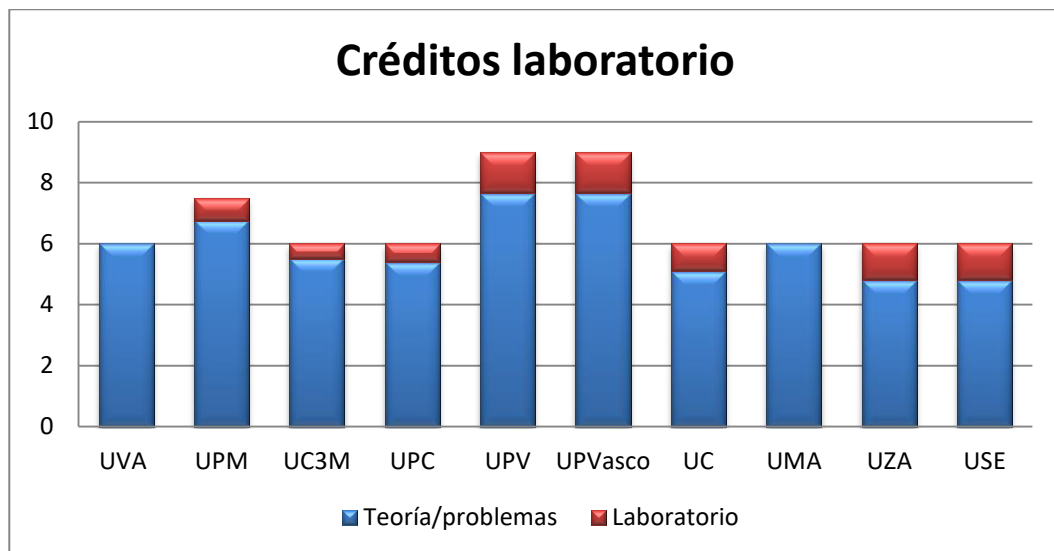


Figura 1.2: Créditos de laboratorio.

Como se puede ver en las anteriores figuras la mayoría de las universidades españolas incluyen prácticas de simulación dentro de las asignaturas equivalentes a Diseño de Máquinas. En la mayoría de las guías docentes no se especifica con que programas se realizan las prácticas. Sin embargo, hay un par de universidades, como la de Zaragoza y la de Cantabria, donde se especifica que se trabaja con SolidWorks y con Cosmos respectivamente.

David Martín Rodríguez

También se han consultado algunas universidades europeas como: “University of Bradford” y “Universita degli studi di Udine”, donde se han consultado las guías docentes de las asignatura equivalentes a Diseño de Máquinas [W13-W14]. En estas guías docentes se ha comprobado, que en Europa también se incluyen horas de simulación dentro de estas asignaturas.

A la vista de estos datos, sería muy interesante para la Universidad de Valladolid incluir este tipo de prácticas de simulación dentro de la asignatura de Diseño de Máquinas.

## 1.1: OBJETIVOS

Este trabajo fin de grado se encuentra dentro de un proyecto docente que busca aportar una cierta carga práctica, a la asignatura de Diseño de Máquinas del Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Valladolid. Se busca que esta carga práctica sirva de apoyo a los problemas de aula y así facilite, a los alumnos, el entendimiento de la asignatura.

Los diferentes objetivos que se han perseguido en este trabajo, se pueden clasificar en un objetivo principal y en unos objetivos secundarios.

### *1.1.1: Objetivo principal*

Comparar diferentes programas de simulación, para problemas de análisis estático, y escoger uno de estos para su uso en la asignatura.

### *1.1.2: Objetivos secundarios*

- Buscar cómo se imparte la asignatura de Diseño de Máquinas en otras universidades y ver si cuentan con una carga práctica.
- Buscar diferentes programas que permitan llevar a cabo la simulación de problemas estáticos.
- Estudiar el funcionamiento de estos programas y simular en ellos los problemas de clase.

## 1.2: PROGRAMAS UTILIZADOS

Este trabajo es una continuación del trabajo realizado el año pasado “Análisis del uso de CATIA V5 para simular problemas de comportamiento mecánico” [1].

Uno de los programas que se van a utilizar es Catia V5. Los motivos por los que se ha elegido este programa, es que es muy usado a nivel industrial y, además, es el programa que se enseña a manejar en la asignatura “Diseño Asistido por



Ordenador”, también presente en el tercer curso del Grado de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Valladolid.

Otro de los programas que se va a utilizar es SolidWorks 2017. Se trata de otro programa comercial que, al igual que Catia, pertenece a Dassault Systemes. El motivo por el que se ha elegido este programa es que también es muy usado a nivel industrial, sobre todo en el diseño de maquinaria.

Por último, el otro programa que se va a utilizar es FreeCAD 0.18. Este ha sido elegido ya que también se querían ver los resultados que proporciona algún programa de libre distribución.

### 1.3: CONOCIMIENTOS PREVIOS

En este trabajo se considera que el usuario sabe manejar el módulo “Part Design” de Catia para crear piezas en 3D. En los otros dos programas la forma de diseñar piezas en 3D es muy similar a las de Catia, por lo que se considera que el usuario también puede crear geometrías sencillas en estos programas.

Otro conocimiento necesario para realizar este trabajo, es conocer la teoría sobre el análisis estático que se imparte en la asignatura de Diseño de Máquinas. Aunque tener conocimientos sobre los análisis estáticos es un conocimiento previo y necesario para realizar este trabajo, en el capítulo 2 se ha hecho un breve resumen sobre este tipo de análisis.

### 1.4: DIFICULTADES

La gran dificultad que se ha tenido para realizar este trabajo, ha sido buscar y encontrar información sobre cómo hacer los diferentes análisis en los diferentes programas que se han utilizado.

En Catia la dificultad no ha sido mucha, ya que se ha contado con la ayuda del trabajo mencionado anteriormente [1]. Sin embargo, con SolidWorks y FreeCAD se ha tenido que recurrir a tutoriales en YouTube y a foros de ayuda para poder obtener información sobre cómo llevar a cabo las simulaciones.

### 1.5: ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Este trabajo está dividido en cinco capítulos:

- Capítulo 1: se trata de un capítulo de introducción donde se muestra la carga práctica con la que cuentan asignaturas equivalentes a Diseño de Máquinas en otras Universidades. En este capítulo también se muestran los objetivos que persigue este trabajo.



David Martín Rodríguez

-Capítulo 2: se trata de capítulo donde se hace una breve descripción teórica sobre el diseño estático de piezas.

-Capítulo 3: este capítulo empieza describiendo de forma breve el Método de Elementos Finitos y continua haciendo una descripción de los tres programas que se van a usar para la simulación de diferentes ejemplos. Se centra en hacer una descripción del módulo de simulación de cada programa, donde se explican las diferentes herramientas que se van a utilizar para realizar los siguientes análisis.

-Capítulo 4: en este capítulo se simularán unos problemas de la asignatura, con los tres programas y se compararán los resultados que se obtienen con cada programa y los que se obtienen al realizar el problema analíticamente.

-Capítulo 5: en este capítulo se hace una comparativa entre los tres programas utilizados y se analizan las conclusiones extraídas del trabajo. Además, se muestran unas líneas futuras para continuar con este proyecto docente.



## CAPÍTULO 2: DISEÑO ESTÁTICO

Cuando se estudia el comportamiento mecánico de diferentes elementos se tiene como objetivo detectar cuándo se producirá el fallo para así poder adelantarnos a él.

Se define fallo como cualquier comportamiento que vuelve inadecuado la función para la que el elemento fue diseñado. [3]

Según el tipo de material con el que se está trabajando, este fallo se puede dar en forma de deformación plástica, que está asociada a materiales dúctiles o fractura, que es más propensa en materiales frágiles.

Para poder conocer si se está trabajando con un material dúctil o frágil, se realizan ensayos a tracción donde se puede observar la deformación del material en función del esfuerzo aplicado.

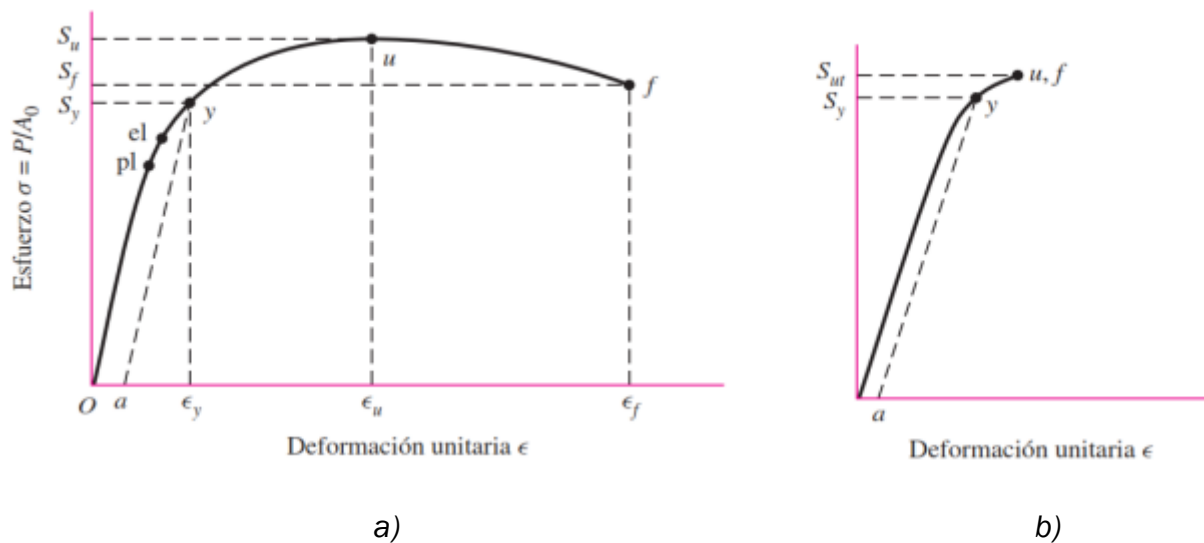


Figura 2.1: Diagrama esfuerzo-deformación material: a) dúctil, b) frágil - [4].

Como se puede observar en la figura 2.1, los materiales dúctiles aceptan una gran deformación antes de llegar al punto de rotura. Sin embargo, los materiales frágiles sufren muy poca deformación antes de la rotura.

Por lo general se considera que un material es frágil o dúctil en función de la deformación que admita: si la deformación unitaria es mayor o igual que 0.05 se considera material dúctil y si menor que 0.05 se considera material frágil.

## 2.1: CÁLCULO DE TENSIONES [3]

En este apartado se muestran una serie de fórmulas que permiten calcular las tensiones máximas para geometrías cilíndricas cuando sobre estas actúan ciertas acciones exteriores como las que se muestran en la figura 2.2.

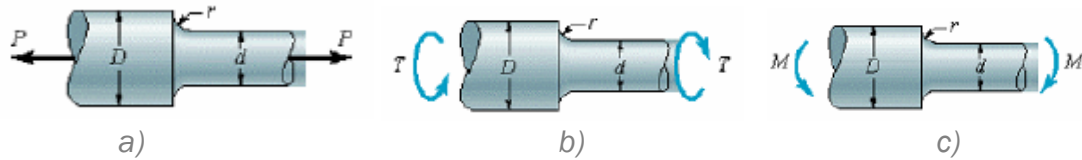


Figura 2.2: Tipos de carga: a) Tracción, b) Torsión, c) Flexión - [3].

Tracción: 
$$\sigma_{max} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2.1)$$

Torsión: 
$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2.2)$$

Flexión: 
$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (2.3) \quad \tau_{max} = \frac{4V}{3A} \quad (2.4)$$

## 2.2: TENSIONES PRINCIPALES [3]

Una vez se tienen calculadas las tensiones máximas que actúan sobre la pieza que se desea analizar, se deben calcular las tensiones principales. Para ello se utiliza el círculo de Mohr que representa un tensor simétrico que permite calcular los momentos de inercia, las tensiones y las deformaciones.

Las tensiones se pueden dar en las tres dimensiones, lo que dará un círculo de Mohr con tres tensiones principales ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ).

En la asignatura de Diseño de Máquinas se suele trabajar con el caso biaxial por lo que solo obtendremos dos tensiones principales ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) como se ve en la figura 2.3.

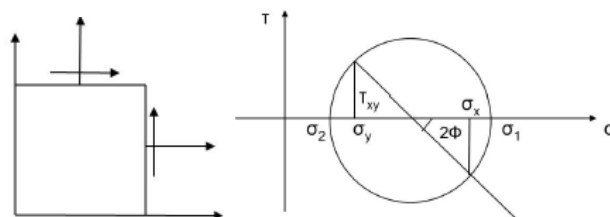


Figura 2.3: Círculo de Mohr biaxial.

David Martín Rodríguez

Para calcular las tensiones principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.5)$$

### 2.3: CONCENTRACIÓN DE TENSIONES [3]

Existen secciones dentro de una pieza que son más propensas a que se produzca el fallo, ya que en ellas se produce una concentración de tensiones debido a la existencia de una discontinuidad, originadas por diferentes motivos. Estas discontinuidades pueden ser un orificio, un cambio brusco de sección, una ranura...

Este efecto se tiene en cuenta mediante el Factor geométrico de concentración de tensiones  $K_t$ . Luego en las zonas descritas anteriormente la tensión máxima será la siguiente:

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_0 \quad (2.6) \quad \sigma_0: \text{Tensión nominal media}$$

Para el cálculo de  $K_t$  se utilizan unas series de gráficas que se muestran en la figura 2.4 y que han sido obtenidas de forma experimental.

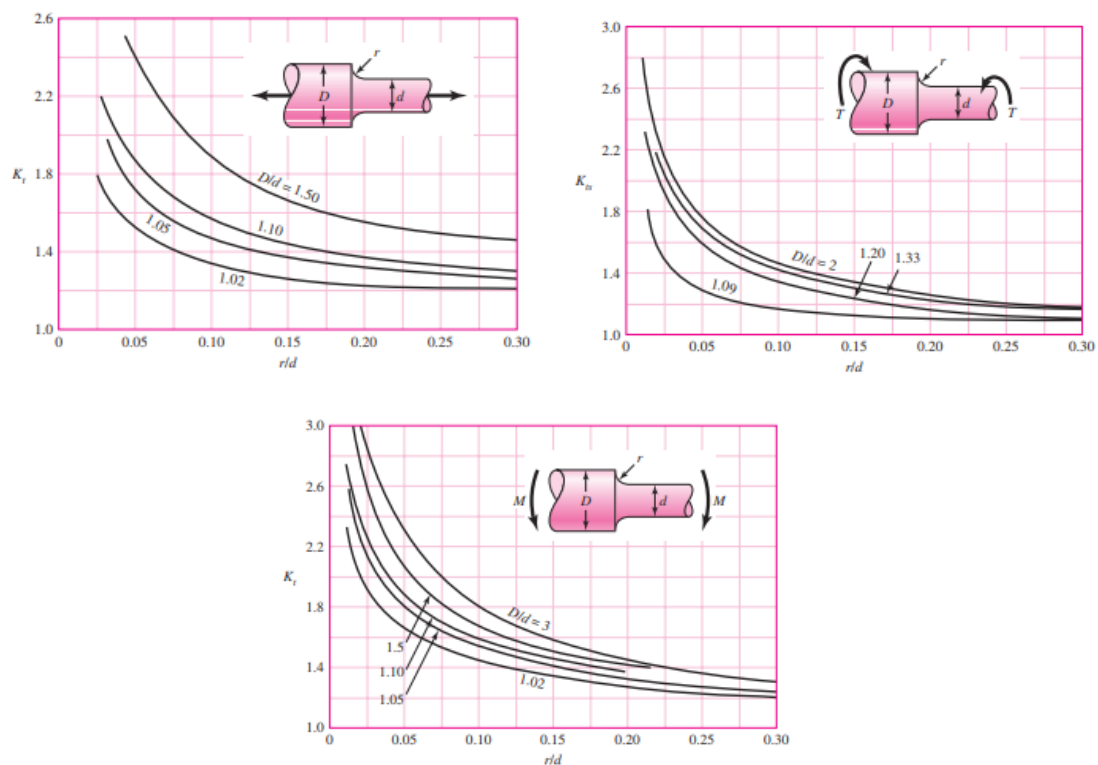


Figura 2.4: Gráficas de concentración de tensiones.

## 2.4: TEORÍAS DE FALLO

No existe una sola teoría de fallo para un caso general de las propiedades del material y el estado de esfuerzos, en su lugar existen varias teorías. Como se ha visto anteriormente los materiales se pueden clasificar en dos tipos: materiales dúctiles y materiales frágiles, por lo que existen diferentes teorías de fallo para cada tipo de material.

### 2.4.1: Teoría del Esfuerzo Normal máximo (ENM) [3]

El fallo se produce cuando la tensión principal máxima  $\sigma_{\max}$  iguala al límite de fluencia  $S_Y$  del material. Esta teoría se usa para materiales dúctiles.

$$\text{CRITERIO DE FALLO:} \quad \sigma_1 \leq S_t \quad \sigma_2 \leq -S_c \quad (2.7)$$

$S_t$ : Resistencia a la tracción.

$S_c$ : Resistencia a la compresión.

En resumen, este criterio de fallo dice que cuando la primera tensión principal supera la resistencia a tracción del material o cuando la segunda tensión principal supera la resistencia a compresión del material se producirá el fallo de este.

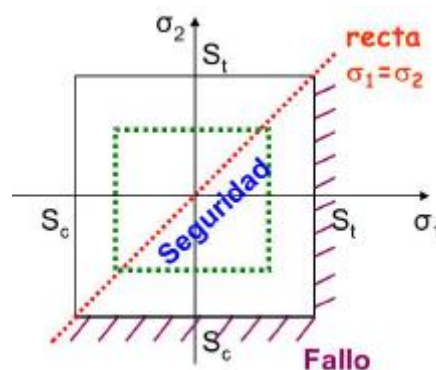


Figura 2.5: Teoría de esfuerzo normal máximo bidimensional [3].

En figura 2.5 se puede ver la teoría de esfuerzo normal máximo en dos dimensiones. Se puede introducir un límite de seguridad para así poder situar al material dentro de la zona verde del cuadro  $S_{yt}/n$ .

Un aspecto importante de este criterio es que no se puede aplicar cuando  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen diferente signo ya que el criterio falla por causas desconocidas.

### 2.4.2: Teoría del Esfuerzo Cortante máximo [4]

Esta teoría se aplica a materiales dúctiles y dice que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante

David Martín Rodríguez

máximo en una pieza de ensayo a tensión del mismo material cuando esa pieza comienza a fluir. También se conoce como teoría de Tresca.

CRITERIO DE FALLO: 
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{S_{yt}}{2} \quad (2.8)$$

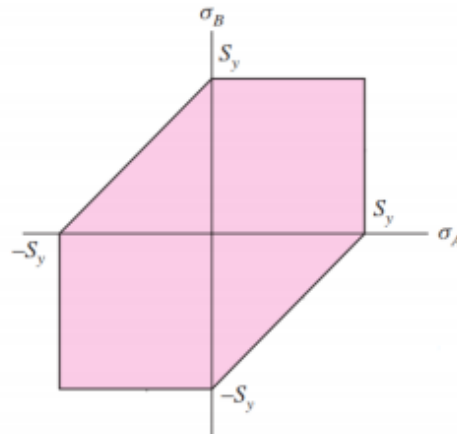


Figura 2.4: Teoría de esfuerzo cortante máximo bidimensional [4].



Figura 2.6: Comparación entre ENM y Tresca.

En la figura 2.5 se muestra esta teoría en el caso bidimensional y como se puede ver en la figura 2.6 es un criterio más restrictivo que el anterior, ya que el área de seguridad es menor, el área del primer y tercer cuadrante es el mismo pero en el segundo y cuarto cuadrante se tiene un área menor. También se puede aplicar un factor de seguridad.

RESISTENCIA DE FLUENCIA A CORTADURA: 
$$S_{sy} = 0.5S_{yt} \quad (2.9)$$

### 2.4.3: Teoría de la Energía de Distorsión [4]

Esta teoría se aplica a materiales dúctiles y dice que el fallo por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la

energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o compresión del mismo material. También se conoce teoría de Von Mises.

Esta teoría tuvo su origen en el hecho de que los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos hidrostáticos presentan una resistencia a la fluencia diferente al ensayo de tensión simple. Esto hizo pensar que en realidad la fluencia no era un fenómeno de tensión o compresión simples, sino que se trataba de un fenómeno que estaba relacionado con la distorsión angular.

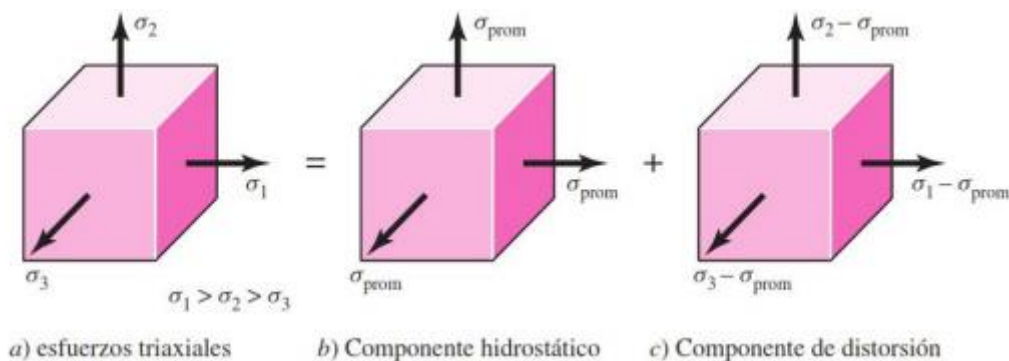


Figura 2.5: Descomposición tensiones principales [4].

En la figura 2.5 se puede ver un volumen unitario sometido a esfuerzos tridimensionales que se descompone en dos estados. En la figura 2.5b) se muestra el estado de tensión hidrostática que experimenta un cambio de volumen puro (sin distorsión angular). En la figura 2.5c) se muestra un elemento sometido a distorsión angular pura (sin cambio de volumen).

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.10)$$

En definitiva la teoría de la distorsión indica que el fallo se produce cuando la energía de distorsión iguala a la energía almacenada en una probeta a tracción para una tensión igual al límite de fluencia  $S_y$ .

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \quad \text{Energía distorsión} \quad (2.11)$$

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} S_{yt}^2 \quad \text{Energía almacenada en la probeta} \quad (2.12)$$

Cuando se igualan las ecuaciones 2.11 y 2.12 se obtiene el esfuerzo de von Mises  $\sigma_{eq}$  y por lo tanto la fluencia ocurrirá cuando este esfuerzo supere el límite de fluencia  $S_y$ .



$$\sigma^{eq} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

Cuando se tiene un esfuerzo plano, la ecuación del esfuerzo de von Mises es la ecuación de una elipse, como muestra la figura 2.6.

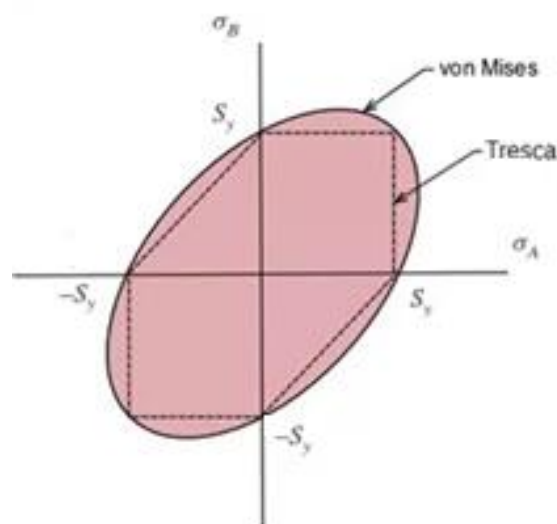


Figura 2.6: Teoría distorsión bidimensional [4].

Como se puede observar en la figura 2.6 este criterio de Von Mises es menos conservador que el criterio de Tresca, el área en el criterio de von Mises es mayor que en el criterio de Tresca.

#### CRITERIO DE FALLO:

$$\sigma^{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right] \leq S_y \quad (2.14)$$

$$\text{CORTADURA PURA: } \sigma_x = \sigma_y = 0; \quad S_{sy} = 0.577S_{yt} \quad (2.15)$$

#### 2.4.4: Teoría de Coulomb-Mohr [4]

Cuando se trata de materiales frágiles, la resistencia a compresión es mucho mayor que la resistencia a tracción ( $S_{uc} > S_{ut}$ ). En la figura 2.7 se puede ver esta teoría donde la resistencia a compresión es mucho mayor. Esta teoría también puede ser aplicada a materiales dúctiles cuando su resistencia a compresión no es igual a su resistencia a tracción.

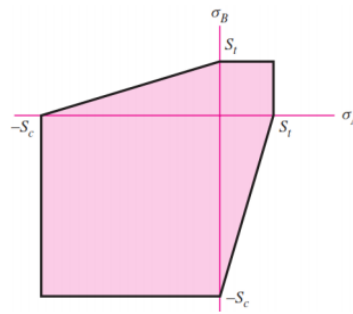


Figura 2.7: Teoría Coulomb-Mohr bidimensional [4].

**CRITERIO DE FALLO:** 
$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 1 \quad (2.16)$$

Existe una modificación de esta teoría que se denomina Coulomb-Mohr modificada donde se propone que la resistencia última a la cortadura coincide con la resistencia última a compresión ( $S_{su} = S_{uc}$ ). Esta teoría se conoce como Teoría Coulomb-Mohr mdificada y se muestra en la figura 2.8.

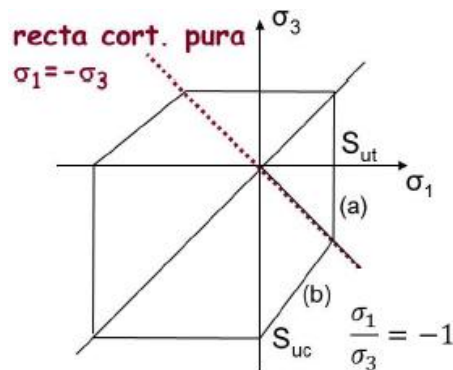


Figura 2.8: Teoría Coulomb-Mohr modificada bidimensional [3].

**CRITERIO DE FALLO:**

a) 
$$\sigma_1 = \frac{S_{ut}}{n} \quad (2.17)$$

b) 
$$\frac{\sigma_1}{\frac{S_{ut} \cdot S_{uc}}{S_{uc} - S_{ut}}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = \frac{1}{n} \quad (2.18)$$

## 2.5: ELECCIÓN DE LA TEORÍA DE FALLO

Cuando se va a realizar un análisis estático a una pieza sometida a diferentes acciones exteriores lo primero que hay que hacer es conocer el material con el que estamos trabajando y calcular las tensiones principales.

David Martín Rodríguez

Una vez conocido el material debemos buscar cuáles son sus resistencias a compresión y a tracción. Si estas dos resistencias son diferentes se estará hablando de un material frágil y se usará la teoría de Coulomb-Mohr para así poder predecir el fallo del material. Si se desea hacer un cálculo no muy conservador con este tipo de materiales, usaremos la teoría de Coulomb-Mohr modificada.

Si las resistencias de tracción y compresión son similares se estará hablando de un material dúctil y se podrán utilizar dos teorías. Si se quieren hacer unos cálculos seguros se utilizará el criterio de Tresca, si por el contrario se quieren hacer unos cálculos un poco más arriesgados se utilizará el criterio Von Mises.

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado se van a simular unos ejemplos donde siempre se trabajara con materiales dúctiles y se aplicará el criterio de Von Mises ya que es el más utilizado y el que proporciona los diferentes software de simulación que serán utilizados en este Trabajo.



## **CAPÍTULO 3: ELEMENTOS FINITOS. SOFTWARES DE SIMULACIÓN**

### 3.1: MÉTODO ELEMENTOS FINITOS [4]

Los componentes mecánicos en forma de vigas, barras simples, etc., se pueden analizar con bastante facilidad mediante los métodos descritos anteriormente. Sin embargo en la realidad se tienen problemas y elementos mecánicos más complejos por lo que se hace necesario el uso de un software de diseño por ordenador (CAD) donde se utilizan métodos de simulación. El método más usado es el FEM (método de elementos finitos).

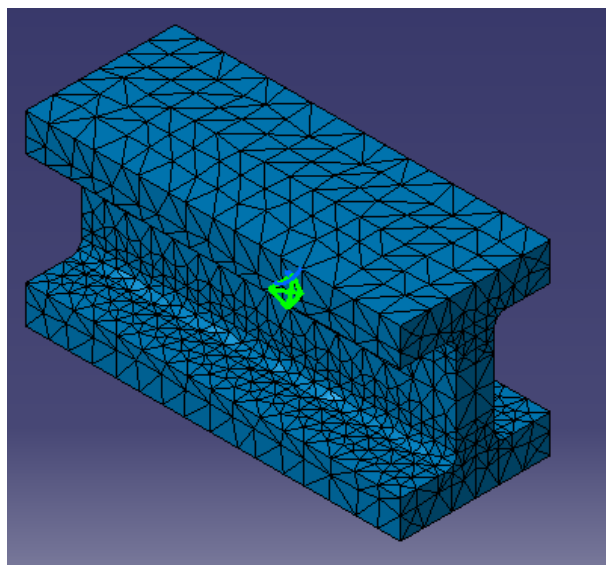


Figura 3.1: Geometría sencilla para FEM en Catia.

El método consiste en dividir un sólido, sometido a unas cargas y restricciones, en pequeñas partes denominadas elementos que se encuentran conectados entre sí mediante una serie de nodos. Al conjunto de elementos y nodos se lo denomina malla. En la figura 3.1 se puede ver una geometría sencilla con su malla lista para el análisis.

El método de Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas que resulta de gran importancia dada su utilidad práctica. Es una herramienta muy utilizada dentro de la ingeniería para la resolución de problemas, pero hay que tener en cuenta que al hacer la simulación no obtendremos una solución “exacta”, por lo que tendrá que someterse a juicio.

En un principio se utilizó para el cálculo estructural pero dado su potencial el método se amplió a la realización de análisis térmicos, dinámicos,

electromagnéticos y de flujos. En este trabajo se va a usar este método para el análisis estático de piezas.

Esta división del sólido hace que se puedan resolver de forma aproximada las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico de cada elemento y así poder obtener una solución general para el problema. Como ya se ha comentado, la solución será una aproximación que será mejor cuanto más precisa sea la malla, lo que se traduce en tener un mayor número de elementos de tamaño más pequeño. En la figura 3.2 se puede ver una geometría más compleja donde se hace necesario usar unos elementos de menor tamaño para así obtener una buena solución.

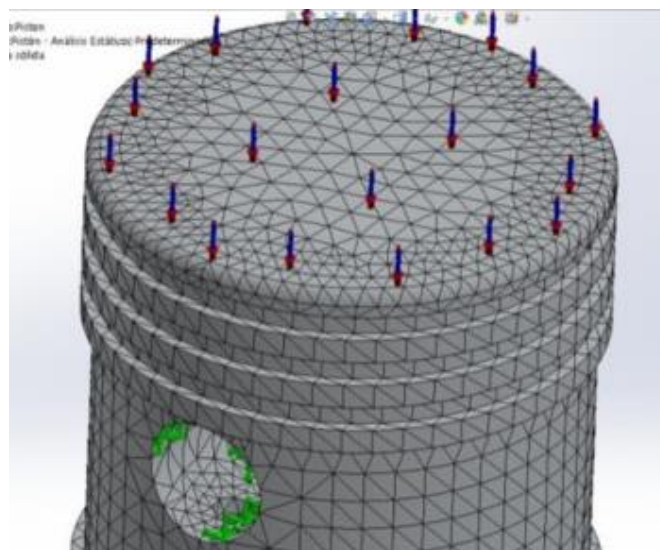


Figura 3.2: Geometría compleja para FEM en SolidWorks.

En este trabajo se trabajará con tres software diferentes que cuentan con un módulo FEM. Estos programas serán: Catia, SolidWorks y FreeCAD. A continuación se mostrará una descripción de estos softwares donde se explicarán las diferentes herramientas con las que cuentan.

### 3.2: CATIA

Catia V5 (Aplicación Interactiva 3D asistida por Ordenador) es un programa de ordenador muy usado a nivel industrial. Se utiliza especialmente en el sector aeronáutico, automoción, ect., debido a que cuenta con un módulo muy potente para la generación de superficies.

Catia tiene incorporados un gran número de módulos, que se pueden ver en la figura 3.3 y que permiten llevar a cabo el diseño, el análisis y la fabricación de los diferentes productos elegidos. Todos estos módulos hacen que Catia sea un

David Martín Rodríguez

programa muy interesante desde el punto de vista industrial a la vez que un programa complejo que requiere una cierta cualificación para su manejo.

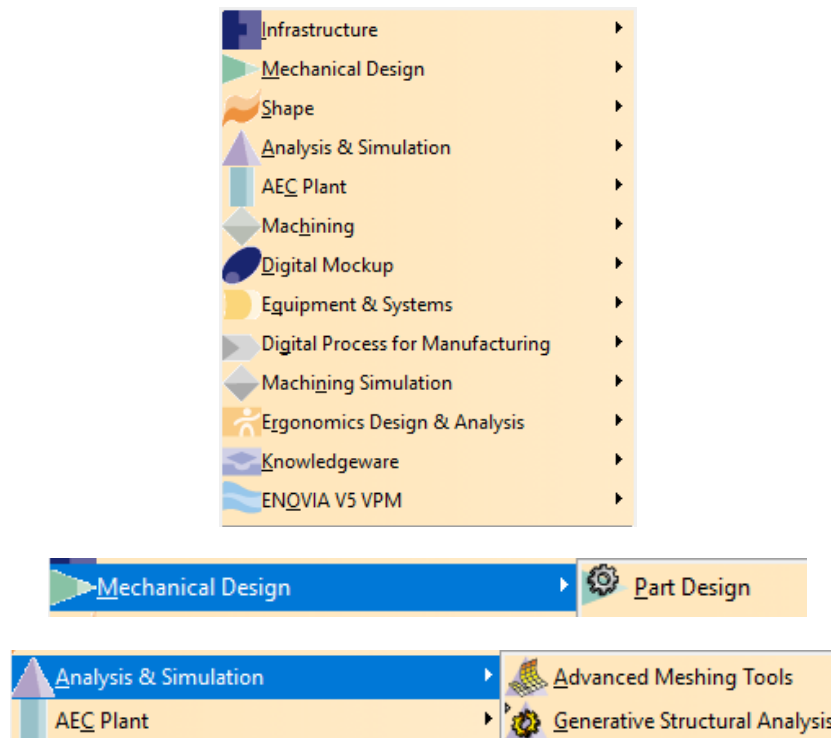


Figura 3.3: Módulos de Catia V5 de Catia.

En este Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis estático de piezas, por lo que se necesitará usar dos módulos de Catia para realizar dicho análisis: el módulo “Part” para el diseño de la pieza y el módulo “Generative Structural Analysis” para el análisis de dicha pieza.

Como este programa ya ha sido utilizado en el Trabajo Fin de Grado “Análisis del uso de Catia V5 para simular problemas de comportamiento mecánico” [1], se hará una breve descripción de los dos módulos y de los comandos más importantes utilizados.

### 3.2.1: Part Design

Este módulo se encuentra dentro del módulo “Mechanical Design”.

Una vez dentro del módulo “Part Design”, se pueden crear diferentes piezas en 3D a partir de perfiles en 2D gracias a una serie de herramientas tales como extrusiones, agujeros, revoluciones.... En la figura 3.4 se puede ver cómo es el entorno de trabajo de “Part Design”.

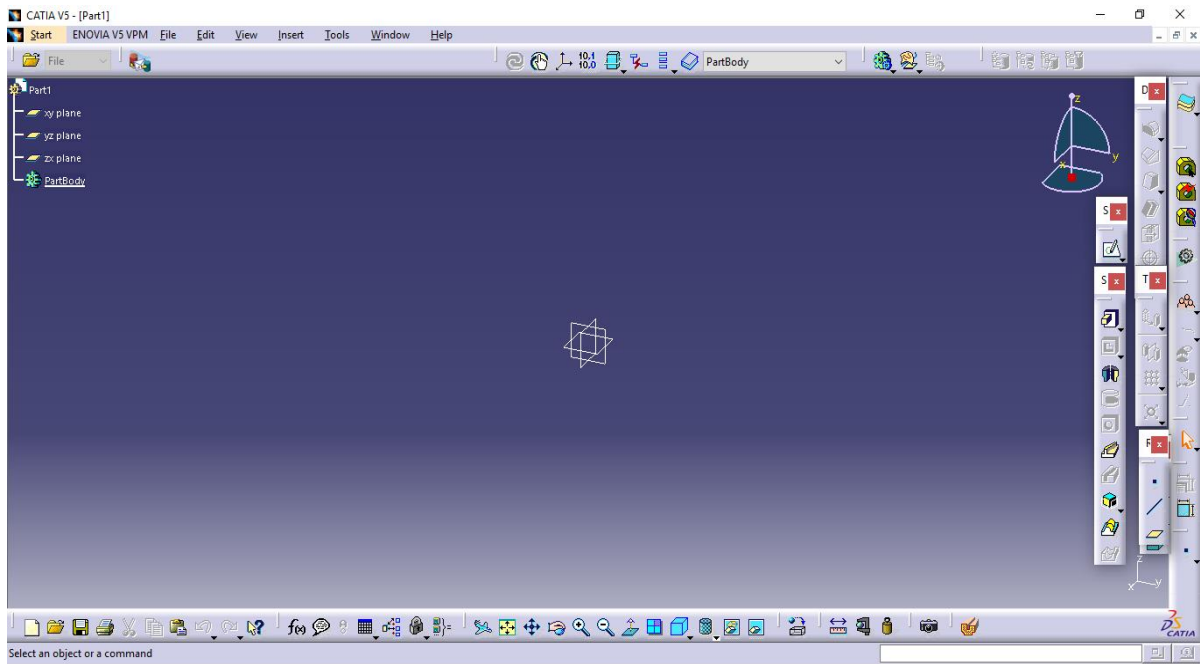


Figura 3.4: Entorno Part Design de Catia.

Las herramientas con las que cuenta este módulo no se explicarán en este trabajo ya que el Grado en Ingeniería Mecánica cuenta con una asignatura, Diseño Asistido por Ordenador, donde se explica este y otros módulos de Catia, como el módulo “Drawing” y el módulo “Product”.

### 3.2.2: Generative Structural Analysis

Este módulo se encuentra dentro del módulo “Analysis & Simulation”.

Al entrar en este módulo lo primero que se pide es qué tipo de análisis se quiere hacer. En este caso se tratará de un “Static Analysis” (Análisis estático) tal y como se puede ver en la figura 3.5.



Figura 3.5: Tipo de análisis en Catia.



David Martín Rodríguez

Este módulo permite realizar un estudio de tensiones y desplazamientos que son consecuencia de unas cargas estáticas aplicadas sobre la pieza en la que se está trabajando. En la figura 3.6 se muestra el entorno de trabajo de este módulo. Como se ha mencionado anteriormente, para llevar a cabo este análisis se utiliza el Método de Elementos Finitos.

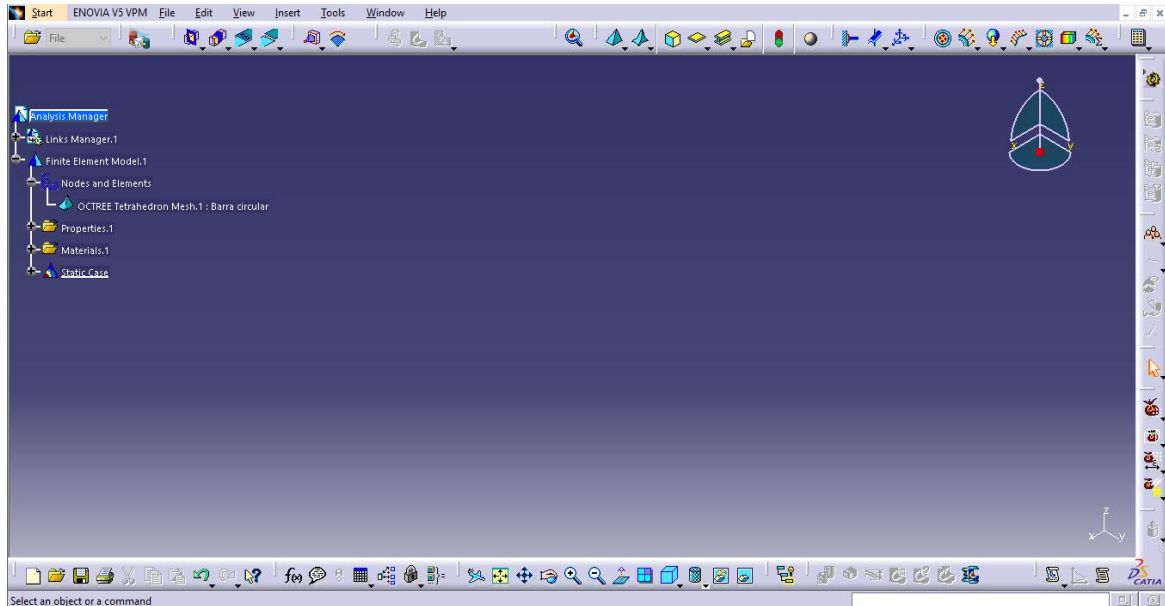


Figura 3.6: Entorno Generative Structural Analysis de Catia.

Al igual que todos los módulos de Catia, cuenta con un árbol de operaciones donde aparece la pieza sobre la que se está trabajando, el material, las restricciones que se están utilizando, las cargas que se aplican y la malla que se utilizará para realizar el cálculo. Este árbol se puede ver en la figura 3.7 y desde aquí se pueden modificar todas estas variables para así poder modificar el análisis.

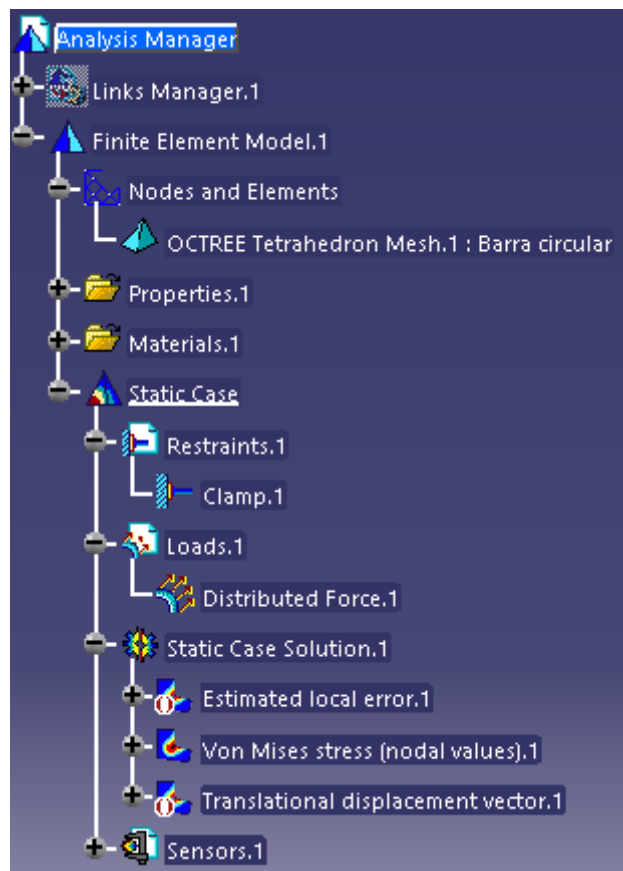


Figura 3.7: Árbol de operaciones de Catia.

Para realizar el análisis estático en Catia hay que seguir unos determinados pasos:

- Asignar material:** este paso debe realizarse en el “Part Desing”, antes de cambiar de módulo de trabajo.
- Fijar las restricciones.**
- Fijar las cargas.**
- Elegir el mallado.**
- Ejecutar.**

A continuación se va a hacer una breve descripción de las herramientas del módulo “Generative Structural Analysis” que se van a usar en los análisis realizados en este trabajo.

#### a) Restrains

Esta barra de herramientas (Figura 3.8) permite fijar las diferentes restricciones sobre la pieza que se va a analizar.

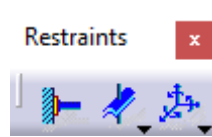



Figura 3.8: Barra de herramientas Restraints en Catia.

**-Clamp**  : con esta herramienta se representa un empotramiento fijo, es decir, se impide el desplazamiento y el giro en las tres direcciones del espacio por lo que el cuerpo queda fijo. En la figura 3.9 se puede ver como Catia representa un empotramiento.

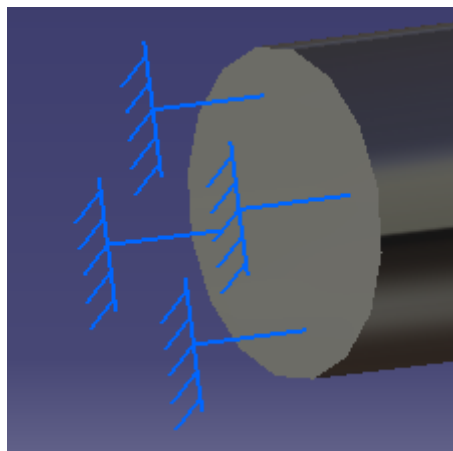



Figura 3.9: Aplicación de un empotramiento en Catia.

**-Defined Restraints**  : permite restringir los movimientos y giros de forma manual hasta un máximo de 3 cada uno. Para ello aparece la ventana de la figura 3.10 donde se seleccionan los desplazamientos y los giros que se desean impedir. En la figura 3.11 se ve cómo Catia representa las restricciones que se han puesto en la anterior figura.

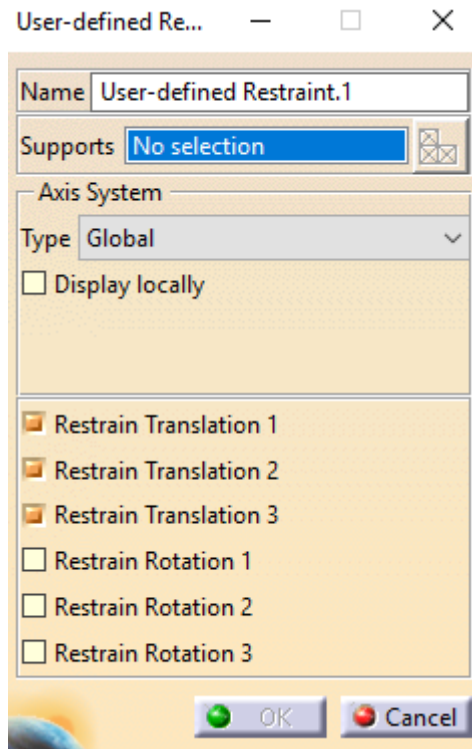


Figura 3.10: Restringir desplazamientos y giros en Catia.

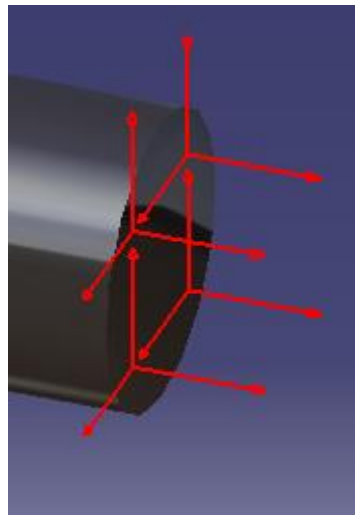



Figura 3.11: Ejemplo desplazamientos restringidos en Catia.

b) Loads

Esta barra de herramientas (Figura 3.12) permite fijar las diferentes acciones que actuarán sobre la pieza que se va a analizar.



Figura 3.12: Barra de herramientas Loads en Catia.

**-Distributed Force**  : con esta herramienta se pueden aplicar fuerzas distribuidas sobre la cara de una pieza. En este trabajo se usarán fuerzas puntuales, para ello Catia cuenta con la opción “Handler” donde se indica el punto donde se desea colocar la fuerza. Este punto se debe dibujar anteriormente en el “Part Design”. En la figura 3.13 se ve la ventana donde se configura la fuerza y en la figura 3.14 se puede ver un ejemplo de cómo Catia representa una fuerza puntual.

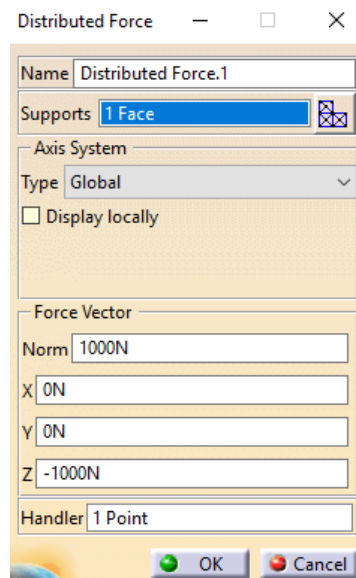


Figura 3.13: Aplicación de una fuerza en Catia.

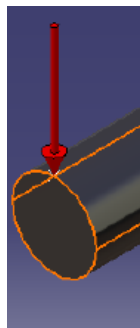


Figura 3.14: Ejemplo fuerza puntual en Catia.



**-Moment** : con esta herramienta podemos aplicar momentos sobre la pieza que se va a analizar. La forma de aplicar un momento es igual que la forma de aplicar una fuerza tal y como se puede ver en la figura 3.15. En la figura 3.16 se puede ver un ejemplo de cómo Catia representa un momento.

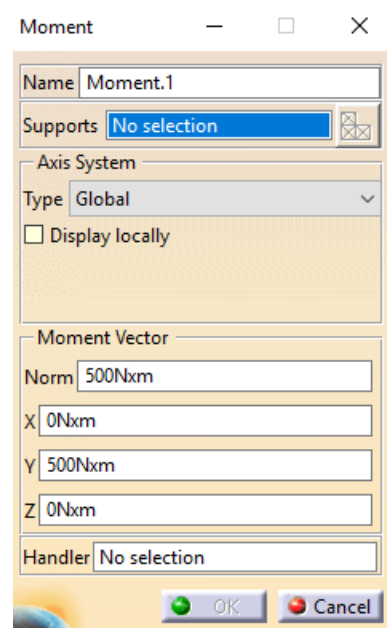


Figura 3.15: Aplicación de un momento en Catia.

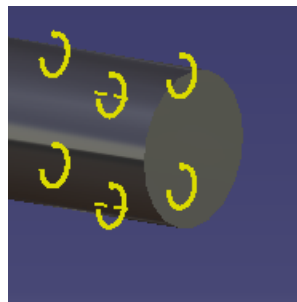



Figura 3.16: Ejemplo momento en Catia.

### c) Virtual Parts

Estas herramientas (Figura 3.17) se utilizan para representar la acción de un elemento que no ha sido diseñado en el “Part Desing”. Gracias a esta herramienta podemos transmitir acciones a distancias o englobar todo el comportamiento de una superficie en un único punto.



Figura 3.17: Barra de herramientas Virtual Parts en Catia.

**-Smooth Virtual Part**  : esta herramienta conecta un punto de apoyo con la geometría de diseño mediante una barra imaginaria y se comporta como un sólido rígido, transmitiendo al cuerpo las restricciones y cargas que actúen sobre ese punto.

En este trabajo esta herramienta se utiliza para poder simular en apoyo de un rodamiento sobre un eje, se verá en el ejemplo 2 (Eje Rotativo).

#### d) Octree Tetrahedron Mesh

Esta opción se encuentra en el árbol de operaciones, como se ve en la figura 3.18, y sirve para poder definir la malla que se va a utilizar para el estudio que se va a realizar.



Figura 3.18: Opción Octree Tetrahedron Mesh en Catia.

Dentro de esta opción se puede elegir el tipo de malla y el tamaño de los elementos de dicha malla. En la figura 3.19 se muestra cómo se hace la configuración de la malla.

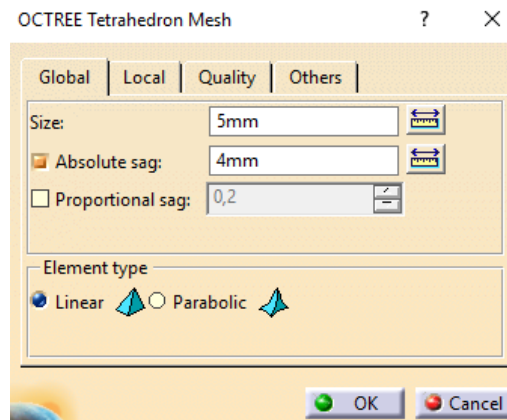


Figura 3.19: Elección de la malla en Catia.

**-Malla Lineal:** se aplica cuando la evolución de los esfuerzos aplicados es lineal. Este tipo de malla no tiene en cuenta el factor de concentración de tensiones.

**-Malla Parabólica:** se aplica cuando la evolución de los esfuerzos aplicados no es lineal. En este tipo de malla sí tiene en cuenta la concentración de tensiones.

**-Size:** indica el tamaño medio de los elementos que forman la malla.

**-Sag:** indica la desviación de los elementos respecto a la geometría original. Siempre debe ser menor que el “Size”.

Para hacer más preciso un cálculo lo primero que se debe hacer es bajar el tamaño de los elementos. Si se quiere mejorar la precisión en una determinada zona se debe clicar en la opción “Local” que se ve en la figura 3.19 y así hacer un mallado local en una determinada zona.

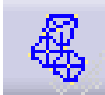
#### e) Image

Esta barra (Figura 3.20) permite visualizar los resultados del análisis una vez ha sido ejecutado.



Figura 3.20: Barra de herramientas Image en Catia.



**-Deformation**  : con esta herramienta puede ver la deformada que sufre la pieza que se está analizando. También permite ver la malla con la que se está trabajando, tal y como muestra la figura 3.21.

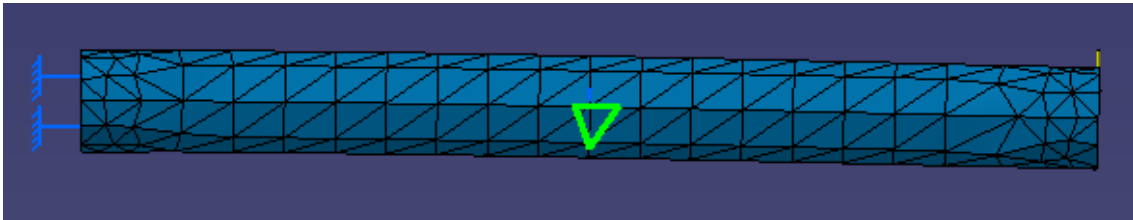



Figura 3.21: Deformada de una viga en voladizo en Catia.

**-Displacement**  : con esta herramienta se pueden ver las deformaciones que se producen en la pieza. Gracias a su escala de colores permite identificar fácilmente la zona de mayor deformación estática. En la figura 3.22 se ve un ejemplo de esta deformación estática.

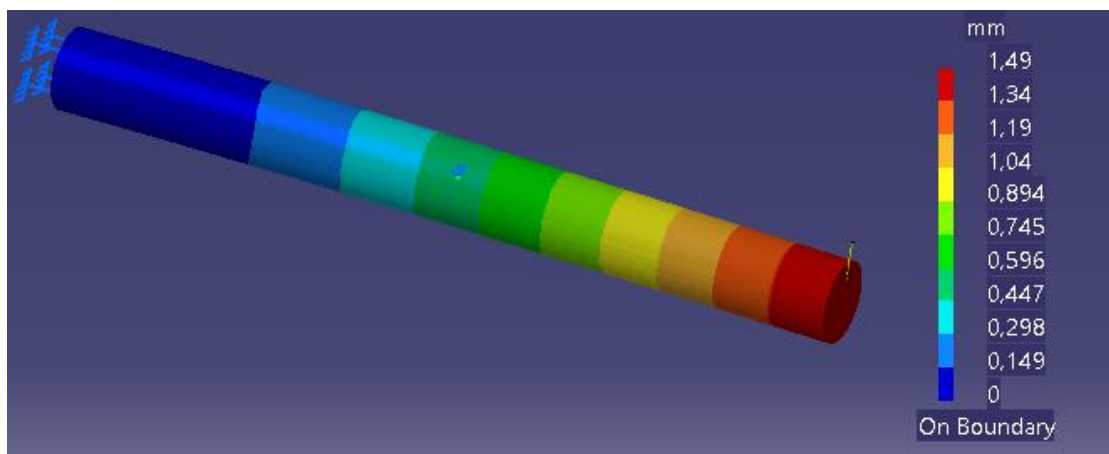



Figura 3.22: Deformación estática de una viga en voladizo en Catia.

**-Principal Stress**  : con esta herramienta se pueden visualizar el valor de las tres tensiones principales. En la figura 3.23 se puede ver la primera tensión principal.

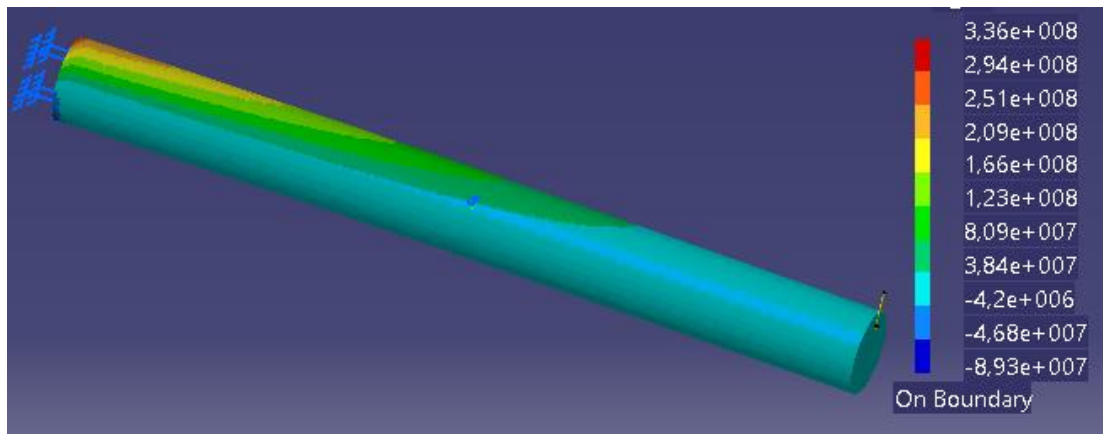


Figura 3.23: Tensión principal en una viga en voladizo en Catia.



**-Von Misses Stress** : con esta herramienta se puede visualizar la tensión de Von Misses. Gracias a su escala de colores, se puede identificar de forma fácil las secciones que serán más propensas a que se produzca el fallo. En la figura 3.24 se puede ver la tensión de Von Misses.

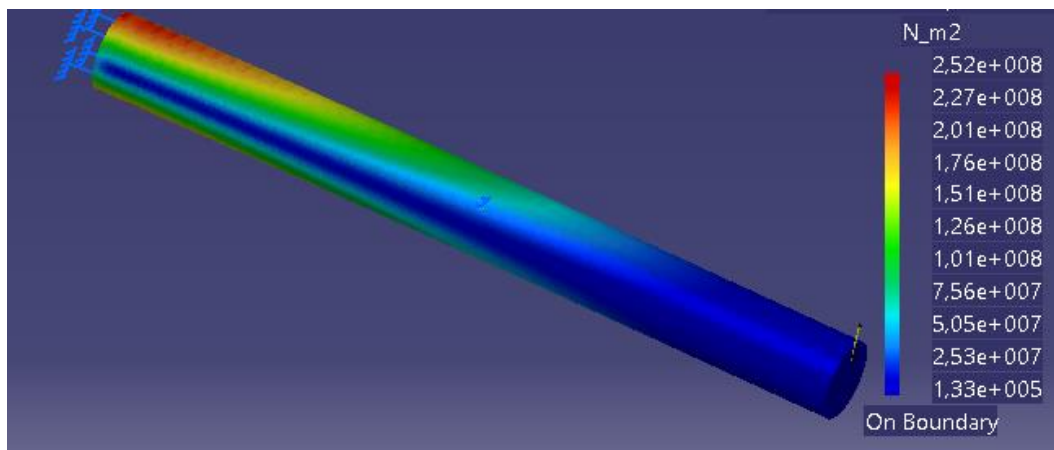


Figura 3.24: Tensión de Von Misses en una viga en voladizo en Catia.



**-Precision** : con esta herramienta se puede ver el error de cálculo que se produce en la pieza. Se puede ver el error por elemento y el error global. En la figura 3.25 se ve un ejemplo de la precisión de los resultados en toda la viga.

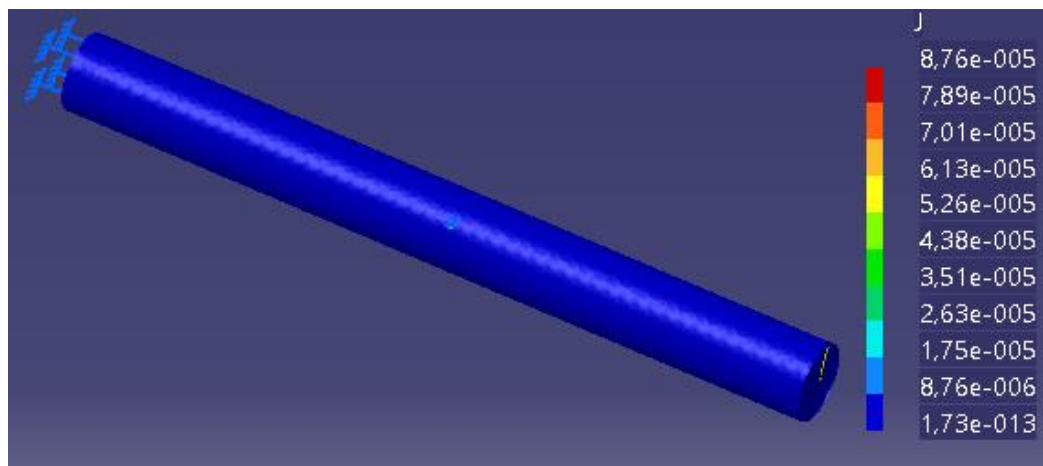


Figura 3.25: Precisión de los cálculos en una viga en voladizo en Catia.

#### f) Analysis Tools

Con esta barra de herramienta (Figura 3.26) se puede obtener más información sobre los resultados que proporcionan las herramientas de la barra “Image”. Se puede ver una animación de cómo evoluciona el resultado, hacer cortes en diferentes secciones, obtener los máximos y los mínimos de los resultados, y obtener información general sobre estos resultados



Figura 3.26: Barra de herramientas Analysis Tools en Catia.

### 3.3: SOLIDWORKS

SolidWorks 2017 es un software de CAD para el modelado mecánico 2D y 3D que permite crear piezas y conjuntos y extraer de ellos información para su producción.

Al igual que Catia es un programa muy interesante desde el punto de vista industrial. Para elegir uno u otro se debe ver en qué entorno se va a trabajar. Como se ha visto anteriormente, el gran potencial de Catia está en la generación de superficies en aeronáutica, automoción... En cambio, SolidWorks dispone de un catálogo de elementos mecánicos, como rodamientos, engranajes, ect., mucho más amplio y tiene un módulo cinemático más potente, por esto SolidWorks es muy usado en el diseño de maquinaria.

Lo primero que se debe hacer al abrir SolidWorks es decidir si se va a trabajar en una pieza, en un ensamblaje o en un plano, como se ve en la figura 3.27.



Figura 3.27: Entornos de trabajo SolidWorks de SolidWorks.

Una vez dentro de estos entornos, en este caso el de “pieza”, que será el que se usará en este trabajo, se pueden elegir una serie de complementos como se verá más adelante.

Como se ha dicho anteriormente, este trabajo consistirá en realizar el análisis estático de piezas, por lo que se explicará de forma breve el entorno “Pieza” y de forma más detallada el complemento “SolidWorks Simulation”.

### 3.3.1 Pieza

Este entorno de trabajo se muestra en la figura 3.28, y al igual que en Catia, permite diseñar diferentes piezas en 3D a partir de diferentes bocetos bidimensionales, sobre los que se realizan diferentes operaciones como extrusiones, agujeros, revoluciones... Debido a que el funcionamiento es similar al de Catia, no se explicará en este trabajo las diferentes herramientas con las que cuenta este entorno.

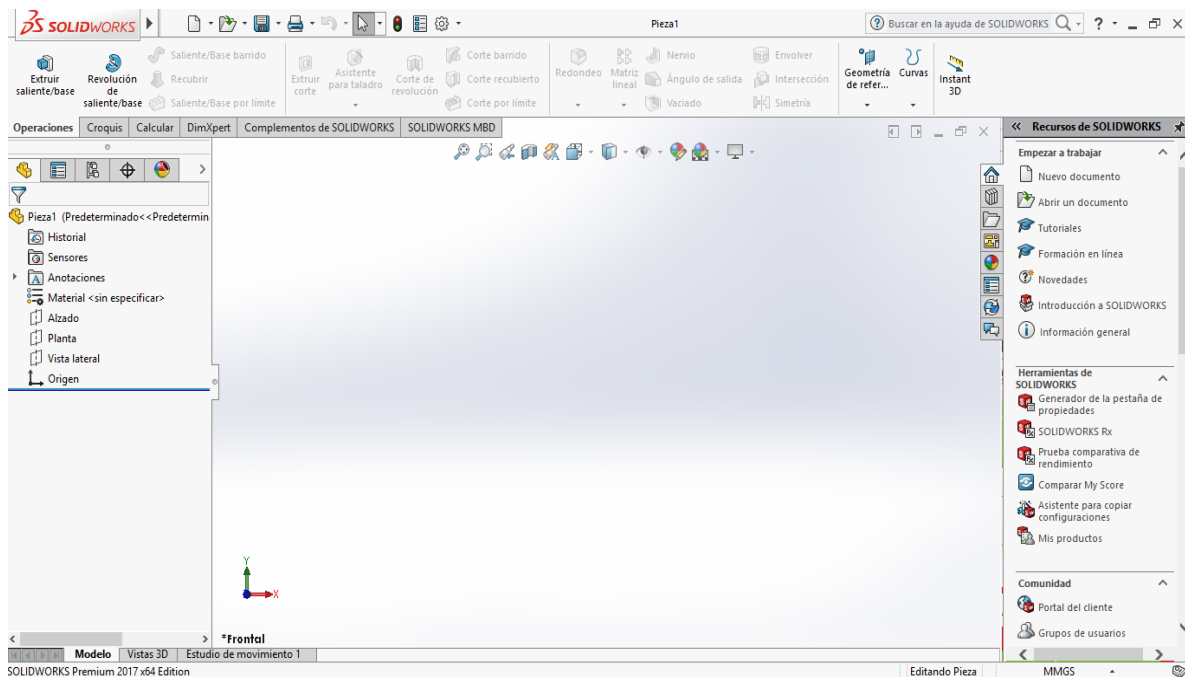


Figura 3.28: Entorno Pieza de SolidWorks.

Como se puede ver en la Figura 3.29 existe un menú denominado “Complementos de SolidWorks”, donde se pueden elegir diferentes módulos de trabajo.

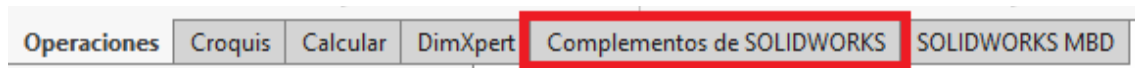


Figura 3.29: Localización de los Complementos de SoldWorks.

En la figura 3.30 se muestran los diferentes complementos que tiene SolidWorks y dentro de estos complementos se encuentra “SolidWorks Simulation”, que será el complemento que permitirá realizar el análisis estático de la pieza.

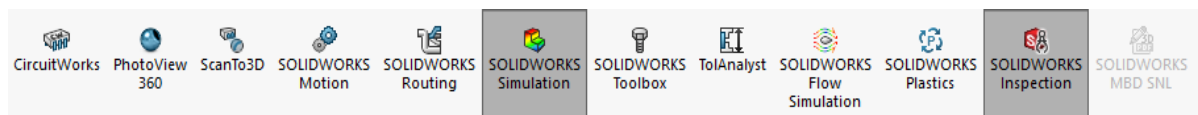


Figura 3.30: Complementos SolidWorks.

### 3.3.2 SolidWorks Simulation

Una vez dentro de este complemento se debe seleccionar la opción “Nuevo estudio” y seleccionar el tipo de estudio que se desea realizar. En el caso de este trabajo será “Análisis estático”, pero SolidWorks cuenta con un gran número de tipos de análisis, como se ve en la figura 3.31.

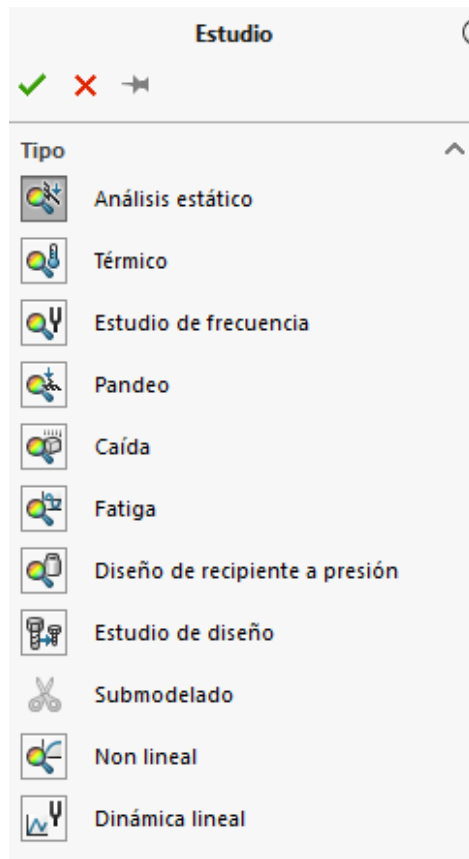


Figura 3.31: Elección del tipo de análisis en SolidWorks.

Al igual que en Catia, este complemento permite hacer un estudio de tensiones y desplazamientos originados por la aplicación de unas cargas estáticas. En la figura 3.32 se muestra cómo es este entorno de trabajo.

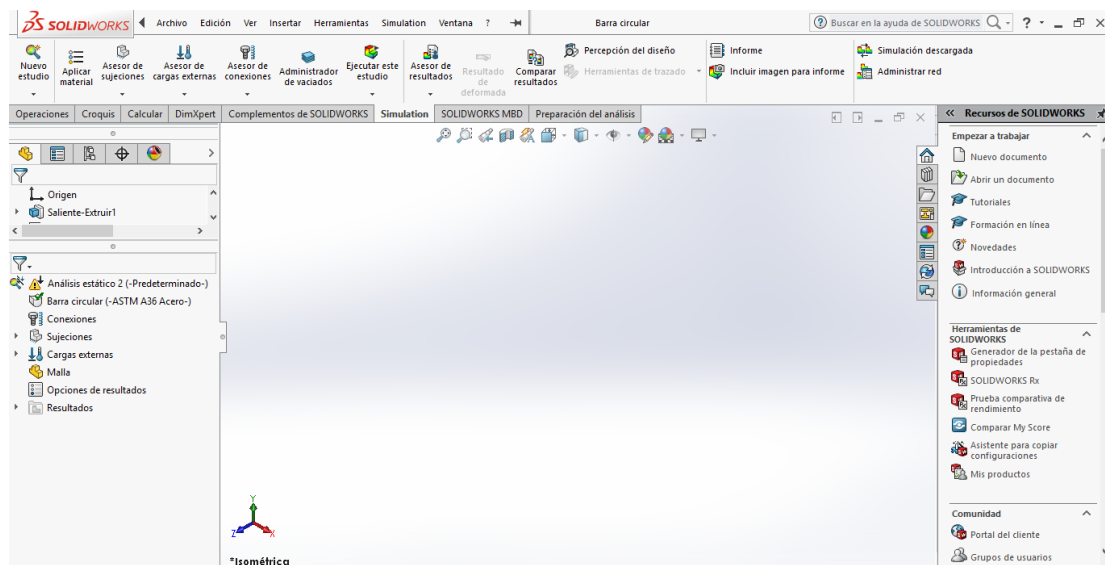


Figura 3.32: Entorno Simulation de SolidWorks.

David Martín Rodríguez

Los pasos a seguir para llevar a cabo el estudio en SolidWorks son los mismos que en Catia:

- Elección de material.
- Fijación de las sujeciones.
- Aplicación de las cargas.
- Elección de la malla.
- Ejecutar.

A continuación se va a hacer una descripción de las herramientas más importantes de este complemento. Para obtener más información sobre las herramientas que se van a describir y sobre otras con las que cuenta este entorno, se puede consultar la página “Ayuda de Solidworks” [W15].

#### a) Aplicar material

SolidWorks ofrece una amplia variedad de materiales para elegir, tal y como se puede ver en la figura 3.33.

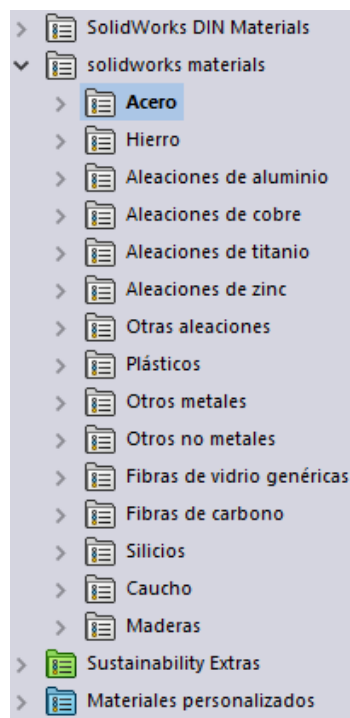


Figura 3.33: Elección de material en SolidWorks.

Cuando se quiere optar por un material con unas características específicas, se debe copiar un material de la lista y pegarlo dentro de “Materiales personalizados”.

A continuación se pueden cambiar las propiedades de ese material a las que se deseen, tal y como se muestra en la figura 3.34.

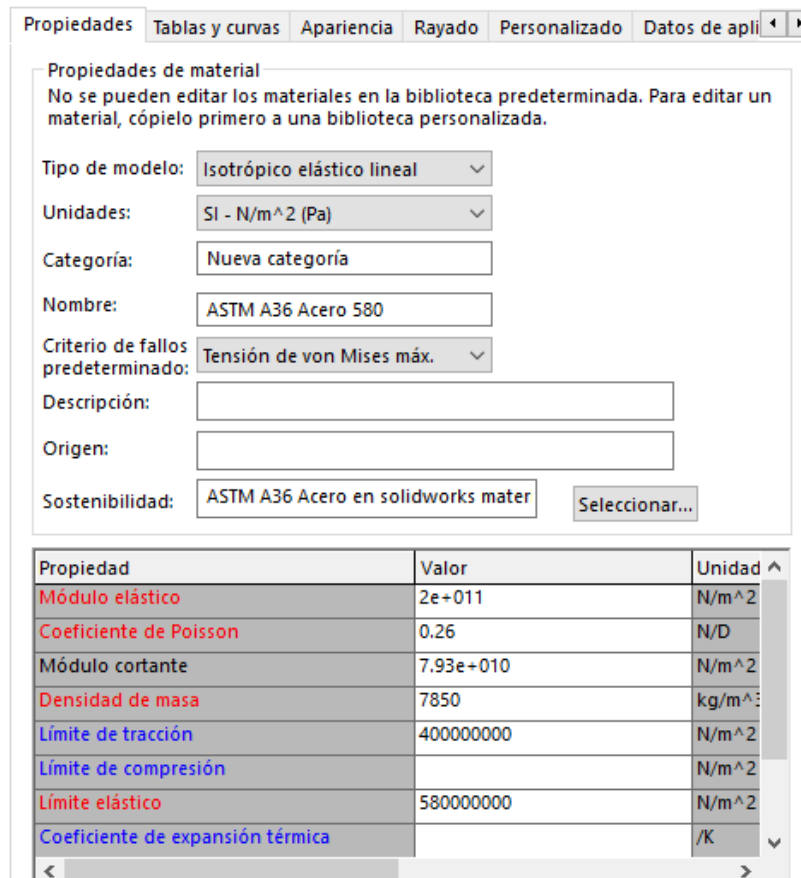


Figura 3.34: Material personalizado en SolidWorks.

### b) Sujeciones

Esta barra de herramientas se muestra en la figura 3.35 y permite fijar las condiciones de contorno que actuarán sobre la pieza que se va a analizar.

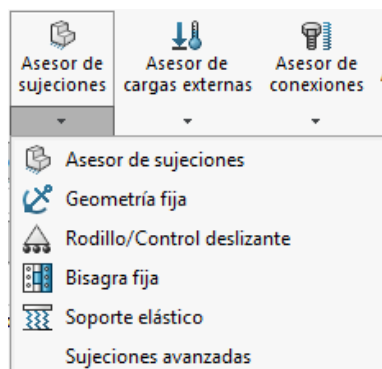


Figura 3.35: Barra de herramienta de Sujeciones en SolidWorks.



David Martín Rodríguez

**-Geometría fija:** esta herramienta permite fijar los tres desplazamientos y los tres giros posibles, es decir, permite colocar un empotramiento. En la figura 3.36 se puede ver cómo configurar esta opción y como se ve el resultado.

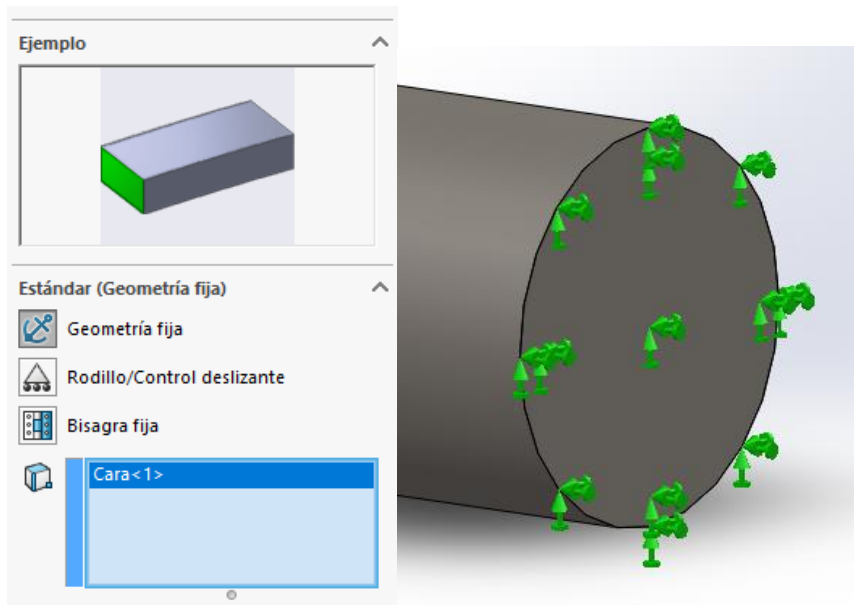


Figura 3.36: Geometría fija en SolidWorks.

**-Rodillo/Control deslizante:** restringe la arista o cara seleccionada de moverse en la dirección normal respecto a dicha cara. En la figura 3.37 se puede ver cómo configurar esta opción.

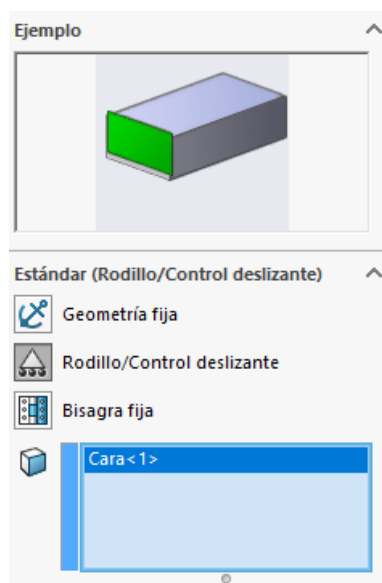


Figura 3.37: Rodillo/Control deslizante en SolidWorks.

-**Bisagra fija:** restringe a la arista seleccionada para que gire únicamente alrededor de su eje. En la figura 3.38 se puede ver cómo configurar esta opción.

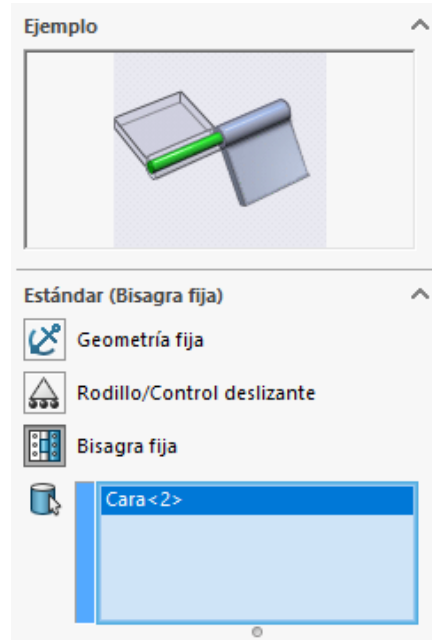


Figura 3.38: Bisagra fija en SolidWorks.

-**Sujeciones avanzadas:** con esta herramienta se pueden aplicar diferentes restricciones sobre diferentes caras, de manera que se puede elegir el valor que toman los movimientos en cada dirección. En la figura 3.39 se pueden ver las sujeciones avanzadas que ofrece SolidWorks.

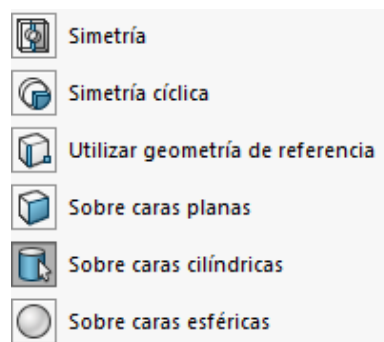


Figura 3.39: Sujeciones avanzadas en SolidWorks.

Para más información sobre estas sujeciones avanzadas consultar la “Ayuda de SolidWorks” [W15].

David Martín Rodríguez

**-Sujeción de rodamiento:** esta herramienta se encuentra al clicar con el botón derecho sobre sujeciones en el árbol de operaciones donde aparece una ventana como la que se muestra en la figura 3.40.

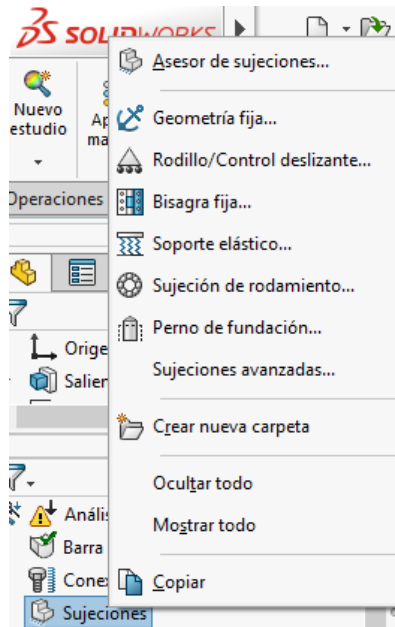


Figura 3.40: Localización sujeción de rodamiento en SolidWorks.

Esta herramienta permite simular la interacción entre un eje y el suelo a través de un rodamiento. En la figura 3.41 se puede ver las opciones que permiten configurar esta sujeción de rodamiento.

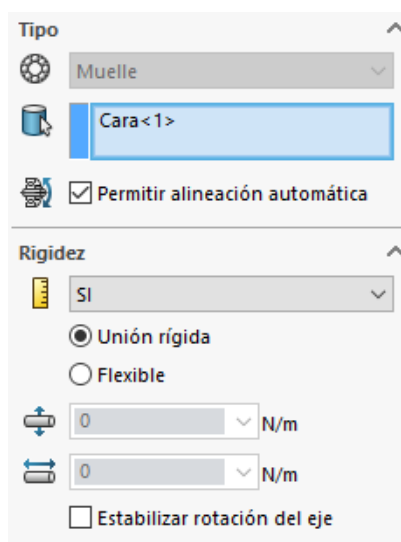


Figura 3.41: Opción sujeción de rodamiento en SolidWorks.

La opción “Permitir alineación automática” define conectores de apoyo con alineación automática que permiten una rotación de eje fuera del eje sin restricciones.

La opción “Unión rígida” evita que la cara seleccionada se traslade o deforme. Permite que la selección gire alrededor de su eje. Por el contrario, la opción “Flexible” permite que la cara seleccionada se deforme y se desplace axialmente.

Para poder situar esta sujeción se deben realizar unas particiones del eje en el lugar donde van colocados los rodamientos, tal y como se puede ver en la figura 3.42. Estas particiones se hacen en el entorno “Pieza” y después, ya en el complemento de simulación, se coloca esta sujeción que se representa como se puede ver en la figura 3.43.

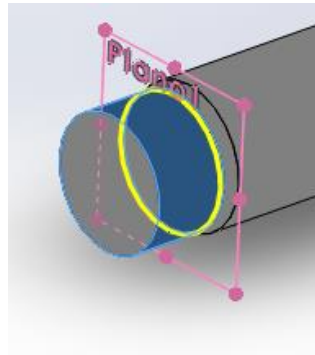


Figura 3.42: Partición para rodamiento en SolidWorks.

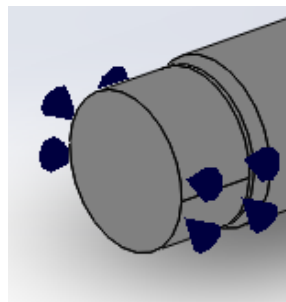


Figura 3.43: Sujeción de rodamiento en SolidWorks.

### c) Conectores

Son herramientas que permiten simular las conexiones que existen entre dos entidades diferentes. Se usan para simular uniones en los conjuntos de piezas. En este trabajo no se usarán conjuntos de piezas, por lo que no se usará esta

David Martín Rodríguez

herramienta. En la figura 3.44 se pueden ver los diferentes conectores con los que cuenta SolidWorks.

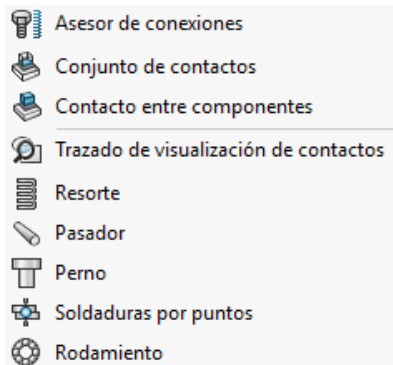


Figura 3.44: Conectores en SolidWorks.

#### d) Cargas externas

Permite fijar las diferentes cargas que actuarán sobre la pieza que se va a analizar. Como se puede ver en la figura 3.45 se pueden poner una gran variedad de cargas. En este trabajo solo se usarán la “Fuerza” y la “Torsión”.

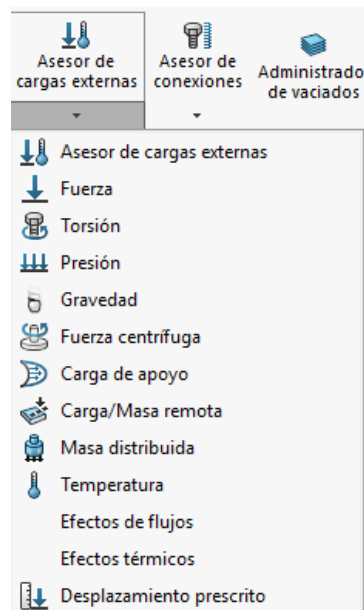


Figura 3.45: Cargas externas en SolidWorks.

**-Fuerza:** esta herramienta permite fijar fuerzas sobre una cara. Para fijar la dirección de la fuerza se selecciona un plano de referencia y se indica el valor de la fuerza en la dirección deseada frente a ese plano, tal y como se muestra en la figura 3.46. En la figura 3.47 se muestra cómo se representan las fuerzas en SolidWorks.

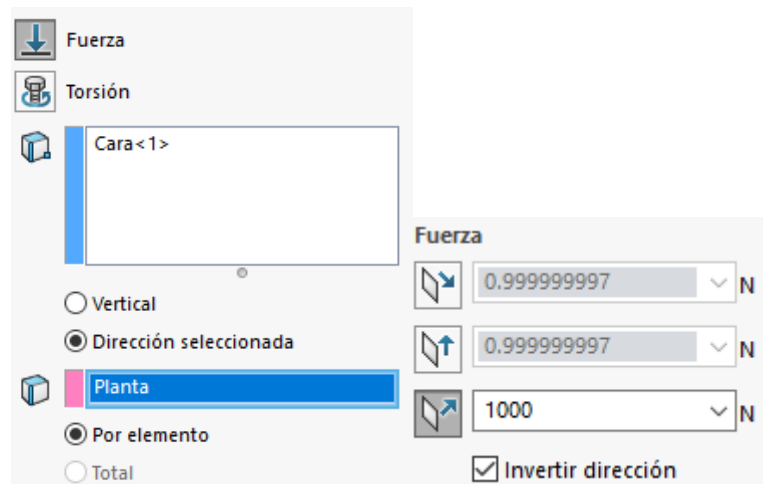


Figura 3.46: Definición de la fuerza en SolidWorks.

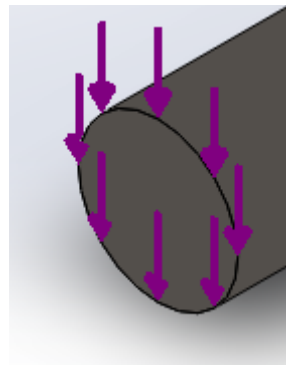


Figura 3.47: Fuerza en SolidWorks.

Al igual que en Catia, se puede aplicar una fuerza puntual en un punto dibujado anteriormente. Sin embargo, al simular el problema y obtener la tensión de Von Mises, se ve que en el punto de aplicación de esta fuerza, tiene lugar una concentración de tensiones muy elevada, haciendo que este punto sea el de máxima tensión, tal y como se puede ver en la figura 3.48. Debido a esto, con SolidWorks se usarán fuerzas distribuidas sobre una partición del eje.

David Martín Rodríguez

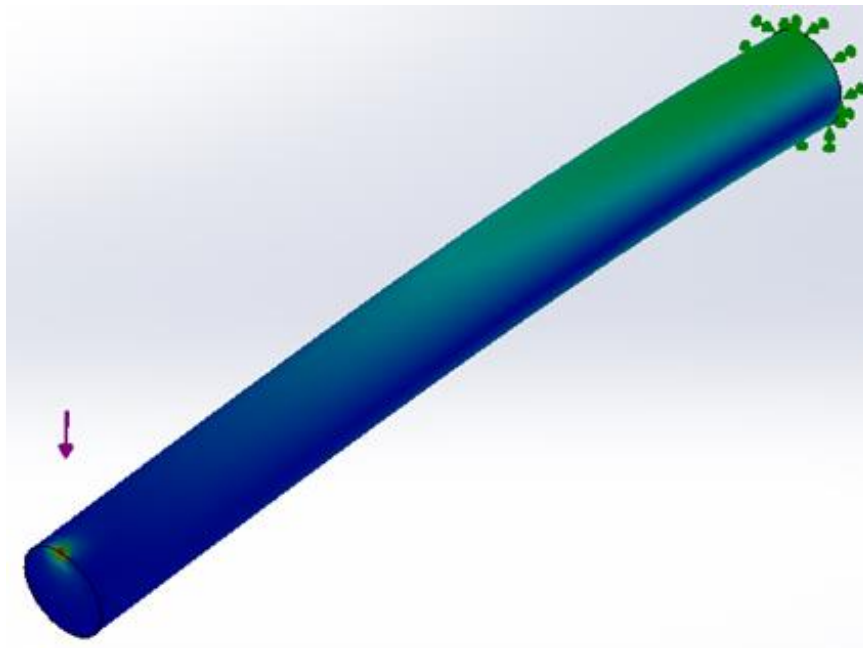


Figura 3.48: Fuerza puntual en SolidWorks.

**-Torsión:** esta herramienta permite fijar momentos torsores sobre la pieza que se va a analizar. El mecanismo de definición de un momento es similar al de la fuerza, se elige la cara donde se desea situar y una geometría de referencia para indicar su dirección. En la figura 3.49 se puede ver cómo definir un momento torsor y como se representa en SolidWorks.

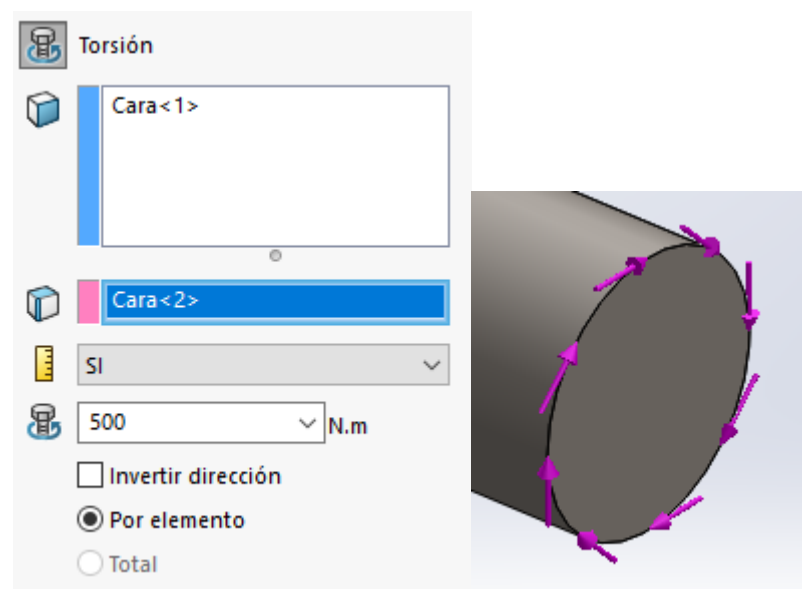


Figura 3.49: Momento torsor en SolidWorks.



e) Mallado

Con esta herramienta se elige el tipo de mallado que se desea realizar así como el tamaño de los elementos que formarán dicho mallado. Para configurar la malla con la que se va a trabajar, aparecerán las ventanas de la figura 3.50, donde se ven diferentes opciones que se explicarán a continuación.

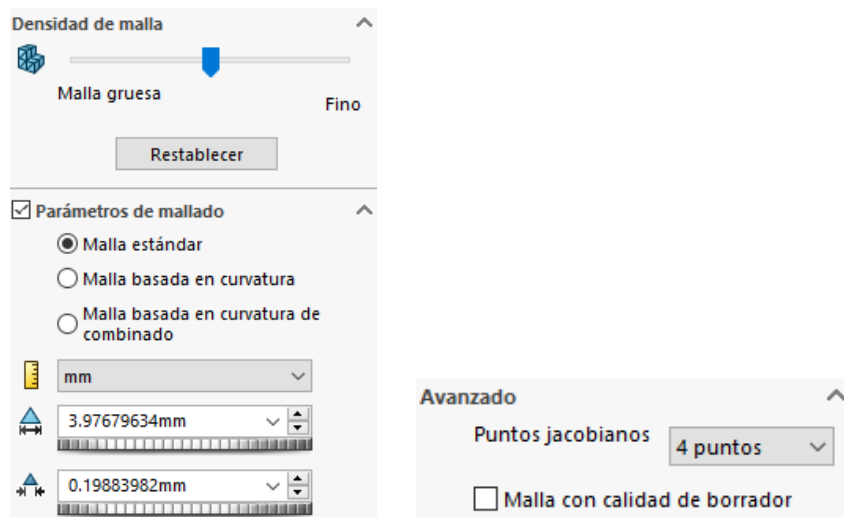


Figura 3.50: Elección del mallado en SolidWorks.

**-Malla estándar:** crea elementos homogéneos en toda la pieza. Se utiliza para geometrías planas que no cuentan con muchas zonas de curvatura.

**-Malla basada en curvatura:** crea más elementos en las zonas de mayor curvatura. Este tipo de malla es más exacto cuando se tienen pequeños radios y superficies curvas. En este trabajo se simularán ejes, por lo que se usará este tipo de mallado.

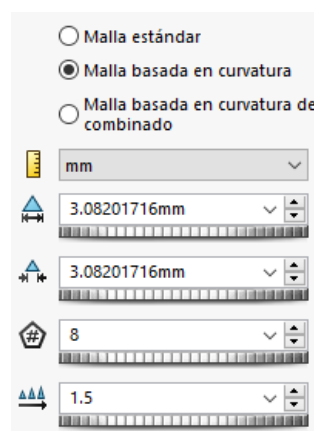


Figura 3.51: Malla basada en curvatura en SolidWorks.



Como se puede ver en la figura 3.51 en este tipo de mallado se pueden indicar el tamaño máximo y mínimo del elemento, el número mínimo de elementos en un círculo y el cociente de crecimiento del tamaño del elemento.

**-Malla basada en curvatura de combinado:** se utiliza para modelos más complejos, como pueden ser piezas de gran complejidad geométrica o conjuntos de piezas, que no se pueden mallar con los dos modelos descritos anteriormente.

**-Malla con calidad de borrador:** utiliza elementos de primer orden, es decir, no tiene en cuenta la concentración de tensiones. SolidWorks por defecto utiliza elementos de segundo orden, es decir, tiene en cuenta la concentración de tensiones.

**-Puntos jacobianos:** establece el número de puntos de integración que se usarán. A más puntos jacobianos se tendrá una mayor calidad. En los ejemplos realizados en este trabajo no se ve diferencia en los resultados al utilizar una opción u otra.

Al igual que en Catia, SolidWorks nos permite hacer un mallado más preciso en una determinada zona, para esto se utiliza el “Control de mallado”, tal y como se puede ver en la figura 3.52.

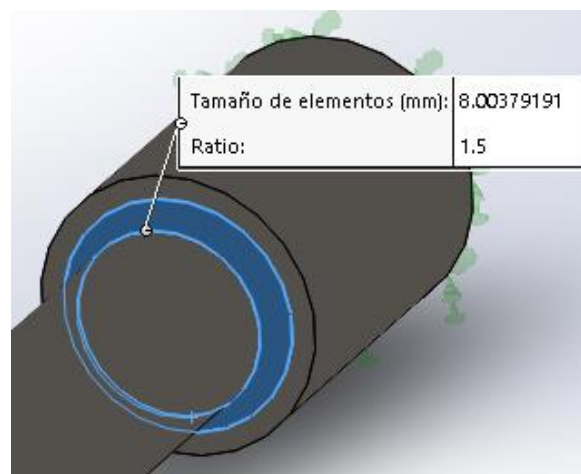


Figura 3.52: Control de mallado en SolidWorks.

#### f) Resultados

Una vez se ha simulado el problema, se pueden ver los resultados de forma gráfica gracias a la herramienta “Resultados”. SolidWorks proporciona una amplia lista de resultados tal y como se puede ver en la figura 3.53.

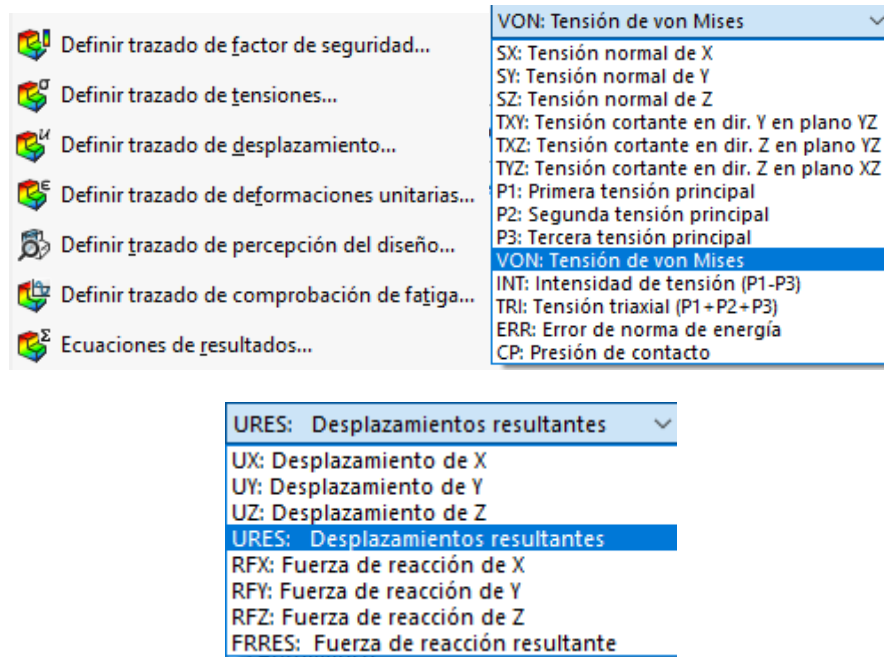


Figura 3.53: Opciones de resultados en SolidWorks.

Para ver los diferentes resultados que se van a obtener en el resto de ejemplos de este trabajo, se va a usar a modo de ejemplo, al igual que se usó en Catia, una viga en voladizo con una fuerza en el extremo. En las figuras 3.54, 3.55, 3.56 y 3.57 se verá como SolidWorks representa la deformación estática, las tensiones principales, la tensión de Von Misses y el error de cálculo. Al igual que en Catia, se pueden localizar fácilmente las zonas de máxima tensión y máximos desplazamientos gracias a un buen mapa de color.

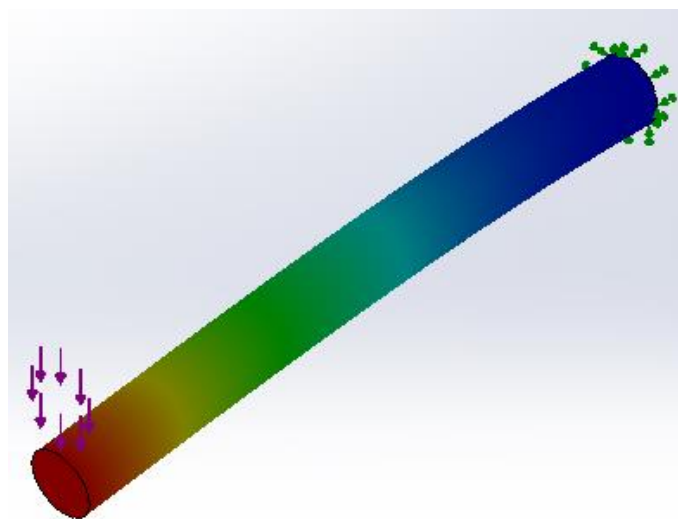


Figura3.54: Deformación estática de una viga en voladizo en SolidWorks.

David Martín Rodríguez

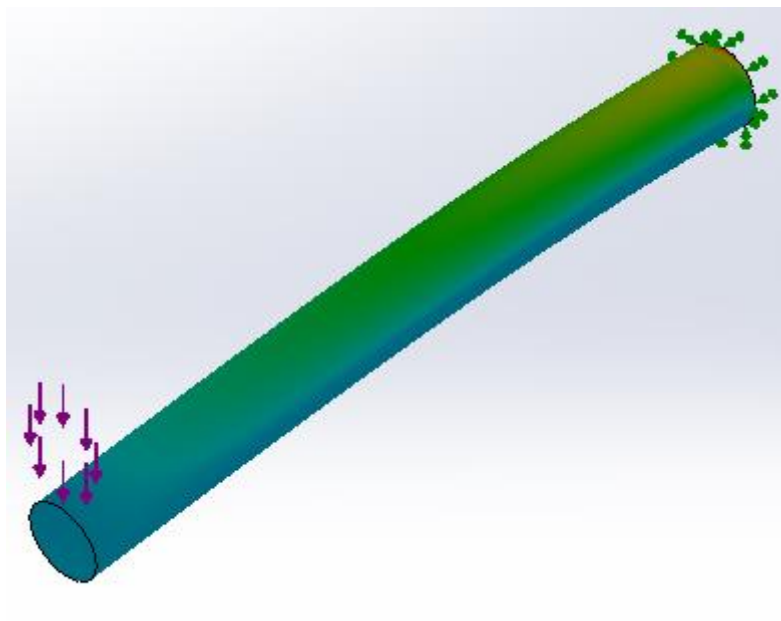


Figura 3.55: Tensión principal de una viga en voladizo en SolidWorks.

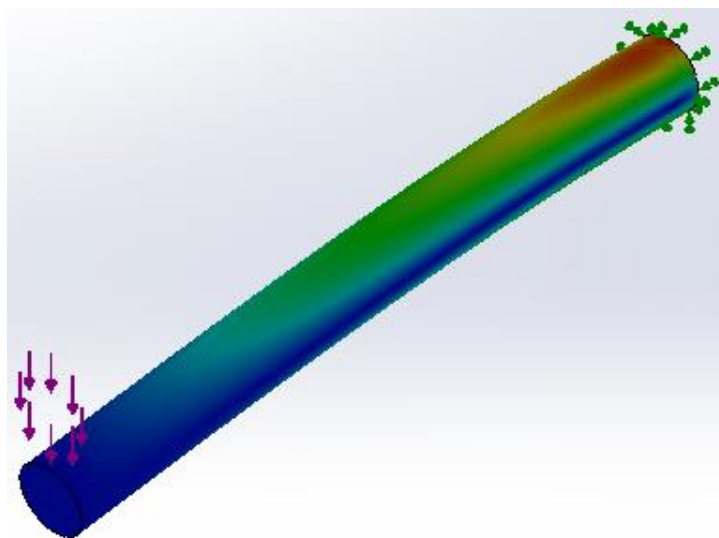


Figura 3.56: Tensión de Von Misses de una viga en voladizo en SolidWorks.

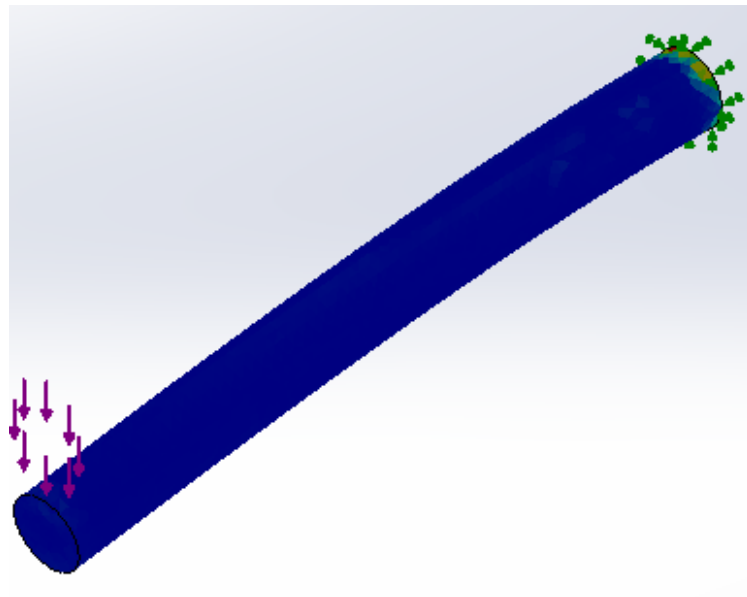


Figura 3.57: Error de cálculo en una viga en voladizo en SolidWorks.

SolidWorks no proporciona el error global que se comete en la pieza como si ofrece Catia. Solo proporciona el error de cada elemento, tal y como se puede ver en la figura 3.57.

Además, SolidWorks cuenta con la opción de indicar los máximos y mínimos de los resultados que se están mostrando (Figura 3.58), así como ver los valores de los elementos en una determinada zona o en la pieza completa, hacer cortes.... (Figura 3.59).



Figura 3.58: Anotación máxima en SolidWorks.

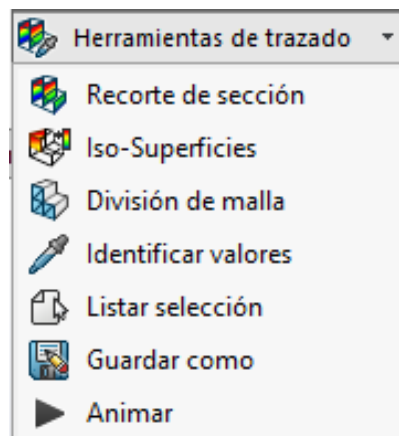


Figura 3.59: Herramientas de trazado en SolidWorks.

Al clicar sobre “Identificar valores” aparece la ventana que se muestra en la figura 3.60, donde se pueden ver los valores en los diferentes nodos de la pieza completa analizada o de una sección concreta.

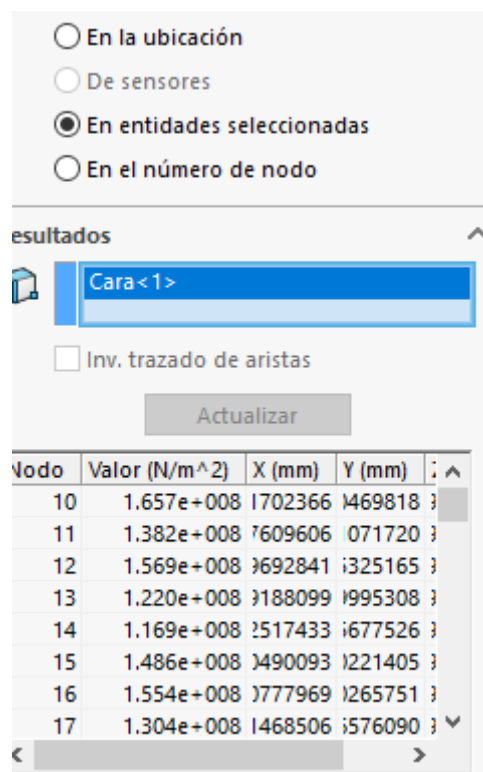


Figura 3.60: Identificar valores en SolidWorks.



### 3.4: FREECAD

FreeCAD 0.18 es una aplicación de libre distribución de diseño asistido por ordenador en tres dimensiones que sirve para el diseño de elementos mecánicos.

Se trata de un software que presenta un entorno de trabajo similar a Catia y a SolidWorks, donde se puede implementar código para así añadir nuevas funciones, En este trabajo no se ha añadido código nuevo ni se explica la forma de implementar código.

Se trata de un software que se encuentra en pleno desarrollo, en especial el módulo FEM con el que se han realizados los diferentes análisis estáticos que se van a realizar en este trabajo.

Al igual que los programas descritos anteriormente, FreeCAD cuenta con diferentes módulos que permite hacer diferentes trabajos, en la figura 3.61 se pueden ver estos módulos de trabajo.

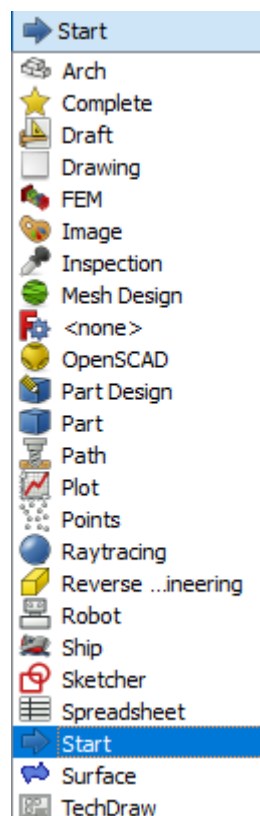


Figura 3.61: Módulos de FreeCAD.

En este trabajo se usarán los módulos: el “Part Design”, para el diseño de la pieza y el módulo “FEM”, para llevar a cabo el análisis estático.

David Martín Rodríguez

### 3.4.1: Part Design

Este módulo de trabajo es muy similar al módulo “Part” de Catia y al entorno “Pieza” de SolidWorks, es decir, permite crear diferentes piezas en 3D partiendo de croquis en 2D y realizando diferentes operaciones.

Como ya sucedió con SolidWorks, no se explicarán los comandos de este módulo de FreeCAD en este trabajo ya que son muy similares a los de Catia.

En la figura 3.62 se puede ver como es el entorno de trabajo de este módulo.

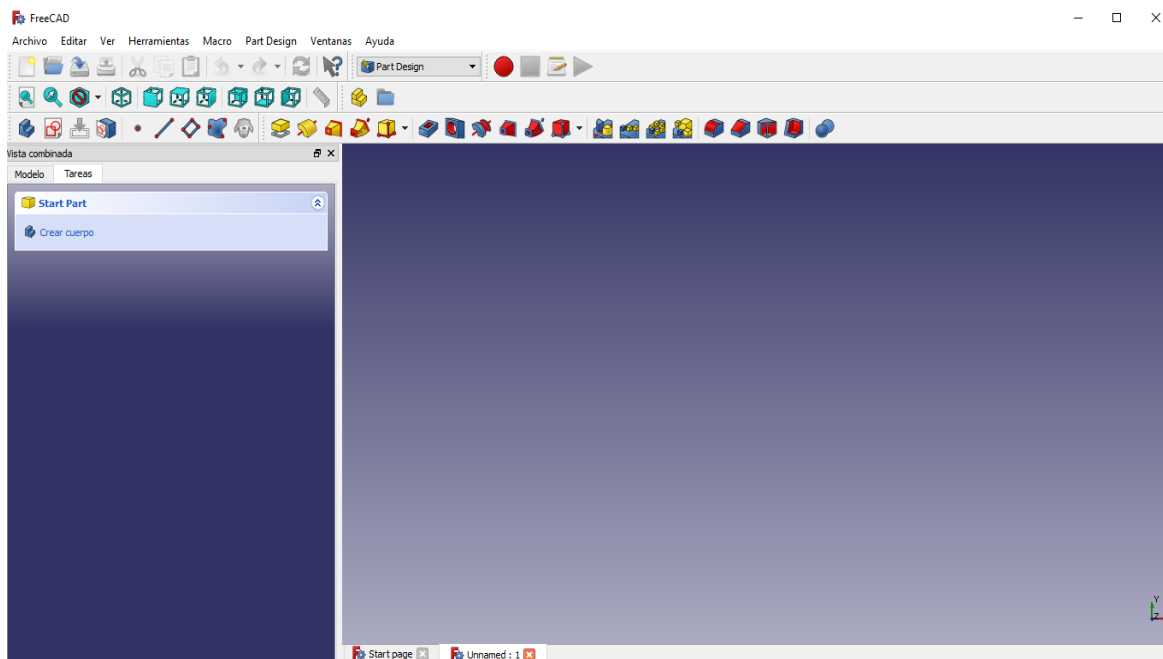


Figura 3.62: Módulo Part Design de FreeCAD.

Mencionar que en este módulo se pueden hacer casi todas las operaciones necesarias para el diseño de diferentes piezas, menos las operaciones booleanas y de unión entre diferentes formas. Para realizar estas operaciones se tendrá que entrar en el módulo “Part”

### 3.4.2: FEM

Dentro de este módulo se puede realizar un análisis estático a las diferentes piezas que han sido diseñadas anteriormente.

Como ya se ha mencionado anteriormente, este módulo se encuentra en pleno desarrollo, por lo que hay opciones que todavía no están implementadas en la versión FreeCAD 0.18. El entorno de trabajo de este módulo se muestra en la figura 3.63.

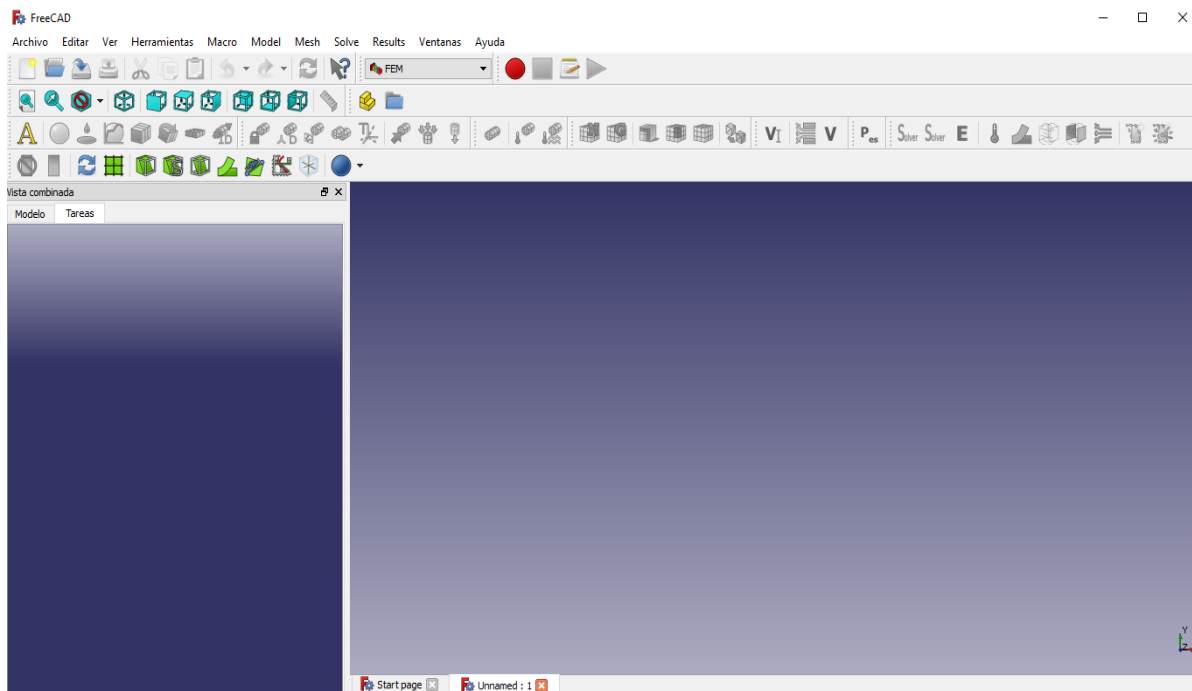



Figura 3.63: Módulo FEM de FreeCAD.

Los pasos a seguir para llevar a cabo el análisis estático se son los mismos que en los anteriores programas:

- Elección de material.
- Fijación de las sujeciones.
- Aplicación de las cargas.
- Elección de la malla.
- Ejecución.

A continuación, se explicarán las principales herramientas con las que cuenta este módulo para realizar la simulación. Para obtener más información, se recomienda consultar las páginas “FreeCADweb” [W16] y el foro de dudas con el que cuenta esta página.

Lo primero que se debe hacer al entrar al módulo FEM es seleccionar la opción

“Crear un conector de análisis” , con el objeto o pieza que se desea analizar seleccionado. Una vez hecho esto se deberá proceder a configurar el análisis que se desee hacer.



David Martín Rodríguez

### a) Elegir material

FreeCAD da a elegir entre materiales sólidos y materiales fluidos, estos últimos son para hacer otro tipo de análisis que no tienen que ver con los análisis estáticos que se van a realizar en este trabajo. Debido a esto la opción que se utiliza será la que se encuentra marcada en rojo en la figura 3.64.



Figura 3.64: Elección de material en FreeCAD.


Una vez dentro de esta opción, FreeCAD ofrece una amplia variedad de aceros, pero cuenta con un número bastante limitado de otro tipo de materiales. En todos los materiales es posible modificar sus propiedades pero no es posible crear materiales nuevos.

### b) Restricciones

Permite fijar los apoyos sobre la pieza que se va a realizar el análisis. FreeCAD, como se puede ver en la figura 3.65, cuenta con varias opciones para poder aplicar las diferentes restricciones, pero se debe tener en cuenta que algunas opciones todavía no están implementadas ya que están en desarrollo.



Figura 3.65: Restricciones en FreeCAD.

**-Restricción para una geometría fija**  : con esta herramienta se pueden fijar diferentes geometrías, es decir, simula un empotramiento como se puede ver en la figura 3.66.

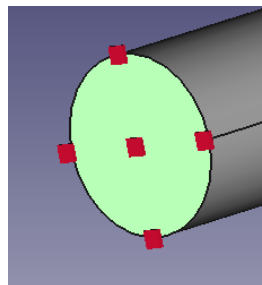



Figura 3.66: Restricción fija en FreeCAD.



-Restricción para el desplazamiento  : con esta herramienta se pueden restringir grados de libertad, tres movimientos y tres giros, tal y como se puede ver en las figuras 3.67 y 3.68.

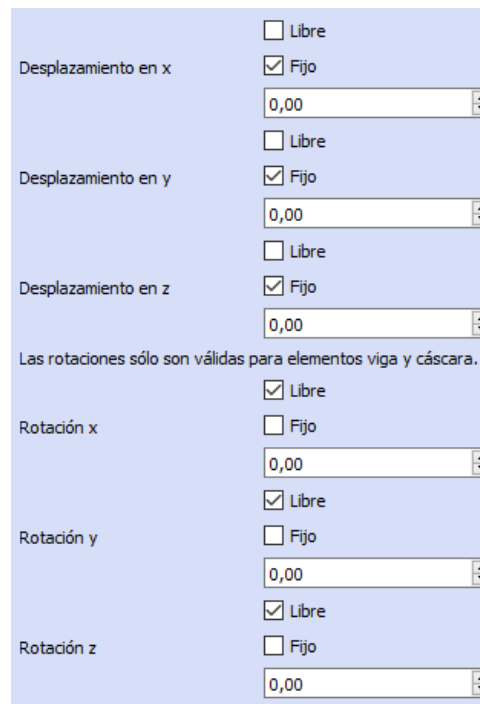


Figura 3.67: Restricción de grados de libertad en FreeCAD.

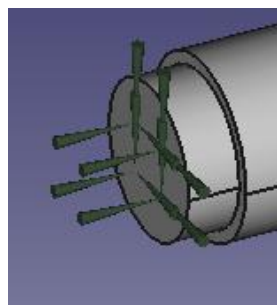



Figura: 3.68: Ejemplo de movimientos impedidos en FreeCAD.

Como se ha dicho anteriormente, FreeCAD cuenta con otras opciones de restricción que todavía no se encuentran implementadas como la “restricción para la rotación

de una cara plana”  . Esta restricción sí se puede poner, pero al ejecutar da el mensaje de error que se ve en la figura 3.69 y que indica que no hay restricciones fijas ni de desplazamiento.

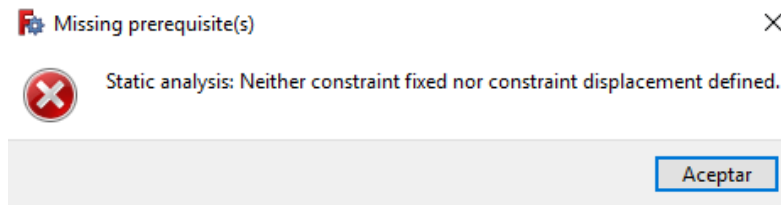


Figura 3.69: Error para la restricción de rotación en FreeCAD.


### c) Cargas

FreeCAD permite aplicar un buen número de cargas o acciones exteriores sobre el modelo donde se va a realizar el análisis estático. Se pueden aplicar cargas como fuerza, presión, gravedad y acciones térmicas tal y como se puede ver en la figura 3.70 de izquierda a derecha respectivamente.



Figura 3.70: Cargas en FreeCAD.

Como ya se ha visto en los programas anteriormente explicados, en este trabajo solo se usarán fuerzas y momentos.

**-Fuerza**  : con esta herramienta se pueden aplicar fuerzas que actuarán sobre la pieza a analizar. Las fuerzas que se han aplicado son distribuidas, al igual que en SolidWorks. Esta herramienta también permite seleccionar la dirección en la que va aplicada la fuerza como se puede ver en la figura 3.71. La forma de fijar el dirección de la fuerza será seleccionando una arista, de la propia pieza, que tenga la misma dirección que la que se desea para la fuerza. Una vez aplicada la fuerza, en la figura 3.72 se ve como FreeCAD representa la fuerza.

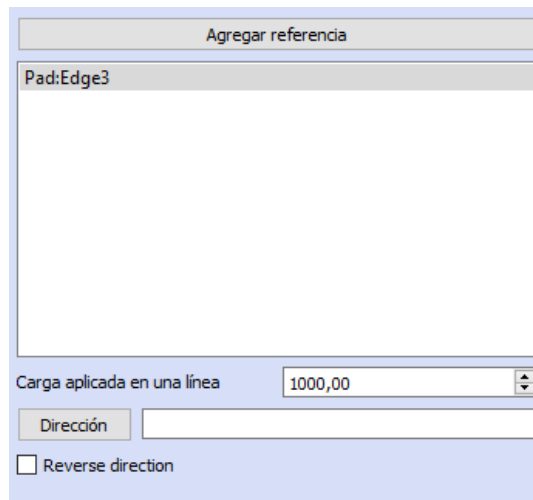


Figura 3.71: Definición de la fuerza en FreeCAD.

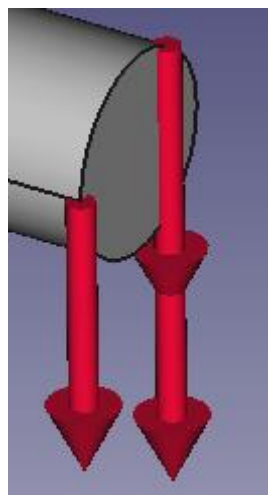



Figura 3.72: Fuerza en FreeCAD.

-**Torsion:** para aplicar un momento torsor, FreeCAD no proporciona una herramienta específica para ello, pero si se puede aplicar a partir de una fuerza. Para ello se pone una fuerza distribuida sobre una cara cilíndrica y

con la herramienta “Transformar una cara”  se hace un cambio a coordenadas cilíndricas tal y como se muestra en la figura 3.73.

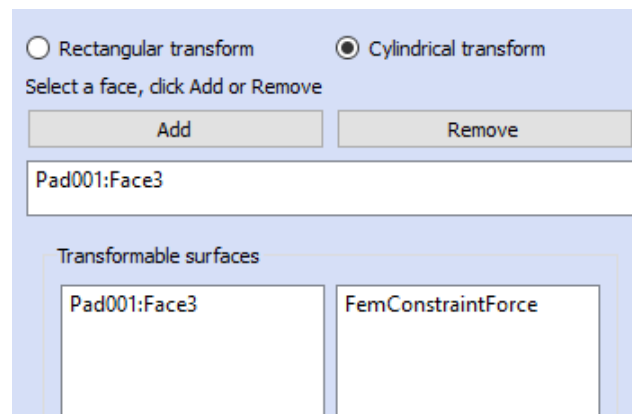


Figura 3.73: Transformación a cilíndricas en FreeCAD.

Mencionar que este cambio a coordenadas cilíndricas no se puede realizar sobre una superficie plana, por lo que en FreeCAD solo se podrá aplicar momentos sobre superficies cilíndricas.

Una vez transformada la fuerza a coordenadas cilíndricas el resultado se muestra en la figura 3.74. En el análisis “Momento Torsor” que se muestra en el siguiente capítulo, se indica que valor hay que dar a la fuerza para que coincida con el momento que se desea aplicar.

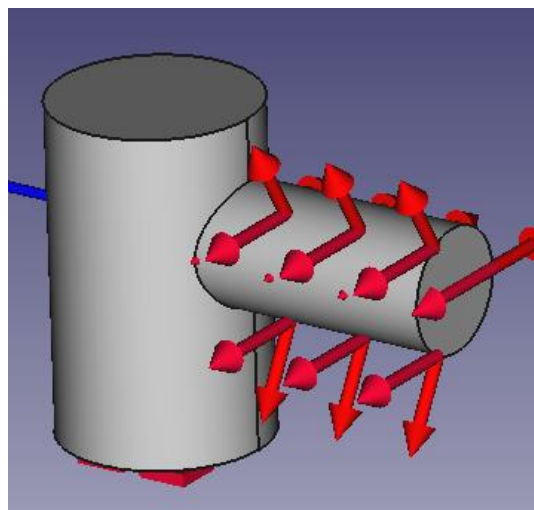


Figura 3.74: Momento torsor en FreeCAD.

#### d) Mallado

Para realizar el mallado del objeto que se va a analizar, FreeCAD ofrece dos opciones tal y como se puede ver en la figura 3.75.



Figura 3.75: Opciones de mallado en FreeCAD.

**-Malla de forma Netgen:** esta opción permite realizar el mallado de las diferentes piezas que se desean analizar eligiendo entre unos valores de precisión que vienen definidos por el programa. En la figura 3.76 se puede ver como configurar esta malla y también se puede ver que da la opción de utilizar una malla de segundo orden o no, es decir, tener en cuenta la concentración de tensiones o no.

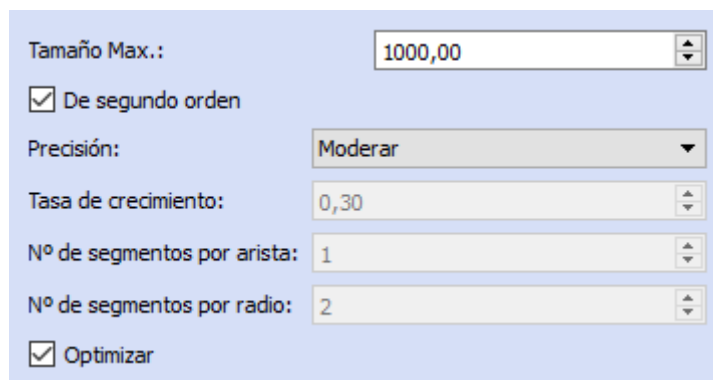


Figura 3.76: Malla Netgen en FreeCAD.

**-Malla de forma GMSH:** esta opción si permite elegir el tamaño máximo y mínimo de los elementos que forman la malla como se puede ver en la figura 3.77.

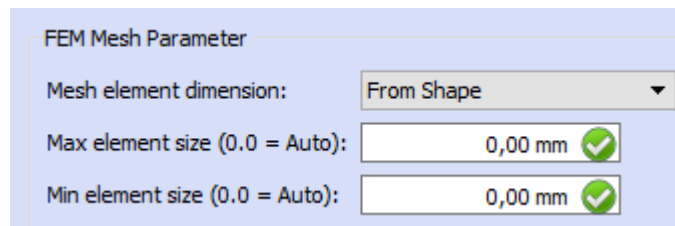


Figura 3.77: Malla GMSH en FreeCAD.

En este trabajo, todos los ejemplos se han realizado con la malla Netgen, ya que al utilizar la otra malla y ejecutar el problema, se produce un error de mallado.

Mencionar que FreeCAD no permite realizar un mallado local en una determinada zona, cosa que Catia y SolidWorks sí permiten.

David Martín Rodríguez

### e) Resultados

Una vez preparado el análisis que se desea realizar, este se debe ejecutar para ello se debe clicar sobre “CalculiXccxTools” que se encuentra en el árbol del modelo como se ve en la figura 3.78.

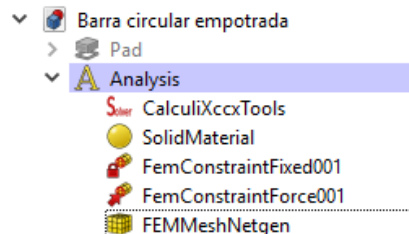


Figura 3.78: Ubicación CalculiXccxTools en FreeCAD.

Una vez dentro de esta opción, aparece el cuadro que se muestra en la figura 3.79 donde se elige el tipo de análisis que se quiere realizar y después clicar sobre “write .inp file” y sobre “Run CalculiX” para ejecutar el problema.

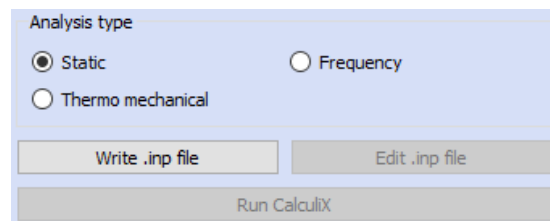


Figura 3.79: Ejecución del problema en FreeCAD.

Una vez se ha ejecutado el problema, FreeCAD cuenta con dos herramientas, una para mostrar los resultados y otra para ocultar estos resultados. En la figura 3.80 se pueden ver estas dos herramientas y en la figura 3.81 los resultados que FreeCAD proporciona para el análisis estático.



Figura 3.80: Mostrar resultados en FreeCAD.



Tipo de resultado

Ninguno

Desplazamiento absoluto

Desplazamiento en X

Desplazamiento en Y

Desplazamiento en Z

Peeq

Temperature

Esfuerzo de von Mises

Max Principal stress

Min Principal stress

Max shear stress (Tresca)

Mass Flow Rate

Network Pressure

Min: 3.10064 MPa ✓

Media: 65.0663 MPa ✓

Max: 256.476 MPa ✓

Desplazamiento

Mostrar < >

Figura 3.81: Resultados de FreeCAD.

Para ver como son los resultados gráficos que ofrece FreeCAD se va a utilizar, al igual que se hizo con Catia y con SolidWorks, una viga en voladizo con una fuerza en el extremo opuesto, en las figuras 3.82, 3.83 y 3.84 se ven estos resultados de deformación estática, tensión principal y tensión de Von Misses.

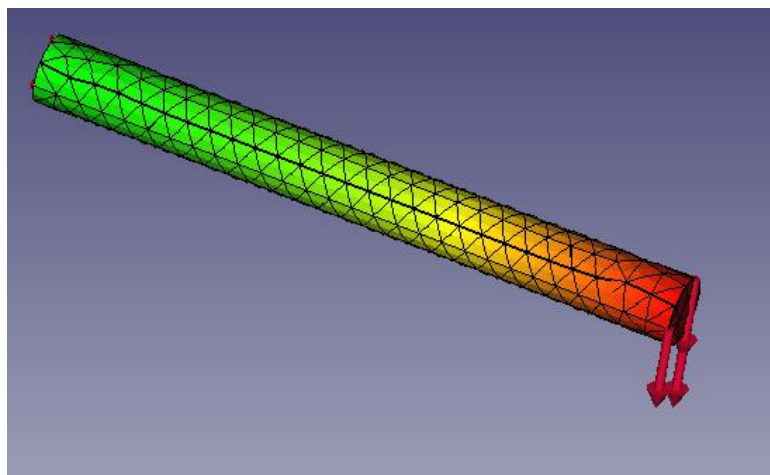


Figura 3.82: Deformación estática de una viga en voladizo en FreeCAD.



David Martín Rodríguez

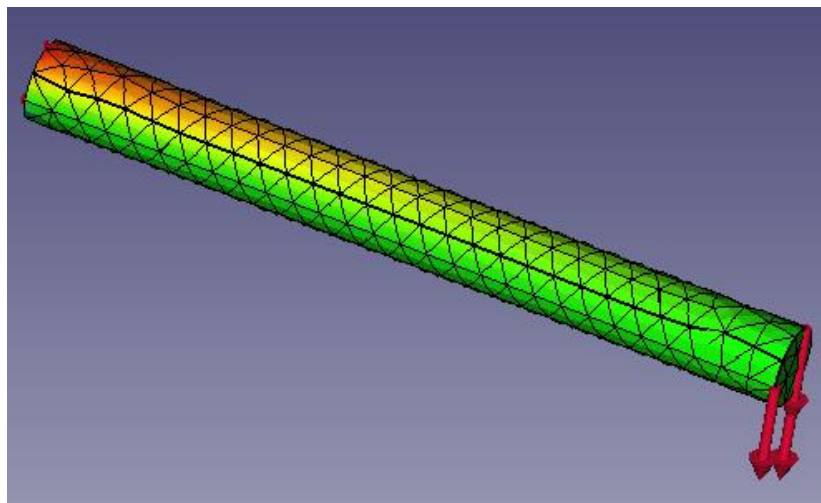


Figura 3.83: Tensión principal en una viga en voladizo en FreeCAD.

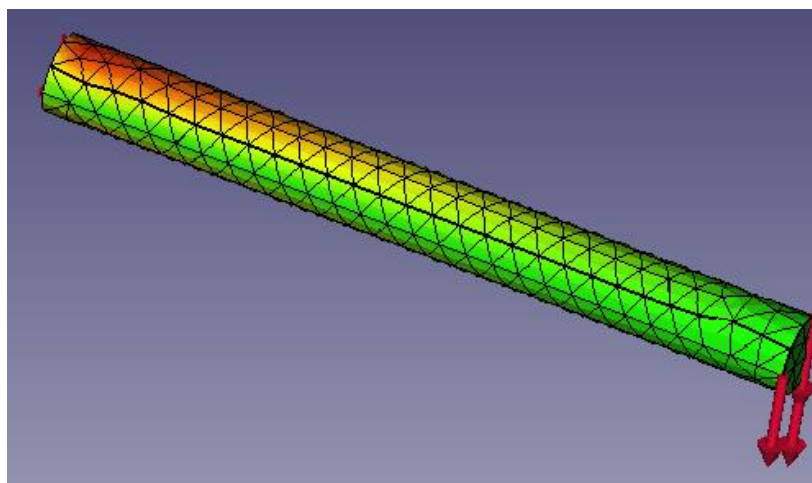


Figura 3.84: Tensión de Von Mises en una viga en voladizo en FreeCAD.



## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTÁTICOS

### 4.1: PALANCA EMPOTRADA

Se tiene una fuerza de 1920,21 N aplicada en el extremo de la palanca de la figura 4.1. La palanca está hecha de acero AISI 1030 forjado y tratado térmicamente, templado y revenido a 425°C. Se trata de hacer una simulación con los tres programas descritos anteriormente (Catia, SolidWorks y FreeCAD) y ver los resultados de tensiones y desplazamientos que proporcionan.

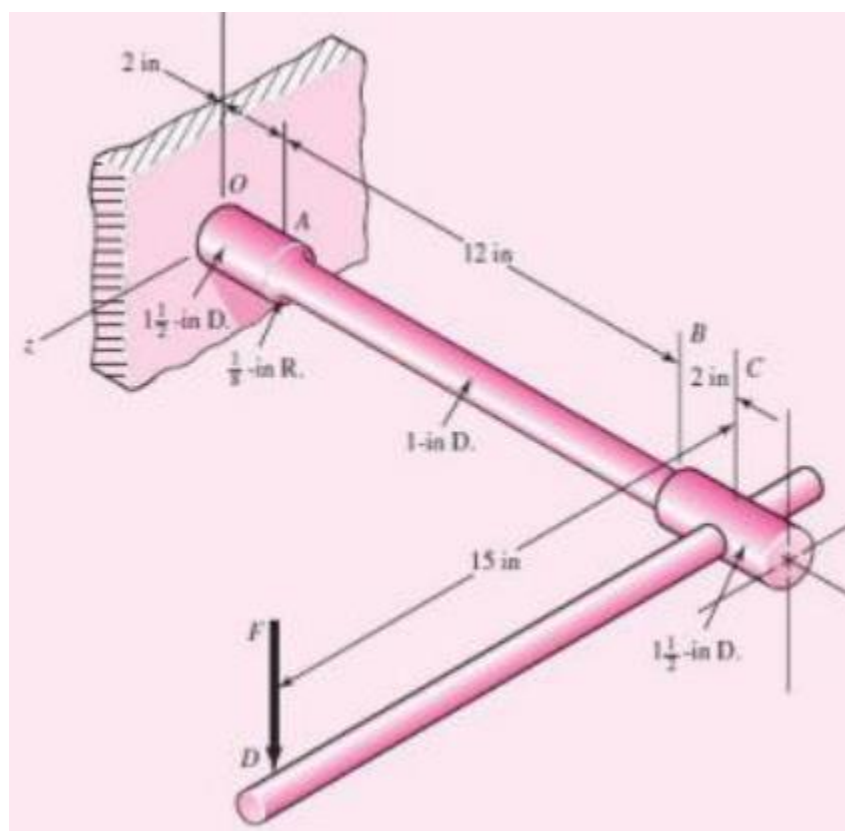


Figura 4.1: Enunciado palanca empotrada.

Lo primero que se debe hacer es buscar las propiedades de este material en las tablas del “Shigley” [4] y realizar los cálculos de forma analítica con las fórmulas que se muestran en el capítulo 2 de este trabajo, tal y como se muestra a continuación.

En la figura 4.2 se puede ver el diagrama de momentos torsores y momentos flectores que se produce en la barra OABC, debido a la fuerza que actúa en la barra CD

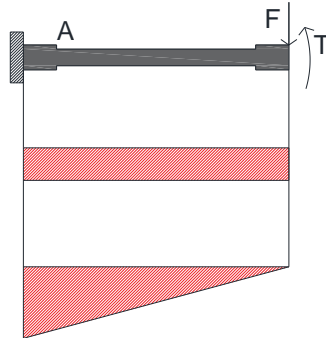


Figura 4.2: Diagrama momentos barra empotrada.

$$T = F * 0.381 = 731.6 \text{ Nm}$$

$$M = F * 0.4064 = 780.37 \text{ Nm}$$

$$M_A = M - F * 0.0508 = 682.82 \text{ Nm}$$

-Sin concentración de tensiones

$$\tau_{max}^A = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16 * 731.6}{\pi * 0.0254^3} = 227 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{max}^A = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 * 780.37}{\pi * 0.0254^3} = 424.43 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad \sigma_1 = 523 * 10^6 \text{ Pa}; \quad \sigma_2 = -98.5 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = 578.5 * 10^6 \text{ Pa}$$

-Con concentración de tensiones

$$K_t = 1.38; \quad K_f = 1.58$$

$$\tau_{xy}^{cor} = \tau_{xy}^A * K_t = 313.26 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_x^{cor} = \sigma_{max}^A * K_f = 670 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad \sigma_1 = 793 * 10^6 \text{ Pa}; \quad \sigma_2 = -123 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = 862 * 10^6 \text{ Pa}.$$

David Martín Rodríguez

Se va a realizar, como se ha visto en los cálculos anteriores, un análisis sin tener en cuenta la concentración de tensiones y otro con dicha concentración de tensiones. En ambos análisis, tanto en Catia como en SolidWorks, se compararán también los resultados sin mallado local y con mallado local. Con FreeCAD se va a realizar el cálculo sin y con concentración de tensiones, pero sin un mallado más preciso en una determinada zona, ya que FreeCAD no lo permite.

En la figura 4.3 se puede ver cómo queda el problema, con el empotramiento y la carga en el extremo, en los tres programas (Catia, SolidWorks, FreeCAD). Poner el empotramiento y la fuerza en el extremo no tiene una gran complicación en ninguno de los tres programas, por lo que no se explicarán los pasos a seguir ya que se ha explicado en la descripción de los programas del capítulo 3.

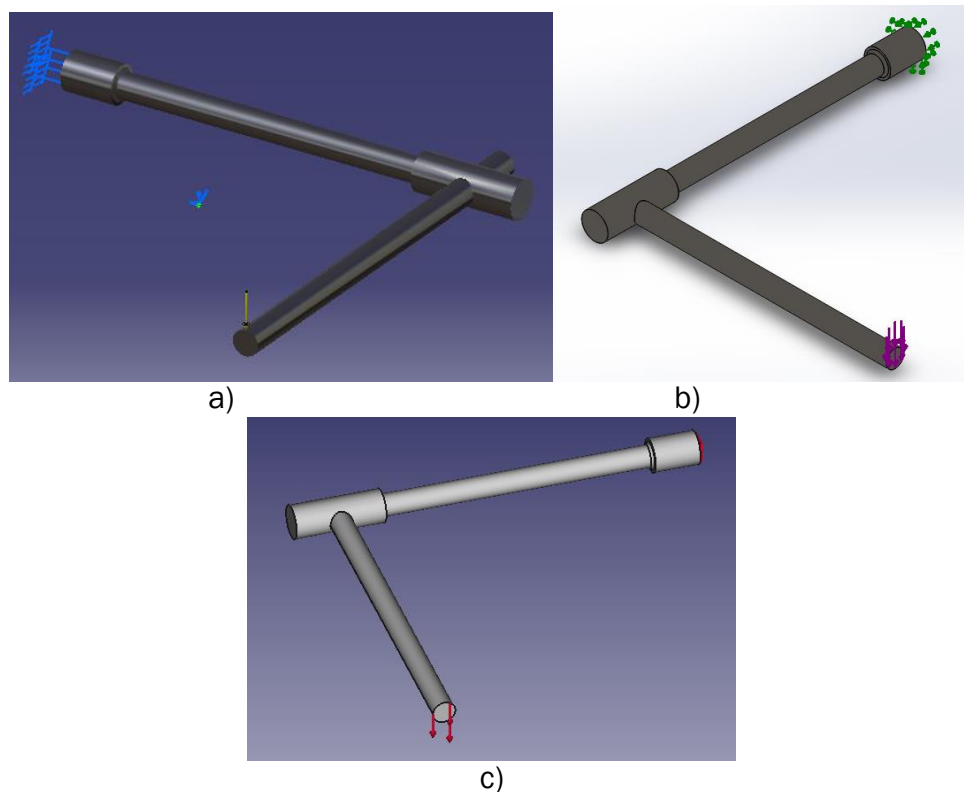


Figura 4.3: Palanca empotrada: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

Para llevar a cabo los análisis, lo primero que se tiene que hacer es configurar la malla que se va a utilizar. En las figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se pueden ver las mallas que se usarán en cada uno de los tres programas. En las tres primeras figuras se muestran las mallas para el análisis sin concentración de tensiones y en las tres siguientes para el análisis con concentración de tensiones. Tanto en Catia como en SolidWorks se puede ver también el mallado local o control de mallado que se va a utilizar.

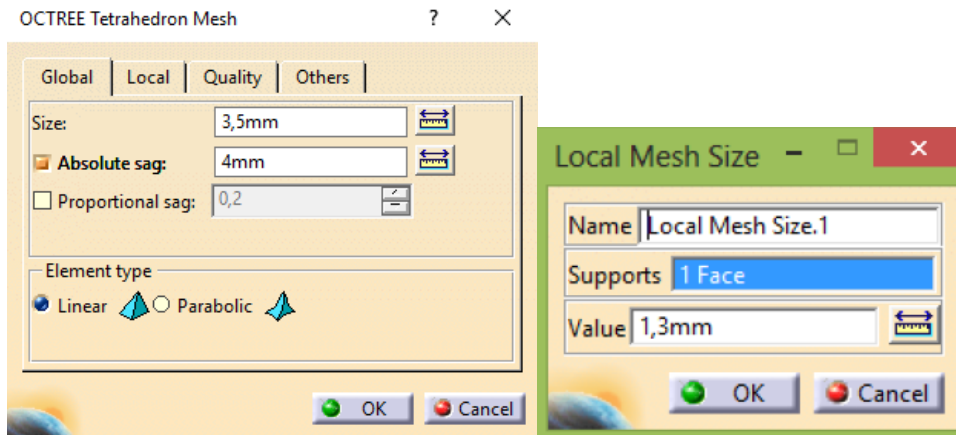


Figura 4.4: Malla sin concentración de tensiones en Catia.

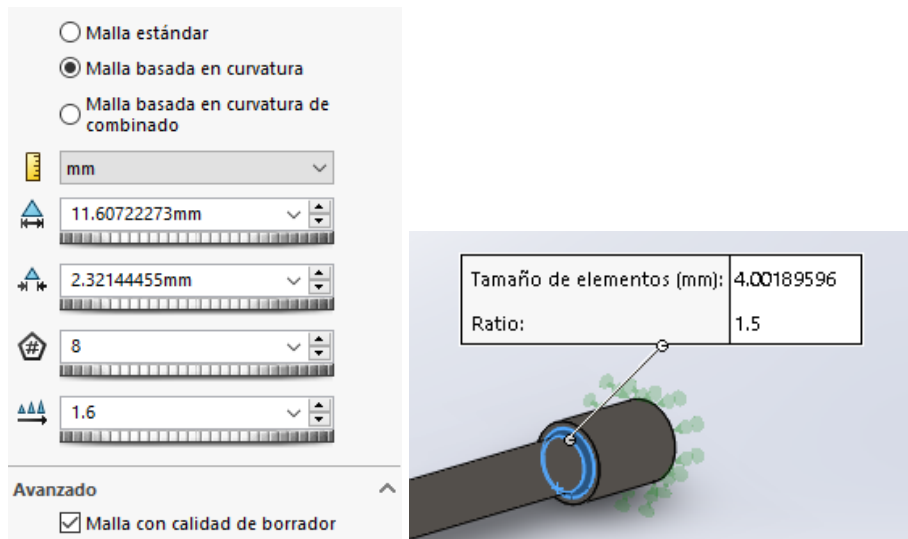


Figura 4.5: Malla sin concentración de tensiones en SolidWorks.



Figura 4.6: Malla sin concentración de tensiones en FreeCAD.

David Martín Rodríguez

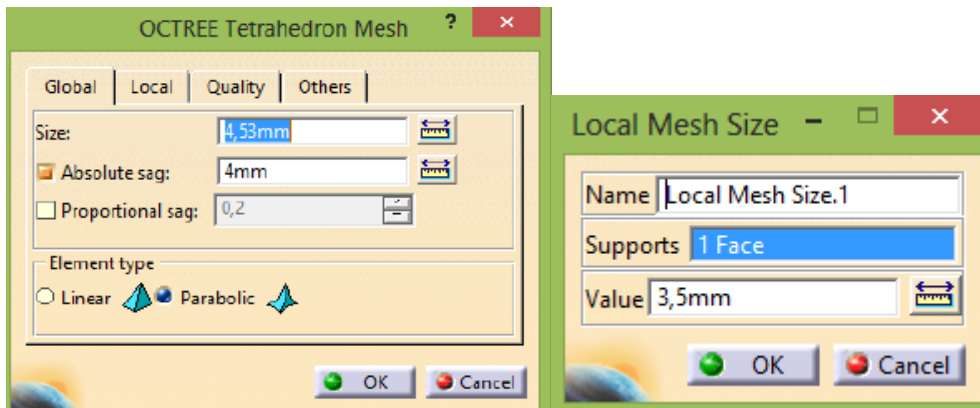


Figura 4.7: Malla con concentración de tensiones en Catia.

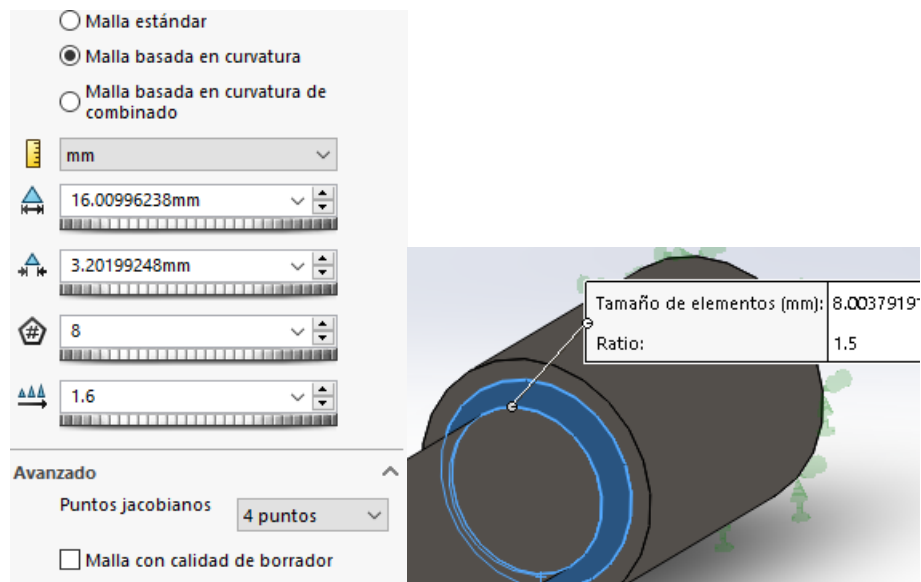


Figura 4.8: Malla con concentración de tensiones en SolidWorks.



Figura 4.9: Malla con concentración de tensiones en FreeCAD.



A la vista de las anteriores figuras, se puede ver que no se necesita un tamaño muy pequeño de los elementos de la malla para poder realizar este análisis y obtener un resultado bueno. Mencionar que los tamaños de los elementos en SolidWorks son mayores que en Catia y que en el caso de FreeCAD se utiliza un tamaño medio de elementos en el análisis sin concentración.

Hay que destacar que tanto en Catia como en SolidWorks, la malla es de tamaño parecido tanto para el análisis sin concentración como para el análisis con concentración de tensiones; sin embargo en FreeCAD, al hacer el análisis con concentración de tensiones, se hace necesario usar una malla más fina.

Una vez establecida la malla, se procederá a simular el análisis y ver los resultados en los tres programas, para así compararlos entre ellos y entre el valor calculado teóricamente.

#### *4.1.1: Deformación estática*

En las figuras 4.10 y 4.11 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de deformación estática que se produce en la palanca. En la primera figura no se tiene en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

Como se puede ver, los tres programas coinciden que la zona de mayor deformación estática está en el lugar de aplicación de la fuerza, tal y como era de esperar.



David Martín Rodríguez

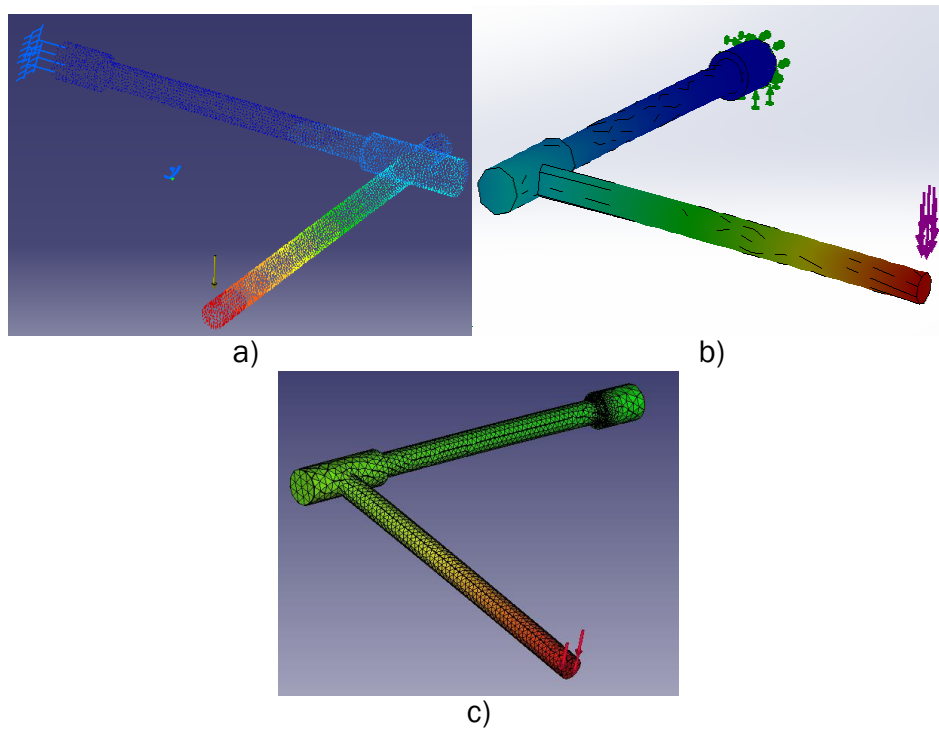


Figura 4.10: Desplazamientos sin concentración de tensiones en la palanca:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

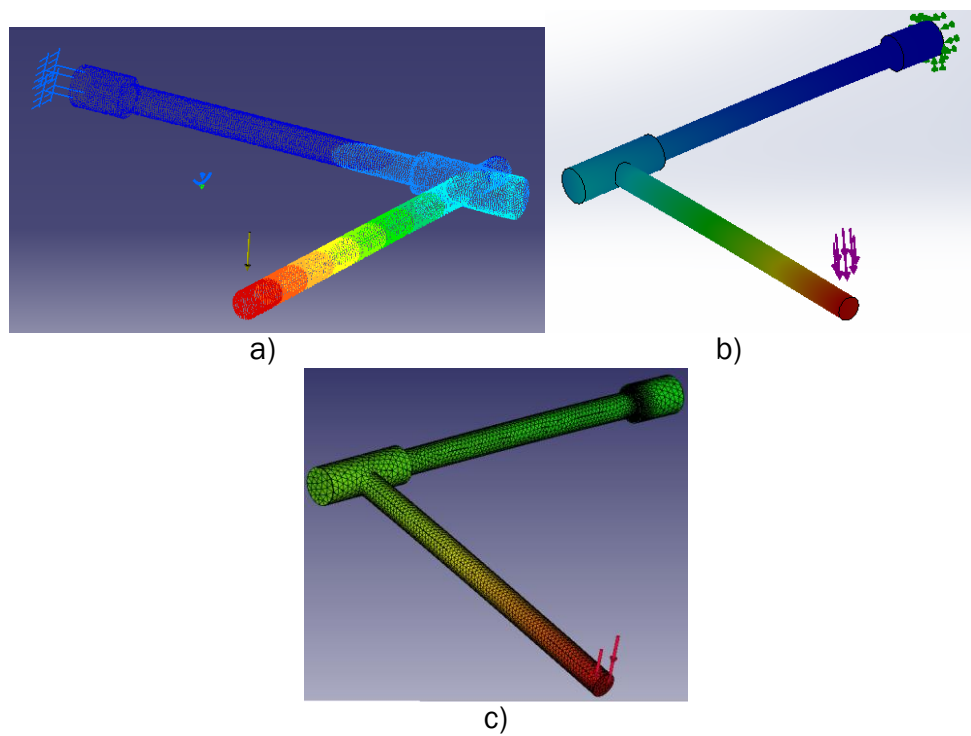


Figura 4.11: Desplazamientos con concentración de tensiones en la palanca:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.1 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Deformación estática (mm)		Sin Control	Con Control
Sin concentración	Catia	40.12	40.07
	SolidWorks	35.25	35.78
	FreeCad	32.71	-----
Con concentración	Catia	43.86	43.85
	SolidWorks	44.03	44.04
	FreeCad	43.01	-----

Tabla 4.1: Deformación estática de la palanca.

Como se puede ver en la tabla 4.1 en el análisis con concentración de tensiones los tres programas dan resultados parecidos. En cambio en el análisis sin concentración de tensiones el resultado del desplazamiento máximo es algo inferior sobre todo en SolidWorks y FreeCAD.

Con respecto a Catia y SolidWorks, al aplicar el mallado local y el control de mallado el resultado que se obtiene es prácticamente igual al que se obtiene sin usar estas dos opciones. Esto es lógico, ya que la zona donde se aplica la malla local o el control de mallado no se corresponde con la zona de máxima deformación estática.

#### 4.1.2: Primera tensión principal

En las figuras 4.12 y 4.13 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la primera tensión principal que se produce en la palanca. En la primera figura no se tiene en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

Como se puede ver, los tres programas coinciden en que la zona de mayor tensión principal está en el cambio de sección más próximo al empotramiento, tal y como era de esperar.

David Martín Rodríguez

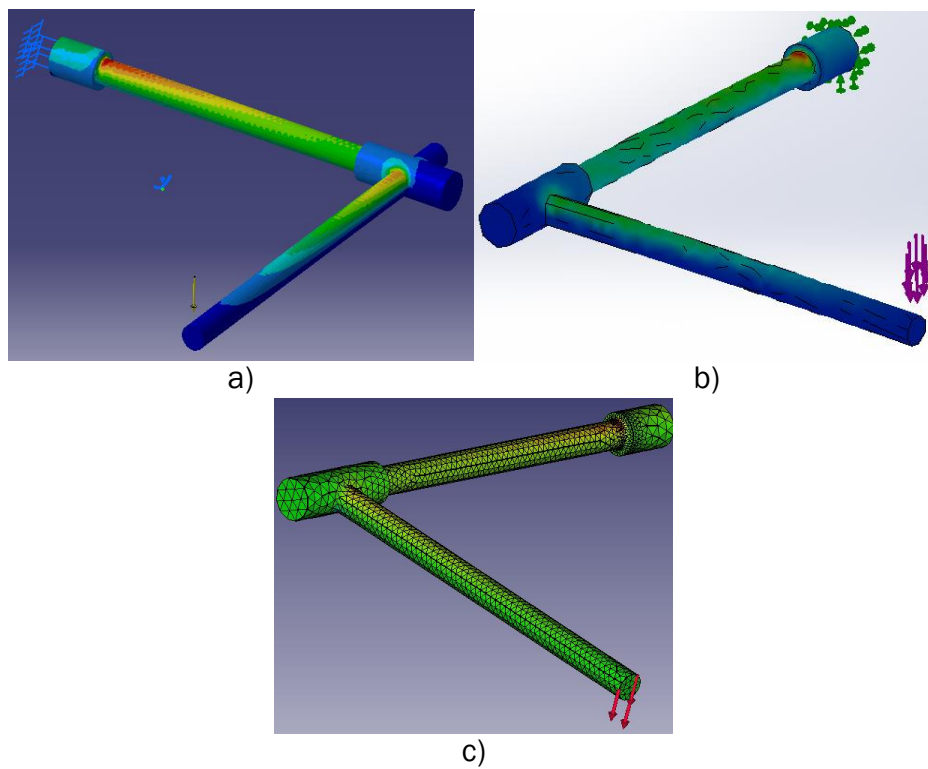


Figura 4.12: Primera tensión principal sin concentración de tensiones en la palanca: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

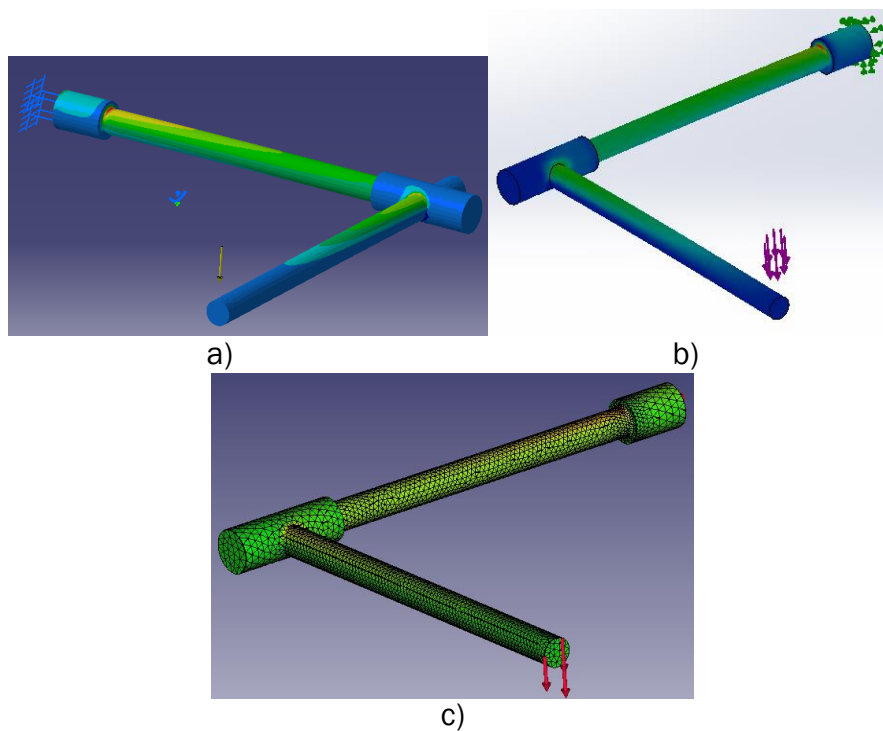


Figura 4.13: Primera tensión principal con concentración de tensiones en la palanca: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.2 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Tensión principal I (Pa)		Sin Control	Error	Con Control	Error relativo	Valor teórico
Sin concentración	Catia	519*10 <sup>6</sup>	0.8%	526*10 <sup>6</sup>	0.6%	523*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	548*10 <sup>6</sup>	4.7%	580*10 <sup>6</sup>	10.8%	
	FreeCad	526*10 <sup>6</sup>	0.6%	----	----	
Con concentración	Catia	776*10 <sup>6</sup>	2.1%	794*10 <sup>6</sup>	0.13%	793*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	780*10 <sup>6</sup>	1.6%	828*10 <sup>6</sup>	4.4%	
	FreeCad	769*10 <sup>6</sup>	3.2%	----	----	

Tabla 4.2: Tensión principal I en la palanca.

Como se puede ver en la tabla 4.2, se puede mencionar que los tres programas dan valores similares al valor teórico calculado (errores inferiores al 5%), tanto en el análisis sin concentración de tensiones como en el análisis con concentración de tensiones.

Con respecto a la aplicación del mallado local y del control de mallado, Catia proporciona un resultado bueno de esta tensión en ambos casos. Sin embargo, en SolidWorks se puede ver como el error aumenta a un 10,8% y a un 4,4% respecto al valor teórico en el cálculo sin concentración y con concentración de tensiones respectivamente.

#### 4.1.3: Segunda tensión principal

En las figuras 4.14 y 4.15 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la segunda tensión principal que se produce en la palanca. En la primera figura no se tiene en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

El valor de la segunda tensión principal que interesa es el que se da en la sección más crítica, es decir en el cambio de sección más cercano al empotramiento. En este caso el valor que se busca no coincide con el máximo que se visualiza en los gráficos.

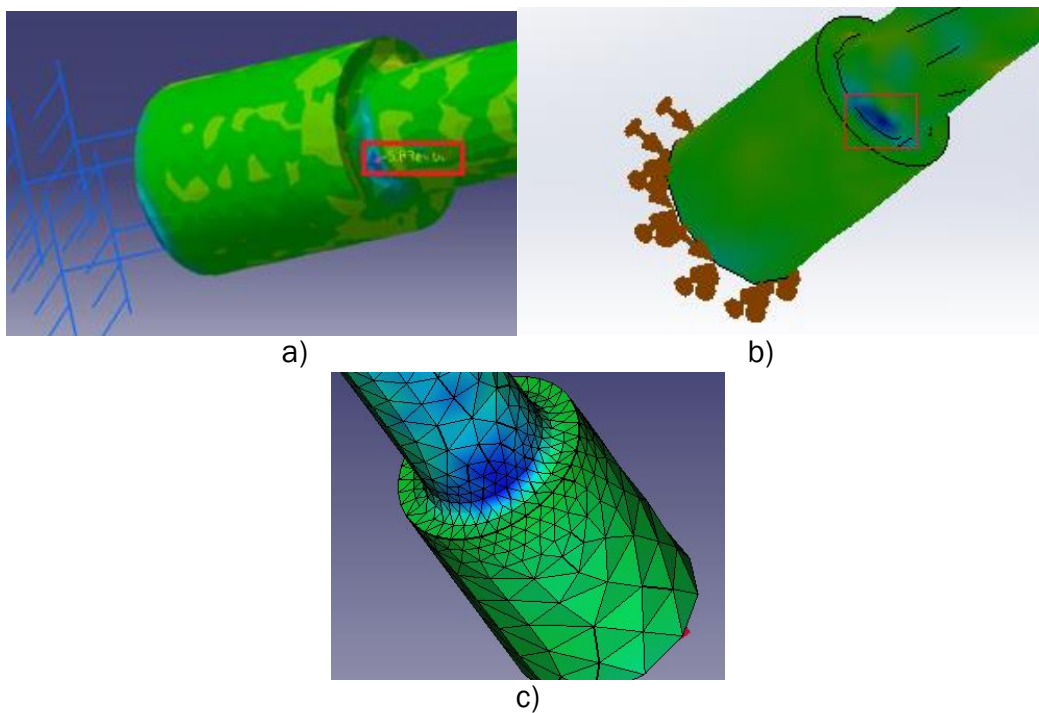


Figura 4.14: Segunda tensión principal sin concentración de tensiones en la palanca: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

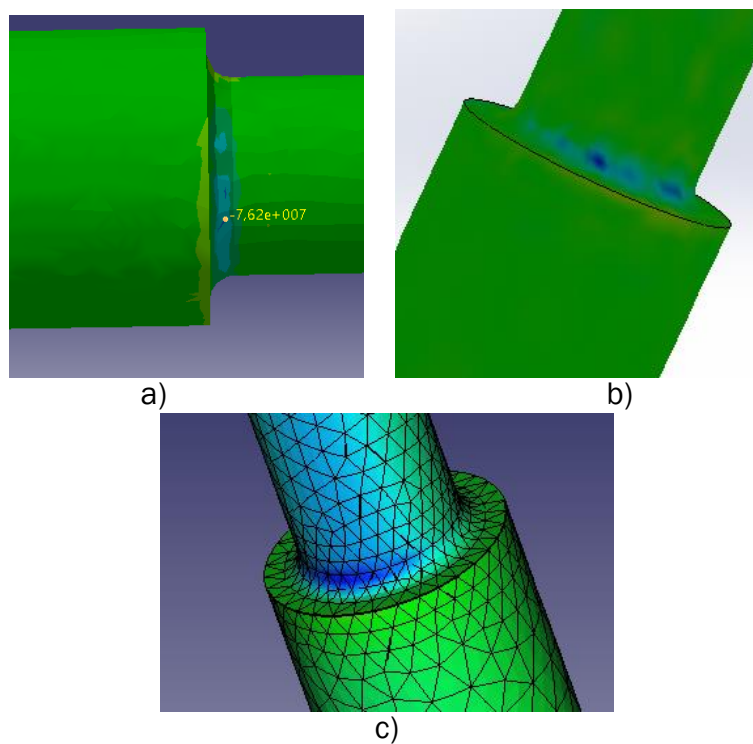


Figura 4.15: Segunda tensión principal con concentración de tensiones en la palanca: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.3 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Tensión principal II (Pa)		Sin Control	Error	Con Control	Error relativo	Valor teórico
Sin concentración	Catia	-58.3*10 <sup>6</sup>	40.8%	-82.1*10 <sup>6</sup>	16.4%	-98.5*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	-67.8*10 <sup>6</sup>	31.2%	-66.15*10 <sup>6</sup>	32.8%	
	FreeCad	----	----	----	----	
Con concentración	Catia	-76,2*10 <sup>6</sup>	38.1%	-75,3*10 <sup>6</sup>	38.8%	-123*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	-80,6*10 <sup>6</sup>	34.4%	-70,2*10 <sup>6</sup>	43%	
	FreeCad	----	----	----	----	

Tabla 4.3: Tensión principal II en la palanca.

Como se puede ver en la tabla 4.3, tanto en Catia como en SolidWorks se obtienen valores negativos para esta tensión, tal y como era de esperar; esto significa que son tensiones de compresión. Sin embargo, el valor que se obtiene, tanto para el cálculo sin concentración como para el cálculo de concentración, son entre un 30% y un 40% inferiores respecto al valor teórico. Al aplicar el mallado local o el control de mallado ocurre lo mismo, es decir proporciona malos resultados.

En FreeCAD no se puede obtener el valor numérico de esta tensión en el lugar deseado ya que solo proporciona el valor máximo y mínimo de esta tensión y no deja buscar el valor en una sección concreta.

#### 4.1.4: Tensión de Von Misses

En las figuras 4.16 y 4.17 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la segunda tensión principal que se produce en la palanca. En la primera figura no se tiene en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

Como se puede ver, los tres programas coinciden en la zona de mayor tensión de Von Misses que se encuentra, como ya se ha mencionado, en el cambio de sección más próximo al empotramiento.

David Martín Rodríguez

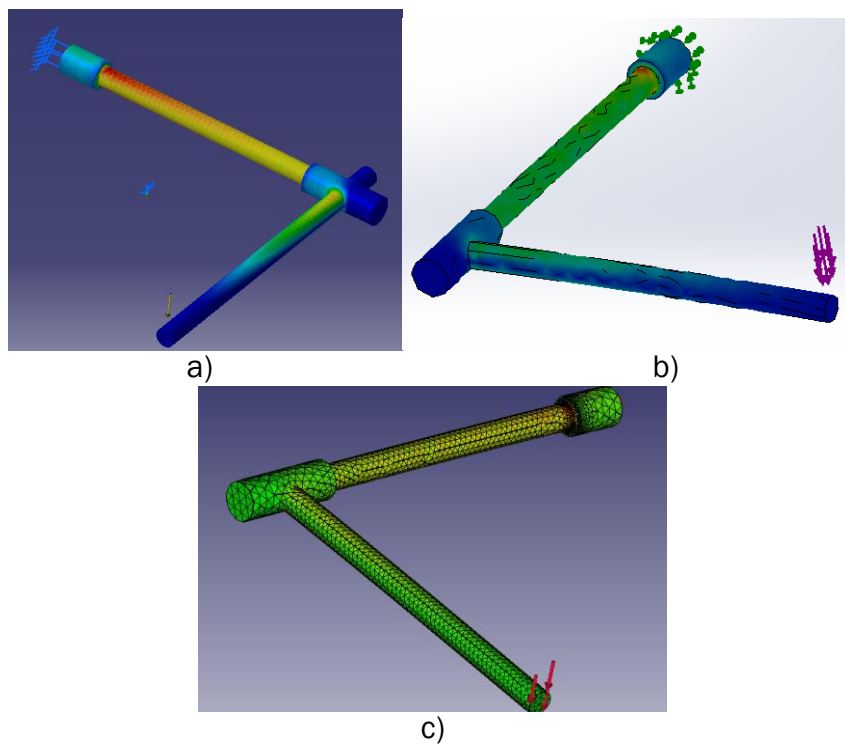


Figura 4.16: Von Misses sin concentración de tensiones en la palanca:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

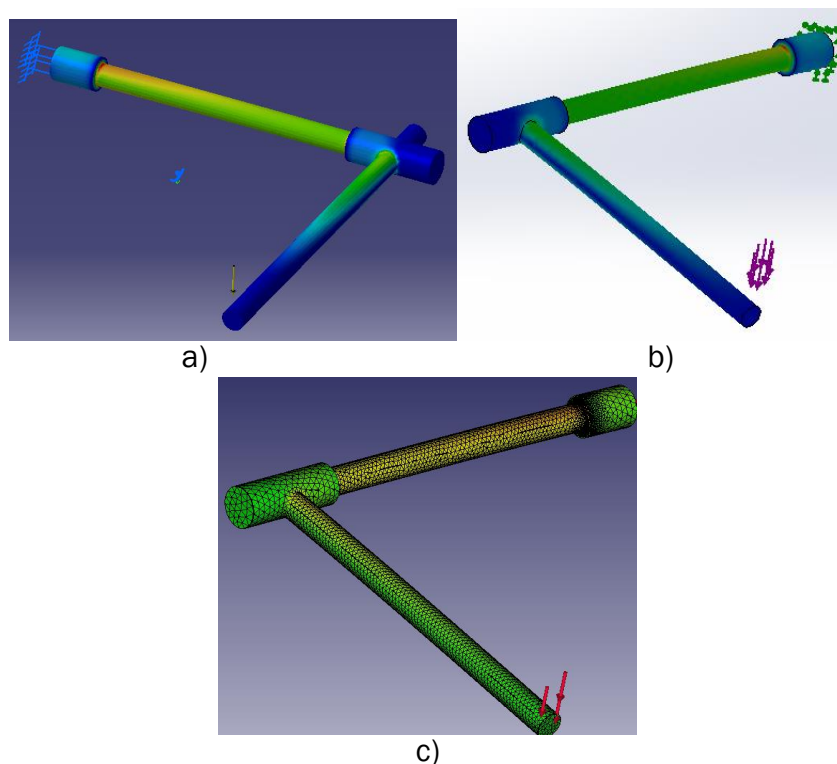


Figura 4.17: Von Misses con concentración de tensiones en la palanca:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.4 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Von Misses (Pa)		Sin Control	Error	Con Control	Error relativo	Valor teórico
Sin concentración	Catia	580*10 <sup>6</sup>	0.25%	603.5*10 <sup>6</sup>	4.3%	578,5*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	578*10 <sup>6</sup>	0.1%	611.2*10 <sup>6</sup>	5.6%	
	FreeCad	559*10 <sup>6</sup>	3.4%	-----	-----	
Con concentración	Catia	777*10 <sup>6</sup>	9.9%	802*10 <sup>6</sup>	6.9%	862*10 <sup>6</sup>
	SolidWorks	786*10 <sup>6</sup>	8.9%	806.8*10 <sup>6</sup>	6.4%	
	FreeCad	750*10 <sup>6</sup>	13%	-----	-----	

Tabla 4.4: Tensión de Von Misses en la palanca.

Como se puede ver en la tabla 4.4, los tres programas dan un buen resultado de la tensión de Von Misses, en el cálculo sin concentración de tensiones, si bien, mencionar, que el valor de FreeCAD es un 5.6% menor. Al aplicar en este caso el mallado local y el control de mallado, los valores se elevan entre un 4% y 5% respecto al teórico.

Con respecto al cálculo con concentración de tensiones, se puede ver que los tres programas da un resultado un 10% aproximadamente menor al calculado teóricamente. Al hacer el mallado local y el control de mallado, el valor sigue siendo inferior, pero se reduce el error a un 6.9% en Catia y a un 6,4% en SolidWorks.

#### 4.1.5: Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos anteriormente, se puede ver que los tres programas dan resultados buenos en el cálculo de deformación estática, primera tensión principal y tensión de Von Misses, en especial cuando se hace el cálculo sin concentración de tensiones, ya que al hacer el análisis con concentración de tensiones, los valores que se obtienen en la tensión de Von Misses son aproximadamente un 10% menores que los teóricos.

Respecto a la segunda tensión principal, solo podemos obtener el valor de esta, en la zona de máxima tensión, en Catia y en SolidWorks. El resultado que proporcionan ambos programas esta entre un 30% y un 40% más bajo que el valor teórico.

Por último, cabe mencionar que al hacer el mallado local en Catia y el control de mallado en SolidWorks los resultados no cambian mucho, en SolidWorks incluso



David Martín Rodríguez

aumenta el error que se comete. Por esto, se deduce que en este ejemplo no hace falta usar estas dos opciones para obtener buenos resultados.

## 4.2: EJE ROTATIVO

Se tiene el eje rotativo sujeto por dos cojinetes de bolas y con una fuerza aplicada de 6800 N, tal y como se muestra en la figura 4.18. El eje es de acero AISI 1050, estirado en frío y acabado a máquina. Se va a hacer un análisis estático de este problema con los tres programas descritos anteriormente.

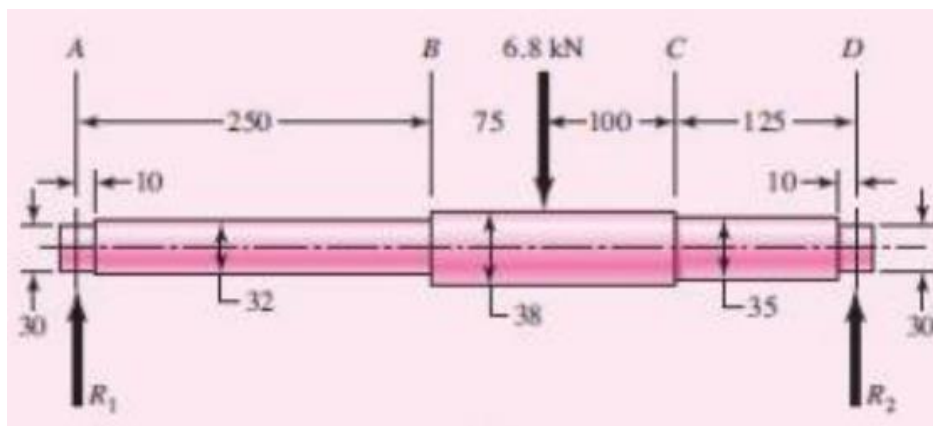


Figura 4.18: Enunciado eje rotativo.

Al igual que en el ejemplo anterior, lo primero que se tiene que hacer es realizar un análisis estático de forma analítica tal y como se muestra a continuación.

En la figura 4.19 se puede ver el diagrama de momentos flectores que produce la fuerza sobre el eje rotativo. Se ve que el momento flector máximo está en el punto de aplicación de la fuerza, pero la sección más cargada será la sección B debido a que tiene un diámetro menor.

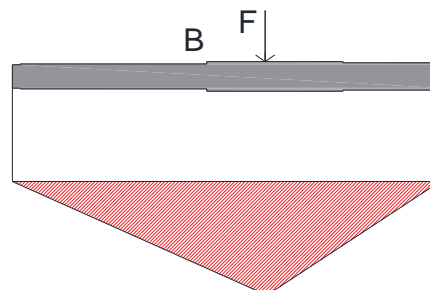


Figura 4.19: Diagrama momento flector del eje rotativo.

$$M_B = 2800 * 0.25 = 700 \text{ Nm}$$



-Sin concentración de tensiones

$$\sigma_{max}^B = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 * 700}{\pi * 0.032^3} = 217 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad \sigma_1 = 217 * 10^6 Pa; \quad \sigma_2 = 0 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = 217 * 10^6 Pa$$

-Con concentración de tensiones

$$K_f = 1.65$$

$$\sigma_x^{cor} = \sigma_{max}^A * K_f = 358 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad \sigma_1 = 358 * 10^6 Pa; \quad \sigma_2 = 0 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = 358 * 10^6 Pa$$

Como se ha visto en los anteriores cálculos, se va a realizar un cálculo sin tener en cuenta la concentración de tensiones y otro con dicha concentración de tensiones. Sin embargo, no se va a hacer un análisis con mallado local o con control de mallado debido a que, como se vio en el ejemplo anterior, no se produce una gran mejora del resultado.

En este ejemplo, como en el anterior, poner la carga, o en este caso la fuerza no tiene mayor complicación en los tres programas. En cambio, en este problema, poner los apoyos tiene una mayor complejidad, por lo que se explicará cómo simular los apoyos de los rodamientos en cada uno de los tres programas.

-En Catia, para simular este tipo de apoyo se usa la herramienta “Smooth Virtual Part” para así hacer que la cara seleccionada se comporte como un sólido rígido y la herramienta “Defined Restraints” para así impedir los movimientos de dicha cara. En la figura 4.20 se muestra cómo se ha configurado la herramienta “Defined Restraints” y el resultado que muestra Catia.

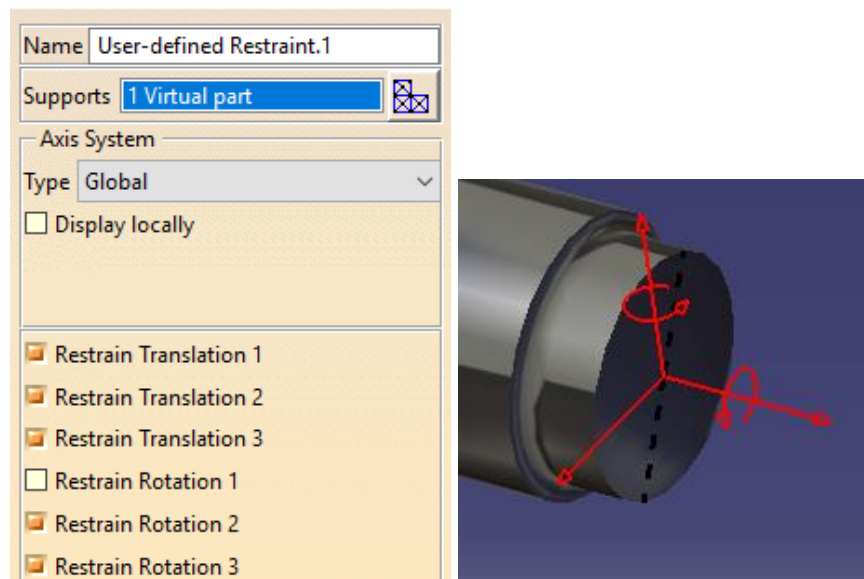


Figura 4.20: Condiciones de contorno en Catia.

-En SolidWorks, para simular este apoyo, primero se deben hacer unas particiones en el eje, en el entorno pieza, en la zona donde se van a colocar después los rodamientos. Una vez hechas estas particiones que se muestran en la figura 4.21, ya en el entorno de simulación, se usa la herramienta “Sujección de rodamiento” que se configura de la forma que se ve en la figura 4.22, y el resultado que se muestra se puede ver en esta misma figura.

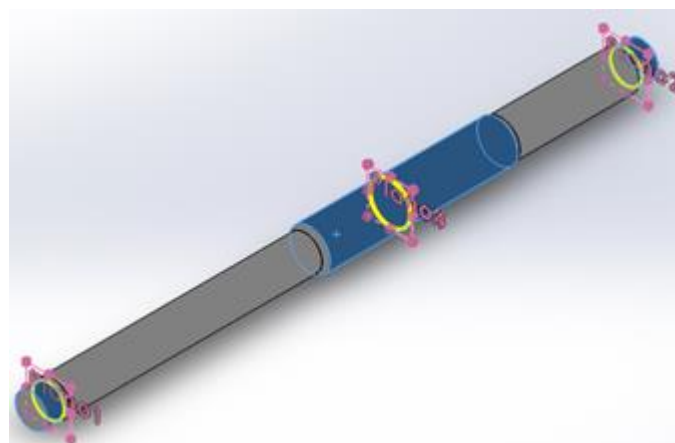


Figura 4.21: Particiones del eje.

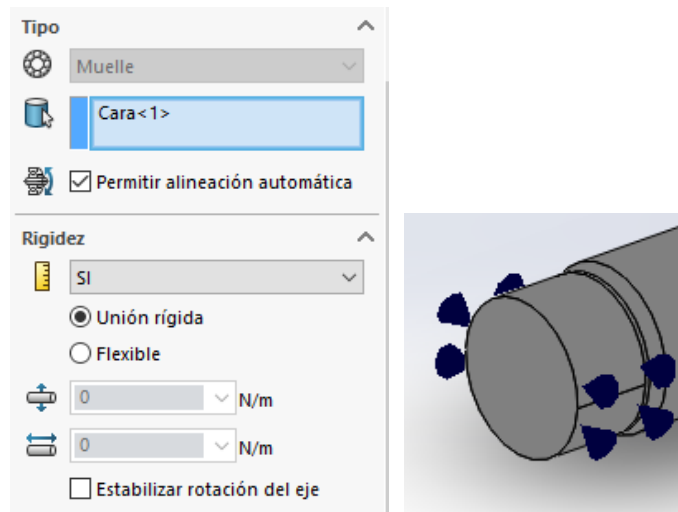


Figura 4.22: Condiciones contorno en SolidWorks.

-En FreeCAD, para simular este apoyo se usa la herramienta “Restricción para el desplazamiento”, pero con alguna peculiaridad. La comprensión y la flexión en el plano xy se restringen en la arista que se observa en la superficie curva del eje, mientras la flexión en el plano xz se restringe en la cara plana. En la figura 4.23 se puede ver cómo se ponen estas restricciones.

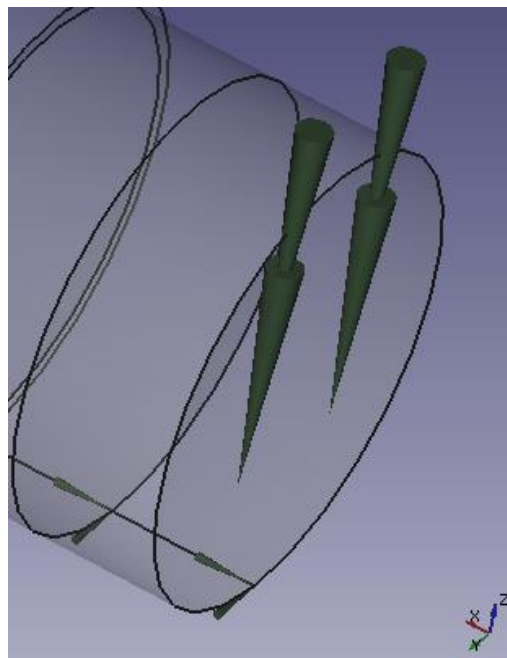


Figura 4.23: Condiciones contorno en FreeCAD.

David Martín Rodríguez

Una vez fijadas las condiciones de contorno y la carga que actúa sobre el eje, se puede observar, en la figura 4.24, cómo queda representado el problema en los tres programas que se van a utilizar para hacer la simulación.

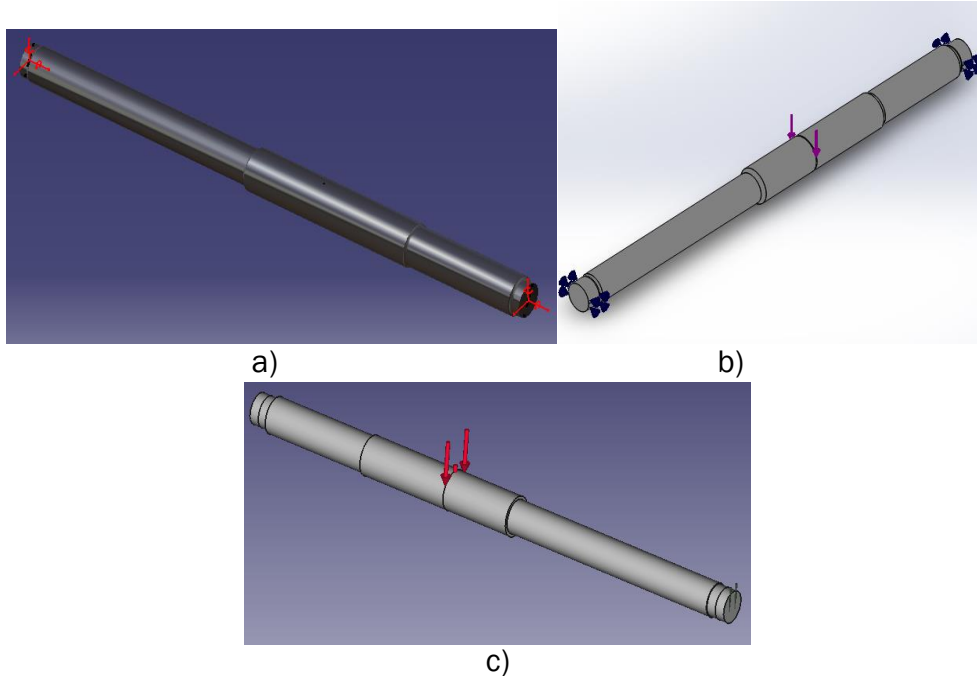


Figura 4.24: Eje rotativo: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

Una vez se tienen fijadas las condiciones de contorno y la carga, el siguiente paso como en todos los análisis, es establecer la malla con la que se va a trabajar. En las figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se pueden ver las mallas que se usan en Catia, SolidWorks y FreeCAD respectivamente. En la imagen de la izquierda se muestra la malla para el análisis sin tener en cuenta la concentración de tensiones y en la imagen de la derecha la malla para el análisis con concentración de tensiones.

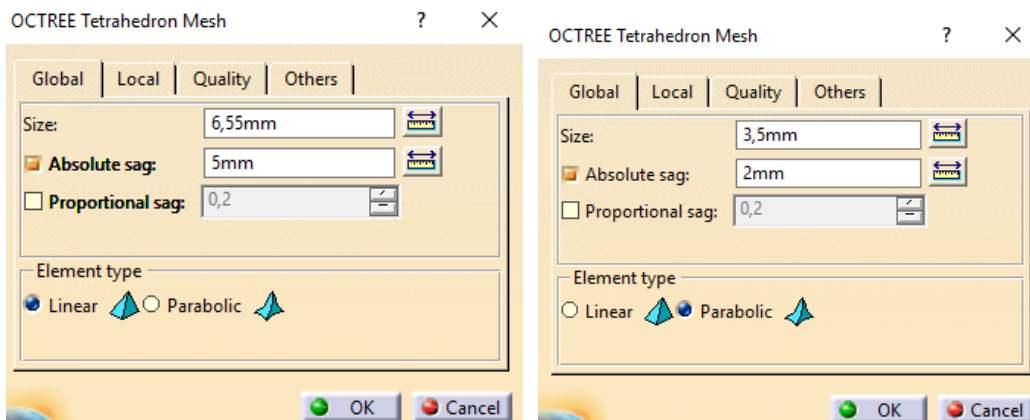


Figura 4.25: Mallas en Catia.

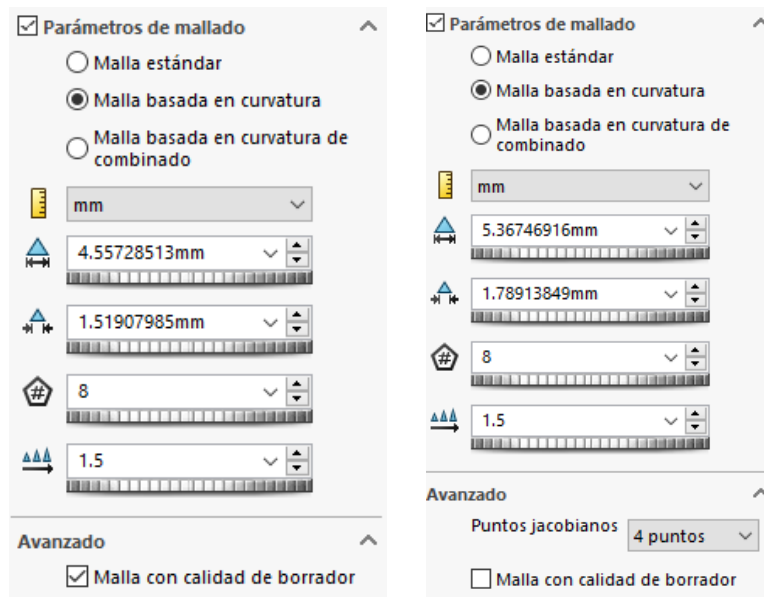


Figura 4.26: Mallas en SolidWorks.

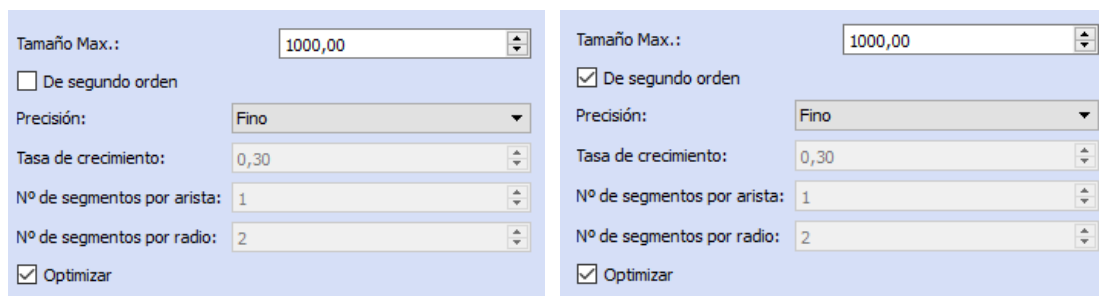


Figura 4.27: Mallas en FreeCAD.

A la vista de las anteriores figuras, se puede ver que en Catia se tiene que hacer la malla más pequeña para hacer el análisis con concentración de tensiones. En SolidWorks, por el contrario, al hacer el análisis con concentración de tensiones se aumenta un poco el tamaño de la malla. Por último, en FreeCAD se usa el mismo tamaño de malla para los dos análisis.

### 4.2.3: Deformación estática

En las figuras 4.28 y 4.29 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de deformación estática que se produce en el eje. En la primera figura no se tiene en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

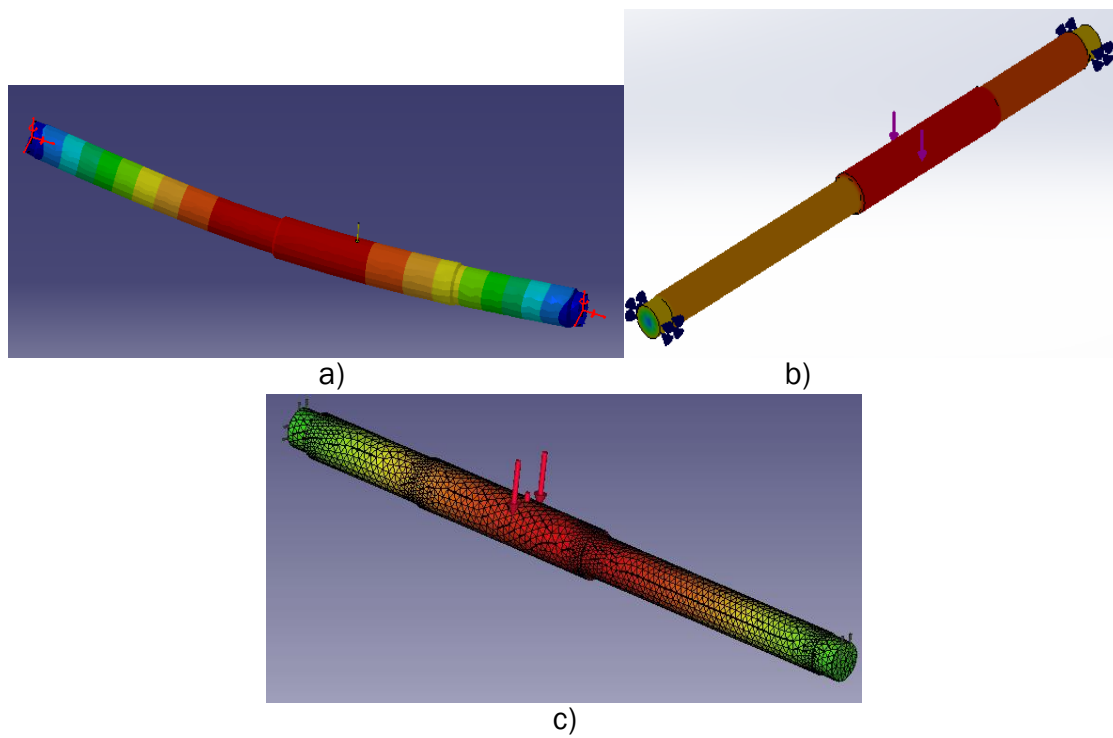


Figura 4.28: Deformación estática sin concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

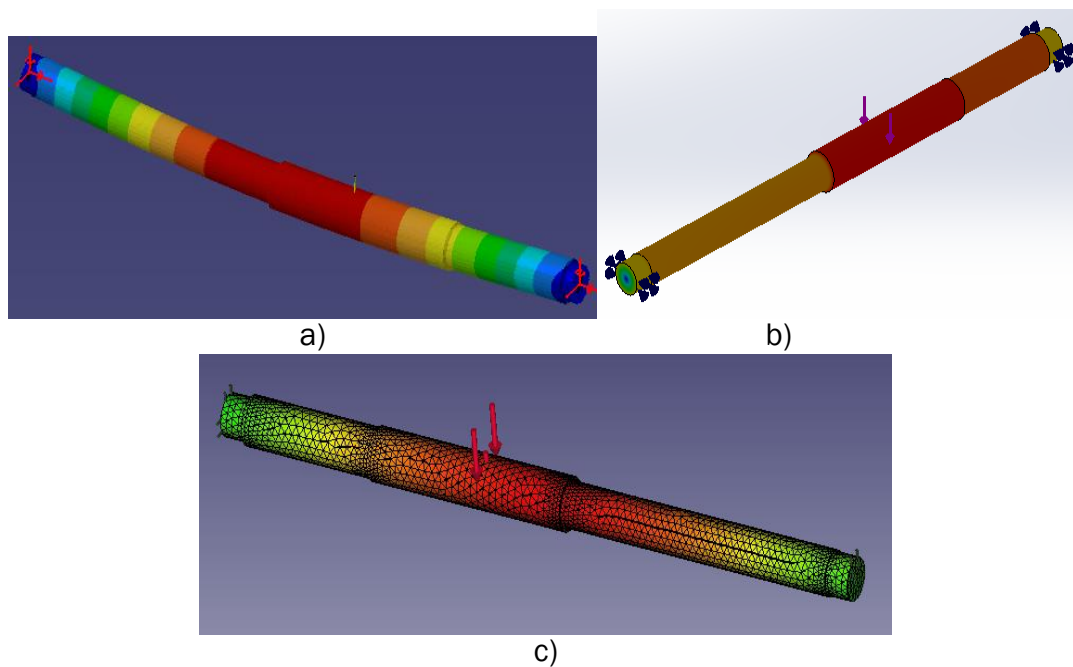


Figura 4.29: Deformación estática con concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.5 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Deformación estática (mm)		
Sin concentración	Catia	1.31
	SolidWorks	1.35
	FreeCad	1.47
Con concentración	Catia	1.45
	SolidWorks	1.4
	FreeCad	1.6

Tabla 4.5: Deformación estática del eje.

Los tres programas, como se pueden ver en las anteriores figuras coinciden en la zona de mayor deformación estática.

En la tabla 4.5 se puede ver que, tanto Catia como SolidWorks dan resultados parecidos en los dos análisis. En cuanto a FreeCAD, proporciona unos resultados un poco mayores, pero que se pueden dar por buenos.

#### 4.2.2: Primera tensión principal

En las figuras 4.30 y 4.31 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la primera tensión principal que se produce en el eje. En la primera figura, igual que antes, no se tendrá en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

Como se puede ver, los tres programas coinciden en la zona de máxima tensión, que coincide con el cambio de sección B en el eje.



David Martín Rodríguez

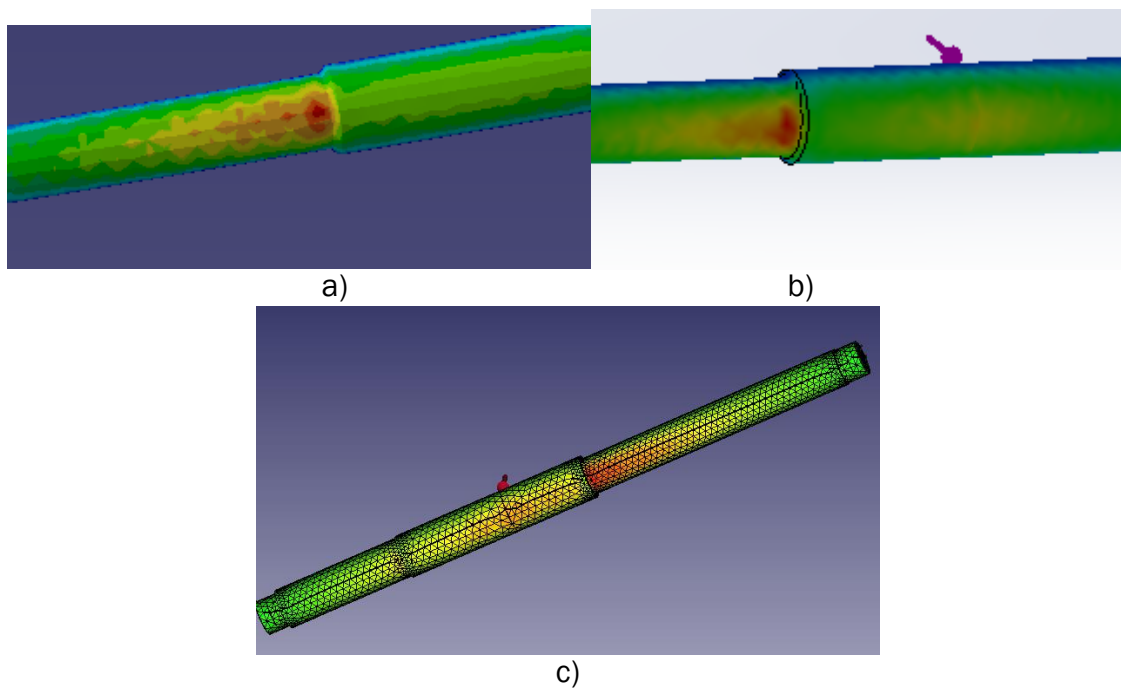


Figura 4.30: Primera tensión principal sin concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

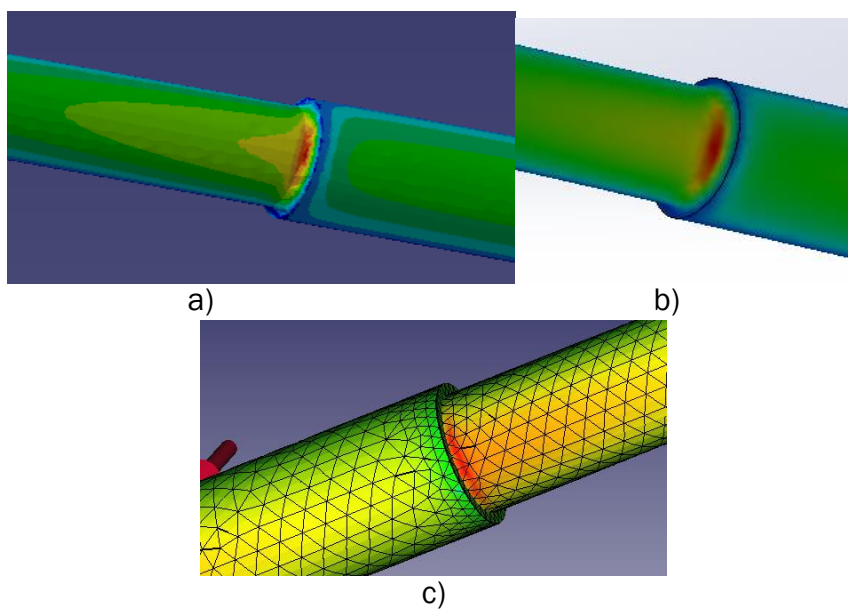


Figura 4.31: Primera tensión principal con concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En la tabla 4.6 se pueden ver los resultados que proporciona cada programa para así poder compararlos.

Tensión principal I (Pa)		Valor teórico	Error relativo
Sin concentración	Catia	$215 \cdot 10^6$	0.9%
	SolidWorks	$219 \cdot 10^6$	0.9%
	FreeCad	$213 \cdot 10^6$	1.8%
Con concentración	Catia	$353 \cdot 10^6$	1.4%
	SolidWorks	$351 \cdot 10^6$	2%
	FreeCad	$311 \cdot 10^6$	13.1%

Tabla 4.6: Tensión principal I en el eje.

En la tabla 4.6 se puede ver que para el cálculo sin concentración de tensiones, los tres programas dan resultados parecidos entre sí y que son prácticamente iguales al valor teórico calculado analíticamente (error inferior al 2%).

Con respecto al cálculo con concentración de tensiones, Catia y SolidWorks da resultados parecidos valor teórico (error inferior al 2%). Sin embargo, FreeCAD da un valor un 13,1% inferior al valor teórico, pero que también puede darse por bueno.

### 4.2.3: Segunda tensión principal

En las figuras 4.32 y 4.33 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la segunda tensión principal que se produce en el eje. En la primera figura, igual que antes, no se tendrá en cuenta la concentración de tensiones y en la segunda figura sí.

Para el análisis estático interesa el valor de esta tensión en la zona de máxima tensión, que se encuentra, como ya se ha visto anteriormente, en el cambio de sección B del eje.

David Martín Rodríguez

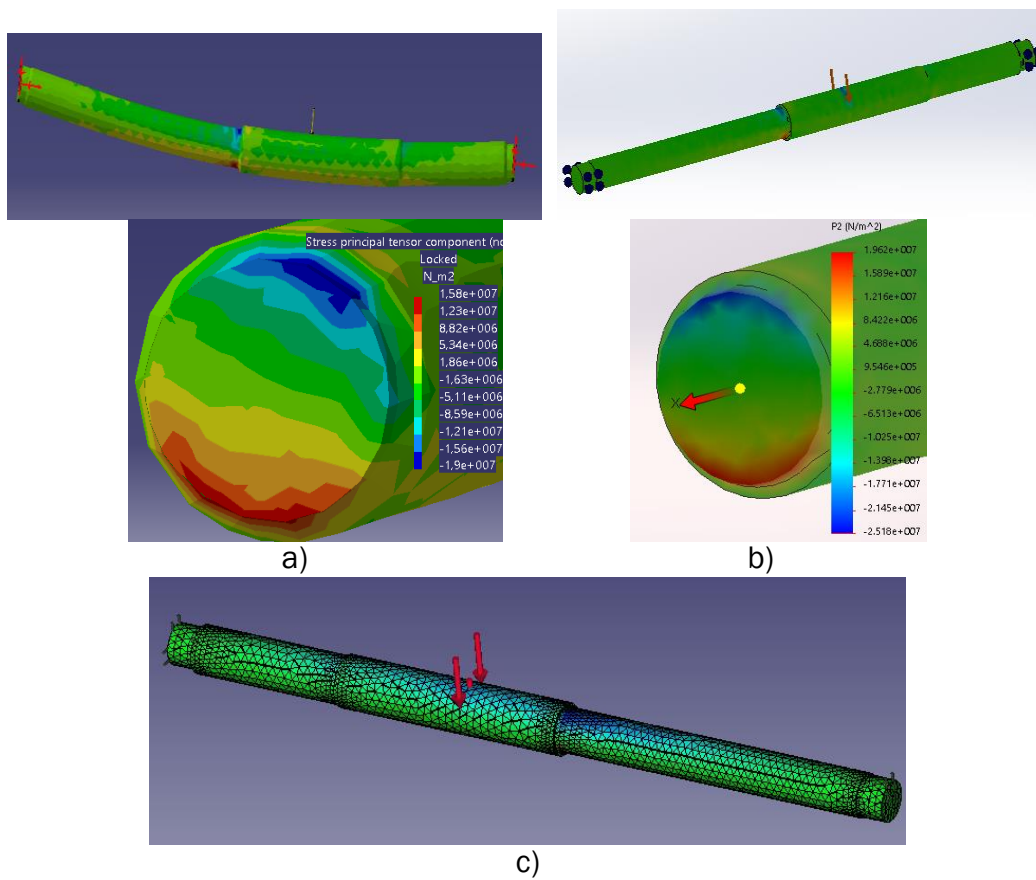


Figura 4.32: Segunda tensión principal sin concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

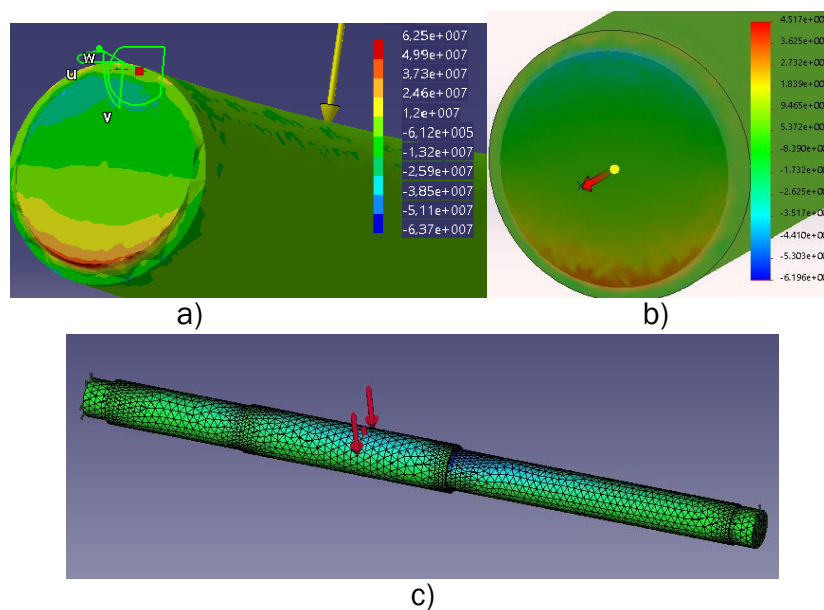


Figura 4.33: Segunda tensión principal con concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

En esta sección, la segunda tensión principal debe tomar un valor de 0 Pa, sin embargo en las anteriores figuras se puede ver que en la sección B en ninguno de los programas toma este valor.

En Catia y en SolidWorks resulta más fácil buscar los valores que toma esta tensión en esta sección B, en cambio con FreeCAD no se puede sacar el valor en esta zona.

Lo que sí se puede comparar, es que los tres programas proporcionan un mapa de color similar para el cálculo de esta tensión.

#### 4.2.4: Tensión de Von Misses

En las figuras 4.34 y 4.35 se pueden ver los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la tensión de Von Misses en un análisis sin concentración de tensiones y en otro con concentración de tensiones respectivamente.

Como se puede ver en las imágenes, los tres programas dan de forma correcta la sección de máxima tensión.

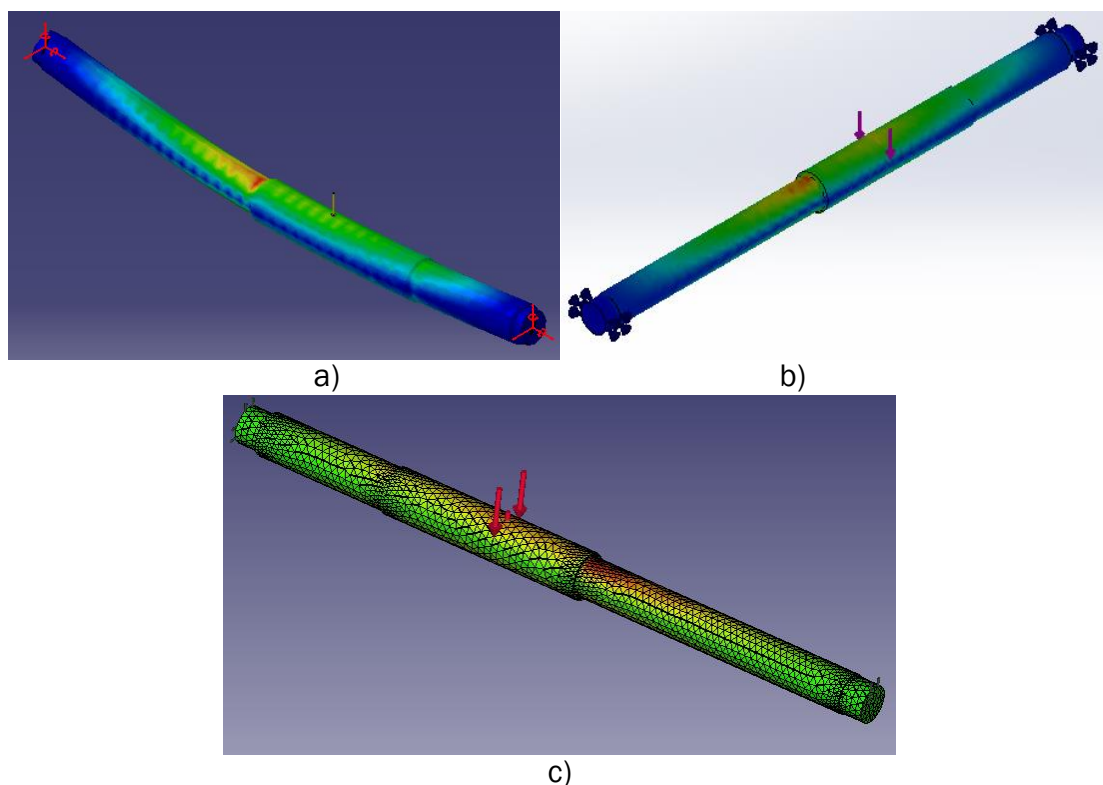


Figura 4.34: Tensión de Von Misses sin concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

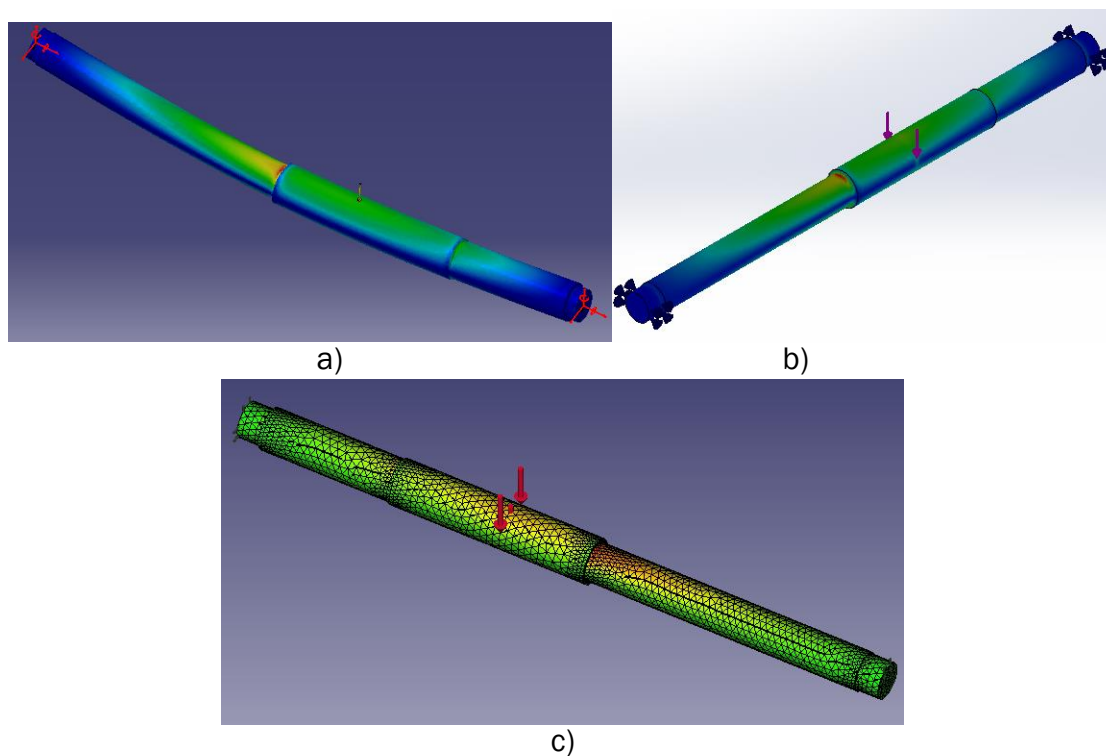


Figura 4.35: Tensión de Von Mises con concentración de tensiones en el eje:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

En la tabla 4.7 se pueden ver los resultados que proporcionan los diferentes programas y así compararlos.

Von Mises (Pa)			Valor teórico	Error relativo
Sin concentración	Catia	$207 \cdot 10^6$	$217 \cdot 10^6$	4.6%
	SolidWorks	$212 \cdot 10^6$		2.4%
	FreeCad	$201,7 \cdot 10^6$		7.1%
Con concentración	Catia	$300 \cdot 10^6$	$358 \cdot 10^6$	16.2%
	SolidWorks	$290 \cdot 10^6$		18%
	FreeCad	$283 \cdot 10^6$		20%

Tabla 4.7: Tensión de Von Mises en el eje.



Como se puede ver en la tabla 4.7, los tres programas dan buenos resultados en el cálculo sin concentración de tensiones, errores en Catia y en SolidWorks inferiores al 5% mientras en FreeCAD da un error del 7,1%. Sin embargo, en el cálculo con concentración de tensiones, en los tres casos el resultado está entre un 15% y un 20% menor al calculado teóricamente.

#### 4.2.5: Conclusiones

Como se ha visto, este ejemplo tiene una forma más compleja para establecer las condiciones de contorno que el anterior ejemplo realizado. Tanto en Catia como en FreeCAD, el apoyo de los rodamientos, se simula restringiendo grados de libertad. Sin embargo, SolidWorks cuenta con una herramienta específica para simular este apoyo de una forma más sencilla.

En cuanto a los resultados, se puede observar que los tres programas proporcionan resultados buenos y similares entre sí en el cálculo de deformación estática, primera tensión principal y tensión de Von Misses. Mencionar que los tres programas dan resultados parecidos al teórico en el cálculo sin concentración de tensiones, pero que como sucedió en el ejemplo anterior, en el cálculo con concentración de tensiones, los resultados cometen un error mayor, en especial la tensión de Von Misses, donde son entre un 15% y un 20% inferiores al valor teórico.

Con respecto a la segunda tensión principal, como se ha mencionado anteriormente, los tres programas ofrecen un resultado parecido, pero en ningún caso toma el valor de 0 Pa en la sección B.

### 4.3: MOMENTO TORSOR

En este ejemplo se va a ver cómo aplicar un momento torsor, ya que este tipo de carga es muy utilizada en el diseño de mecanismos y de máquinas.

El ejemplo que se va a realizar consistirá en aplicar un momento torsor de 500Nm sobre la barra en voladizo de la pieza de acero que se muestra en la figura 4.36.

David Martín Rodríguez

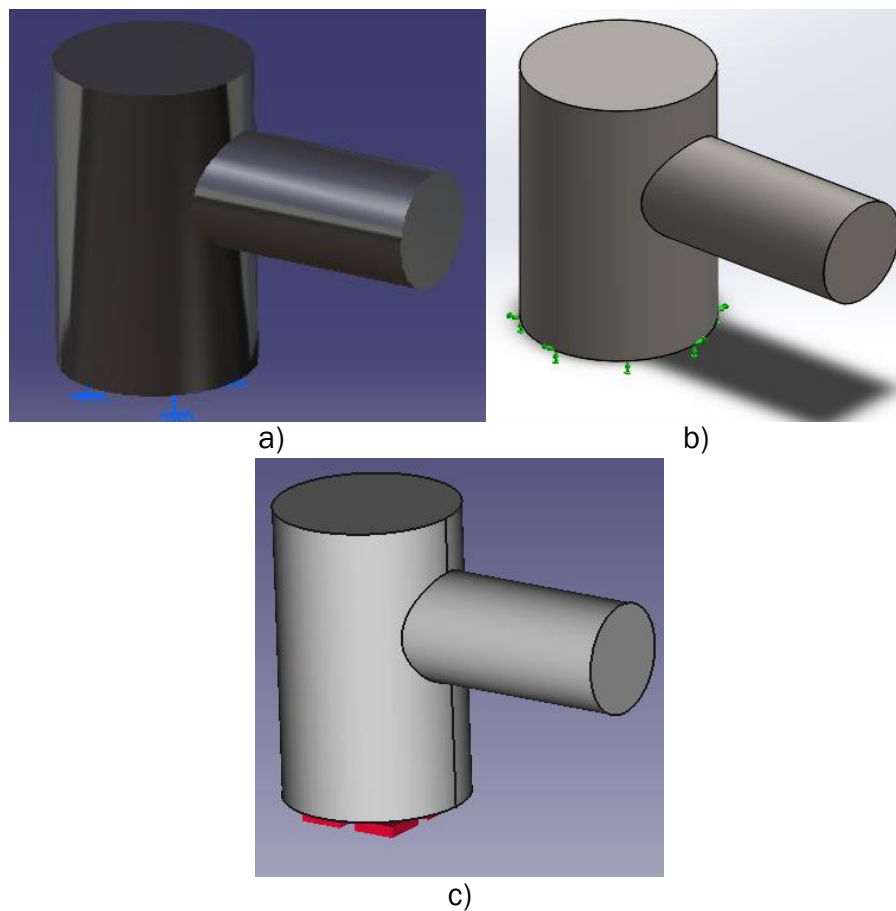


Figura 4.36: Pieza para momento torsor: a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

Tanto en Catia como en SolidWorks, la forma de aplicar este tipo de carga, momento torsor, es similar a la forma de aplicar las fuerzas y se encuentra explicado en el capítulo 3 de este trabajo, donde se describen las diferentes herramientas de cada programa. En la figura 4.37 se puede ver como se representa, tanto en Catia como en SolidWorks, este momento es de 500 Nm.

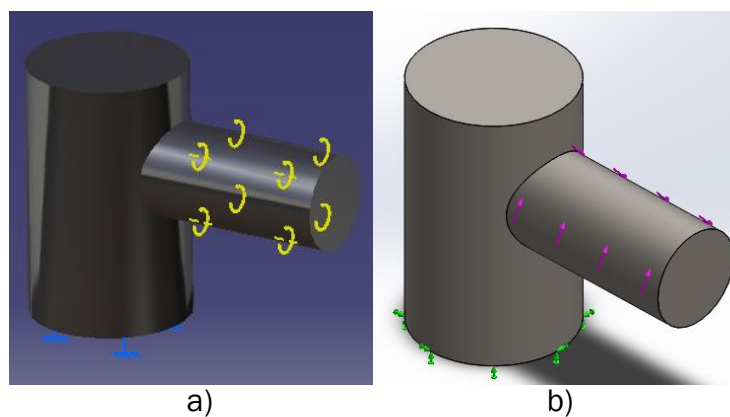


Figura 4.37: Momento torsor: a) Catia b) SolidWorks.

En FreeCAD, como ya se comentó en el capítulo 3, aplicar un momento torsor no es tan sencillo como en Catia o en SolidWorks, ya que no cuenta con una herramienta específica para ello.

Para aplicar este momento se aplicará primero una fuerza sobre la superficie que se desea aplicar el momento y seguidamente, como ya se comentó anteriormente, se hace un cambio a coordenadas cilíndricas con la herramienta “Transformar una cara”. En este caso lo que se transforma es una fuerza y el resultado se muestra en la figura 4.38.

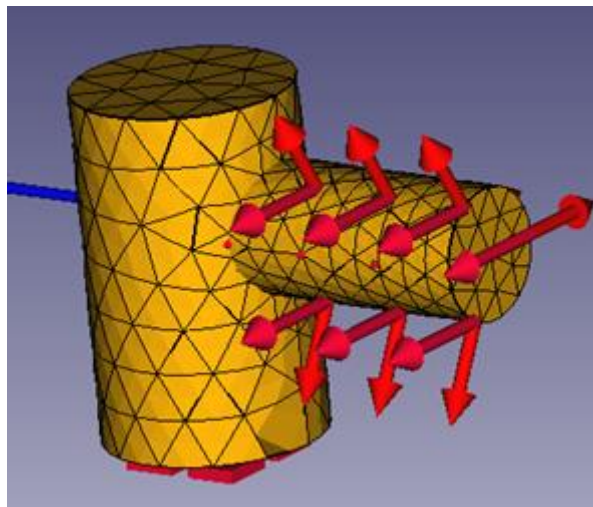


Figura 4.38: Momento torsor en FreeCAD.

Otro aspecto importante a la hora de poner un momento en FreeCAD, es ver qué valor hay que dar a la fuerza para que así los resultados sean los esperados, pero antes de hacer esto, se van a ver cómo son los resultados gráficos que proporcionan los tres programas para el cálculo de la deformación estática (Figura 4.39) y de la tensión de Von Mises (Figura 4.40).



David Martín Rodríguez

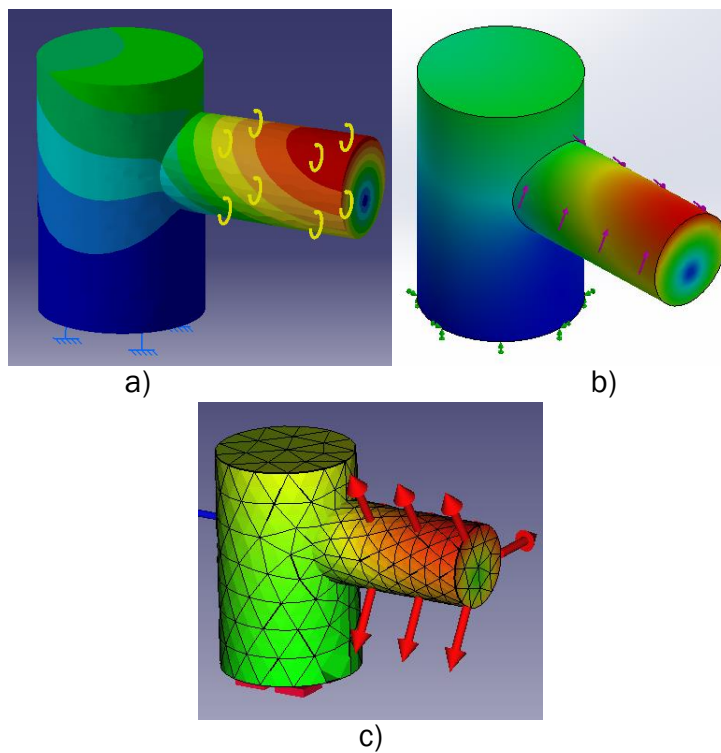


Figura 4.39: Deformación estática debida al momento:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.

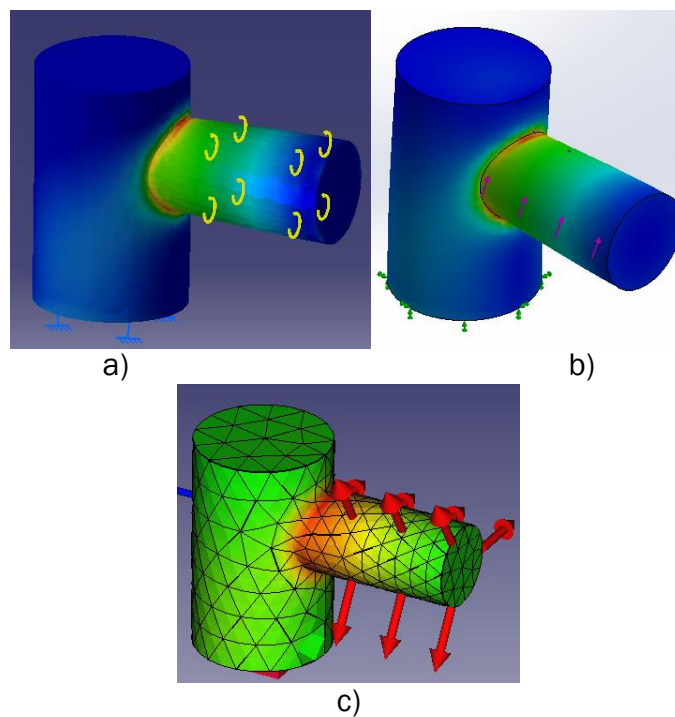


Figura 4.40: Tensión de Von Mises debida al momento:  
a) Catia b) SolidWorks c) FreeCAD.



En las dos figuras anteriores, se puede ver que los tres programas ofrecen soluciones muy parecidas en lo que se refiere a los resultados gráficos que proporcionan. En todos los programas se ve que la deformación estática máxima se encuentra en el extremo superior de la superficie donde se aplica el momento y que la zona de máxima tensión de Von Misses se encuentra en el punto de unión entre las dos barras.

A continuación, se van a ver los resultados numéricos que proporcionan los tres programas al aplicar un momento de 500 Nm (Tablas 4.8 y 4.9). En el caso de FreeCAD se aplicará una fuerza de 500 N, la cual después se transformará a coordenadas cilíndricas.

Deformación estática (mm)	
Catia	0.058
SolidWorks	0.059
FreeCad	0.00085

Tabla 4.8: Deformación estática debida al momento.

Von Misses (Pa)	
Catia	$265 \cdot 10^6$
SolidWorks	$252 \cdot 10^6$
FreeCad	$2.74 \cdot 10^6$

Tabla 4.9: Tensión de Von Misses debida al momento.

Como se puede observar en las anteriores tablas, tanto Catia como SolidWorks dan resultados muy parecidos entre sí para el análisis estático con momentos torsores.

Sin embargo, FreeCAD al aplicar una fuerza de 500 N y hacer la transformación da resultados muy inferiores a los que proporcionan los otros dos programas. Se puede ver que en ambos casos los resultados son de un orden de  $10^2$  más inferiores que en los otros dos programas. Debido a esto se volverá a realizar este estudio en FreeCAD, pero ahora con una fuerza de 50000 N. Los resultados se pueden ver en las tablas 4.10 y 4.11.

Deformación estática (mm)	
Catia	0.058
SolidWorks	0.059
FreeCad	0.085

Tabla 4.10: Deformación estática debida al momento.

Von Misses (Pa)	
Catia	$265 \cdot 10^6$
SolidWorks	$252 \cdot 10^6$
FreeCad	$274 \cdot 10^6$

Tabla 4.11: Tensión de Von Misses debida al momento.

Ahora sí se puede observar en las anteriores tablas, que aunque los valores en FreeCAD son algo mayores a los que proporcionan los otros programas, todos son del mismo orden de magnitud.

En definitiva, con este ejemplo se puede ver que la forma de aplicar un momento en Catia y en SolidWorks es sencilla y que proporciona resultados parecidos, pero en FreeCAD es más complicado aplicar un momento torsor y para obtener los mismos resultados se tiene que aplicar una fuerza  $10^2$  mayor que la del momento que se desea aplicar. Esto se ha comprobado en este mismo ejemplo aplicando un momento de 1000 Nm y en una barra empotrada y se ha comprobado que en todos casos hay que poner una fuerza 100 veces mayores que el momento deseado. Esto hace pensar que existe un error de programación al realizar el cálculo que obliga a poner una fuerza 100 veces mayor.



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

### 5.1: COMPARATIVA ENTRE LOS TRES PROGRAMAS

En este apartado se va a hacer una comparativa entre los tres programas que se han utilizado, en los ejemplos anteriores, para llevar a cabo una simulación que permita realizar un análisis de diferentes piezas sometidas a diferentes acciones externas estáticas.

Los programas utilizados han sido Catia V5, SolidWorks 2017 y FreeCAD 0.18. Como ya se ha comentado anteriormente, se trata de tres programas de diseño 3D, que tienen incorporado un módulo para realizar análisis estáticos. Tanto Catia como SolidWorks son programas comerciales que pertenecen a Dassault Systems. Por el contrario, FreeCAD, como ya se ha comentado, es un programa de libre distribución.

Para realizar esta comparativa entre los tres programas, se comparará entre la forma de aplicar el material, las restricciones, la carga, introducir la malla y los resultados que ofrecen.

#### a) Materiales

Catia ofrece un catálogo amplio de familias de materiales, donde se puede modificar de manera sencilla las propiedades de estos materiales y así obtener materiales con las propiedades deseadas.

SolidWorks ofrece un catálogo mucho más amplio de materiales como se ha podido ver en el capítulo 3. También permite cambiar las propiedades de una forma sencilla.

FreeCAD ofrece un catálogo bueno en lo referente a tipos de aceros, pero cuenta con pocos materiales de otras familias como plásticos, aluminio...

#### b) Restricciones

Catia permite fijar de una manera sencilla los empotramientos. Para otro tipo de restricciones, se debe restringir los grados de libertad. La complicación no está en restringir estos grados de libertad en el programa, sino que se debe analizar previamente qué grados de libertad se deben impedir y cuales no para conseguir la restricción deseada.

SolidWorks ofrece la posibilidad de elegir entre un número mayor de restricciones. Esto hace que en SolidWorks sea más sencillo aplicar restricciones sin tener que pensar en qué grados de libertad hay que impedir.



FreeCAD, al igual que Catia, permite fijar un empotramiento de manera sencilla y simular el resto de apoyos mediante grados de libertad. Como se ha visto en el ejemplo “Eje Rotativo”, restringir los movimientos en FreeCAD es más complicado. También cabe mencionar, que cuenta con alguna restricción que se encuentra en desarrollo tal y como se ha visto en el capítulo 3.

#### c) Cargas

Catia permite aplicar una gran variedad de cargas. En este trabajo se han aplicado fuerzas y momentos. En cuanto a las fuerzas, se pueden aplicar fuerzas distribuidas y fuerzas puntuales. Estas últimas son las que se han usado en este trabajo.

SolidWorks, al igual que Catia, permite aplicar una gran variedad de cargas como fuerzas y momentos que son las que se usarán en este trabajo. Con SolidWorks se tienen que usar fuerzas distribuidas, ya que aunque se pueden aplicar fuerzas puntuales, los resultados que se obtienen no son los esperados tal y como se vio en el capítulo 3.

FreeCAD ofrece un catálogo de cargas algo inferior a los otros dos programas. Solo permite usar fuerzas distribuidas y no cuenta con una herramienta para aplicar momentos torsores, sino que como se ha explicado en los capítulos 3 y 4, se debe hacer un cambio a coordenadas cilíndricas sobre una fuerza. Esto hace que aplicar un momento torsor en FreeCAD sea más complicado. También hay que mencionar que el valor de la fuerza que se aplica debe ser 100 veces superior al valor que se desea para el momento torsor, tal y como se ha visto en el ejemplo del capítulo anterior.

#### d) Mallado

Catia permite hacer una malla personalizada de manera sencilla, dando a elegir entre una malla lineal o una malla parabólica y permitiendo elegir el tamaño de los elementos de dicha malla. Además, permite hacer un mallado local en una determinada zona en la que se desea conseguir una mayor precisión.

SolidWorks, al igual que Catia, permite personalizar la malla de forma sencilla, permitiendo elegir el tamaño de los elementos de la malla, trabajar con elementos de primer o segundo orden y permitiendo hacer un control de mallado para así obtener más precisión en una determinada zona.

FreeCAD también permite configurar de forma sencilla la malla con la que se va a trabajar. Sin embargo, no permite elegir el tamaño que se desea en los elementos, sino que proporciona unas opciones determinadas. Tampoco permite realizar un mallado más preciso en una determinada zona de la pieza.

### e) Resultados que se obtienen

Catia proporciona unos buenos resultados en cuanto a deformaciones y tensiones en comparación con los resultados teóricos, a excepción de la segunda tensión principal. Cuenta con una buena calidad gráfica para visualizar estos resultados y permite además de poder localizar los valores máximos y mínimos, hacer secciones en los resultados para así poder ver mejor los resultados en una determinada zona. También permite ver el resultado numérico, de deformación o de tensiones, de cada elemento de la malla, situando el ratón sobre la zona deseada.

SolidWorks ofrece una mayor variedad de resultados de deformaciones y de tensiones, tal y como se pudo ver en el capítulo 3. Comparando los resultados que se obtienen en este programa con los teóricos, se puede observar que los resultados son parecidos, es decir, son buenos en el cálculo de deformaciones y de tensiones, a excepción de la segunda tensión principal. SolidWorks cuenta con una buena calidad de visualización de los resultados y al igual que Catia permite hacer secciones para observar mejor determinadas zonas. Además, SolidWorks permite buscar de una mejor forma el valor numérico de deformaciones o tensión, en los elementos que forman la malla, ya que cuenta con una herramienta para identificar los valores como se ha visto en el capítulo 3.

FreeCAD proporciona también unos buenos resultados de deformaciones y tensiones en comparación con los teóricos, aunque con un error algo mayor. Con este programa solo se puede ver el valor máximo y mínimo y no permite buscar el valor numérico en una determinada zona. Esto hace que no se pueda obtener el valor de la segunda tensión principal en la zona de máxima tensión. Al observar los resultados, se puede ver que la calidad del mapa de color que se ofrece es de una calidad gráfica inferior a la que proporcionan los otros dos programas.

También se ha observado en los ejemplos realizados en el capítulo 4, que al hacer muy pequeños los elementos de la malla, los resultados de tensiones, tanto la primera tensión principal como la de Von Mises, elevan mucho su valor.

## 5.2: CONCLUSIONES

En este trabajo se ha buscado un programa de simulación de análisis estático para su uso en la asignatura Diseño de Máquinas del Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Valladolid.

Para poder elegir un programa adecuado, se han perseguido una serie de objetivos que se marcaron en el capítulo 1. Una vez realizado el trabajo, en este apartado se van a mostrar las conclusiones a las que han conducido los objetivos marcados y el desarrollo del propio trabajo.



Cómo se ha visto en el capítulo 1, la mayoría de las universidades españolas y europeas incluyen una carga docente de simulación dentro de las asignaturas equivalentes a Diseño de Máquinas. Esto hace que sea muy interesante para la Universidad de Valladolid la introducción de unas prácticas de simulación en años posteriores dentro de esta asignatura.

Se han buscado tres softwares de simulación y se ha hecho un manual, para realizar diferentes análisis estáticos, donde se explican las diferentes herramientas de cada programa.

El objetivo principal de este trabajo era comparar entre varios programas de simulación para el análisis estático, en este caso Catia V5, SolidWorks 2017 y FreeCAD 0.18, y elegir uno para su uso en la asignatura Diseño de Máquinas.

En el anterior apartado de este capítulo (Comparativa entre los tres programas) se han visto las características, de cada programa, en cada paso que hay que seguir para hacer la simulación.

En definitiva, se puede decir que los tres programas han demostrado que pueden ser aptos para realizar análisis estáticos. A continuación, se van a mencionar los pros y los contras de cada programa para ser usado en la asignatura de Diseño de Máquinas.

FreeCAD cuenta con la ventaja de que es un programa de libre distribución. Sin embargo, en los análisis realizados se ha visto que es un programa que aún está en desarrollo. Este hecho, de que aún este en desarrollo, hace que sea complicado poner alguna condición de contorno o alguna carga como los rodamientos o los momentos torsores. Además, FreeCAD no permite obtener los resultados numéricos en una determinada sección del análisis.

Catia es un buen programa para el análisis estático y cuenta con la ventaja de que los alumnos ya se encuentran familiarizados con este programa. Permite realizar diferentes análisis, aunque a la hora de establecer las condiciones de contorno, antes hay que ver que grados de libertad se van a restringir.

SolidWorks es un programa con el que los alumnos no están familiarizados, pero su manejo no es muy diferente al de Catia y puede ser interesante que los alumnos se acostumbren a trabajar con diferentes programas. En cuanto a los análisis estáticos, es el programa que más herramientas proporciona y el que más resultados ofrece. Esto hace que SolidWorks sea el programa más interesante para realizar análisis estáticos.

En definitiva, FreeCAD puede que sea un buen programa cuando este desarrollado por completo, pero por el momento no es el programa más completo para realizar análisis estáticos. Por el contrario, Catia y SolidWorks sí son programas que están



David Martín Rodríguez

bien desarrollados para el análisis estático, a excepción del cálculo de la segunda tensión principal. Catia cuenta con la ventaja de que es el programa con el que está familiarizada la Universidad de Valladolid y aunque sería un programa perfectamente válido para realizar análisis estáticos, el programa más completo y más interesante para realizar este tipo de análisis sería SolidWorks.

### 5.3: LÍNEAS FUTURAS

Cómo líneas futuras, este proyecto docente puede continuarse buscando otros programas que permitan realizar análisis estáticos, investigar cómo hacer análisis estáticos sobre conjuntos de piezas ensamblados con los tres programas que se han utilizado.

Además se puede estudiar cómo hacer, con estos programas, otro tipo de análisis de gran interés dentro de la ingeniería, como es el análisis a fatiga.





## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Rubio, Análisis del uso de Catia V5 para simular problemas de comportamiento mecánico, Trabajo Fin de Grado 2017.
- [2] M. de la Hoz, Simulación en Catia V5 de problemas de fallo estático en elementos de máquinas, Trabajo Fin de Grado 2017.
- [3] L. del Val, M.Herráez, M.A. Martín, F. Romano, Apuntes de la asignatura Diseño de Máquinas. Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Curso 2015-2016.
- [4] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Octava edición, Mc Graw Hill 2008.

### Referencias Web

- [W1] EEES (Espacio Europeo de Educación Superior)  
<http://www.eees.es/es/universidades>
- [W2] Guía docente Diseño de Máquinas, U. Valladolid  
[https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2017/455/42618/1/Documento.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2017/455/42618/1/Documento.pdf)
- [W3] Guía docente Diseño de Máquinas I, U. Politécnica de Madrid  
[https://www.upm.es/comun\\_gauss/publico/guias/2017-18/1S/GA\\_56IM\\_565000354\\_1S\\_2017-18.pdf](https://www.upm.es/comun_gauss/publico/guias/2017-18/1S/GA_56IM_565000354_1S_2017-18.pdf)
- [W4] Guía docente Diseño de Máquinas II, U. Politécnica de Madrid  
[https://www.upm.es/comun\\_gauss/publico/guias/2016-17/2S/GA\\_56IM\\_565000364\\_2S\\_2016-17.pdf](https://www.upm.es/comun_gauss/publico/guias/2016-17/2S/GA_56IM_565000364_2S_2016-17.pdf)
- [W5] Guía docente Cálculo y Diseño de Máquinas, U. Carlos III de Madrid  
<https://aplicaciones.uc3m.es/cpa/generaFicha?est=221&asig=14208&idioma=1>
- [W6] Guía docente Diseño de Máquinas, U. Politécnica de Cataluña  
[http://www.upc.edu/estudispdf/guia\\_docent.php?codi=820430&lang=esp](http://www.upc.edu/estudispdf/guia_docent.php?codi=820430&lang=esp)
- [W7] Guía docente Diseño de Maquinas I, U. Politécnica de Valencia  
<https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/internal/shared/node/content/25KpuWziThy6UohpJGdc0Q?a=true.pdf>



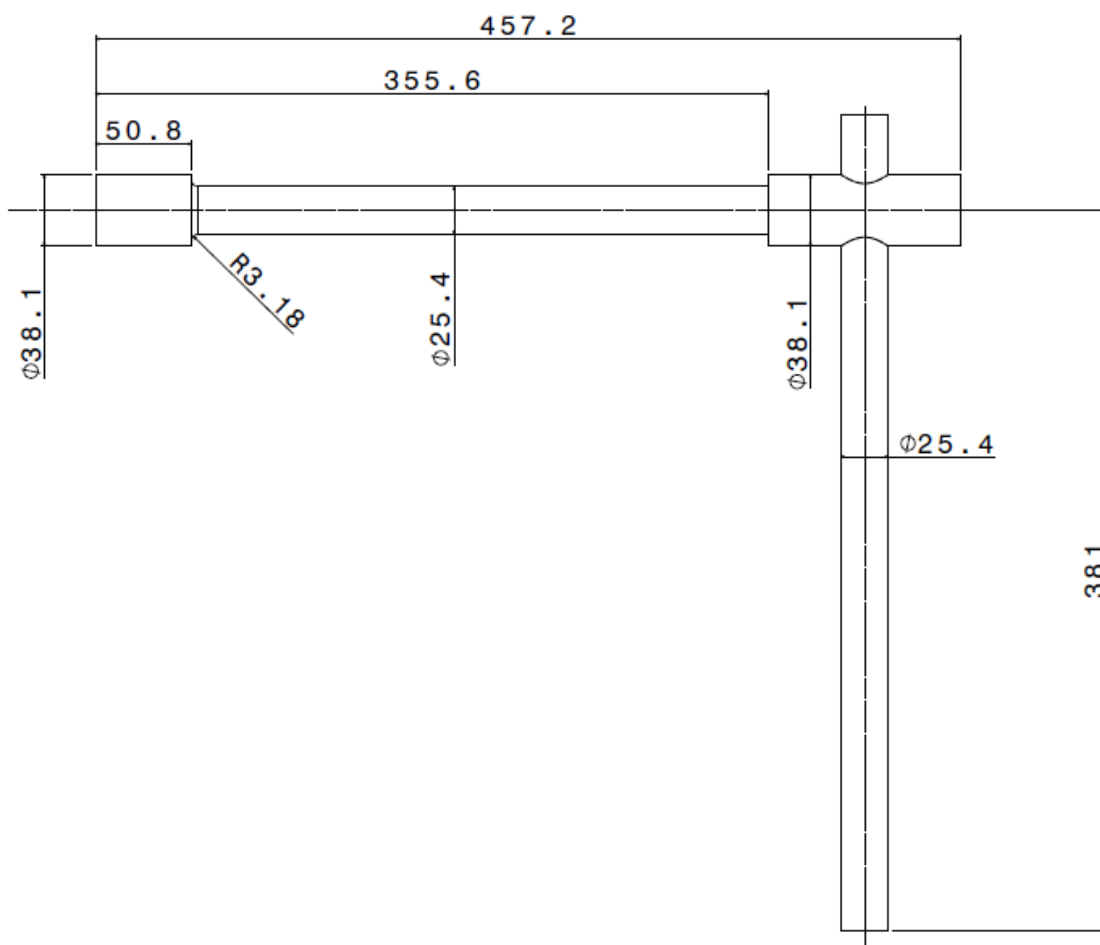
- [W8] Guía docente Diseño de Maquinas II, U. Politécnica de Valencia  
<https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/internal/shared/node/content/6D27UiPES-yJkY-WcwsLEw?a=true.pdf>
- [W9] Guía docente Diseño de Maquinas, U. País Vasco  
[https://www.ehu.eus/es/web/estudiosdegrado-graduokoikasketak/grado-ingenieria-mecanica-alava-asignaturas-por-cursos?p\\_redirect=consultaAsignatura&p\\_anyo\\_acad=20170&p\\_ciclo=X&p\\_curso=3&p\\_cod\\_asignatura=26049](https://www.ehu.eus/es/web/estudiosdegrado-graduokoikasketak/grado-ingenieria-mecanica-alava-asignaturas-por-cursos?p_redirect=consultaAsignatura&p_anyo_acad=20170&p_ciclo=X&p_curso=3&p_cod_asignatura=26049)
- [W10] Guía docente Diseño y Ensayo de Maquinas, U. Cantabria  
<http://web.unican.es/estudios/Documents/Guias/2017/es/G755.pdf>
- [W11] Guía docente Criterios de Diseño Maquinas, U. Zaragoza  
[https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?estudio\\_id=149&plan\\_id\\_nk=434&centro\\_id=110&sort=curso](https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?estudio_id=149&plan_id_nk=434&centro_id=110&sort=curso)
- [W12] Guía docente Criterios de Cálculo y Diseño Maquinas, U. Sevilla  
[http://gdus.us.es/programas/2070026\\_9642.pdf](http://gdus.us.es/programas/2070026_9642.pdf)
- [W13] Guía docente Ingeniería Estática y Dinámica, University of Bradford  
<https://www.bradford.ac.uk/repos/modules/enm5006-b.php>
- [W14] Guía docente Comportamiento mecánico de materiales-Construcción de máquinas, Università degli studi di Udine  
[https://uniud.esse3.cineca.it/Guide/PaginaADContest.do;jsessionid=1098F78DCD2CDB20D899844B821A3946.esse3-uniud-prod-05?ad\\_cont\\_id=10108\\*15870\\*2017\\*2011\\*9999&ANNO\\_ACCADEMICO=2017&ANNO\\_COORTE=2017&ANNO\\_REVISIONE=2017](https://uniud.esse3.cineca.it/Guide/PaginaADContest.do;jsessionid=1098F78DCD2CDB20D899844B821A3946.esse3-uniud-prod-05?ad_cont_id=10108*15870*2017*2011*9999&ANNO_ACCADEMICO=2017&ANNO_COORTE=2017&ANNO_REVISIONE=2017)
- [W15] Ayuda de SolidWorks  
[http://help.solidworks.com/2017/spanish/solidworks/sldworks/c\\_introduction\\_top\\_level\\_topic.htm](http://help.solidworks.com/2017/spanish/solidworks/sldworks/c_introduction_top_level_topic.htm)
- [W16] FreeCAD Web <https://www.freecadweb.org/>



## ANEXO

En este apartado se muestra una guía para encontrar los archivos de los problemas que se han realizado en el TFG dentro del CD adjunto. También se incluyen los planos de las piezas con las que se ha trabajado.

### PALANCA EMPOTRADA



Este problema se encuentra dentro de la carpeta "Palanca empotrada". Dentro de esta se encuentra el problema de la palanca empotrada en tres carpetas diferentes, una carpeta para cada programa.



### -CATIA

En esta carpeta se encuentra el archivo Catia Part donde está diseñada la palanca y los archivos Catia Analisis donde se encuentran los análisis realizados.

El estudio sin concentración de tensiones se encuentra en el archivo “Análisis palanca empotrada sin concentración de tensiones” y el archivo “Análisis palanca empotrada sin concentración de tensiones mallado local”

El estudio con concentración de tensiones se encuentra en el archivo “Análisis palanca empotrada con concentración de tensiones” y el archivo “Análisis palanca empotrada con concentración de tensiones mallado local”.

### -SOLIDWORKS

En esta carpeta se encuentra el archivo SOLIDWORKS Part Document denominado “Palanca empotrada”.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y los análisis sin y con concentración de tensiones denominados “Análisis sin concentración”, “Análisis sin concentración control”, “Análisis con concentración” y “Análisis con concentración control”.

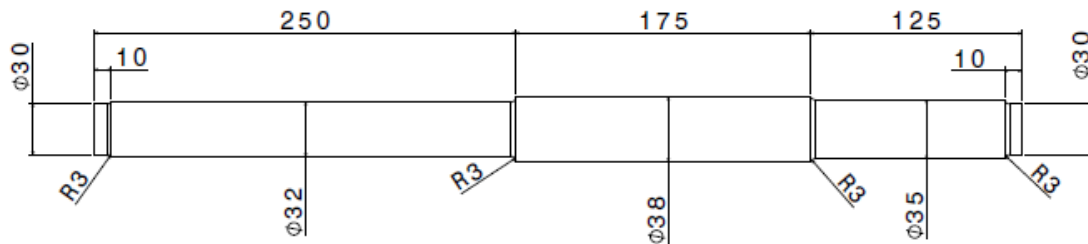
### FREECAD

En esta carpeta se encuentra el archivo “Palanca empotrada”. Este archivo se encuentra grabado en PDF por lo que hay que abrirlo desde FreeCAD.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y los análisis sin y con concentración de tensiones denominados “Análisis 1” y “Análisis 2” respectivamente.

David Martín Rodríguez

### EJE ROTATIVO



Este problema se encuentra dentro de la carpeta “Eje rotativo”. Dentro de esta se encuentra el problema de la palanca empotrada en tres carpetas diferentes, una carpeta para cada programa.

#### -CATIA

En esta carpeta se encuentra el archivo Catia Part donde está diseñada el eje y los archivos Catia Analysis donde se encuentran los análisis realizados.

El estudio sin concentración de tensiones se encuentra en el archivo “Análisis eje rotativo sin concentración de tensiones”.

El estudio con concentración de tensiones se encuentra en el archivo “Análisis eje rotativo con concentración de tensiones”.

#### -SOLIDWORKS

En esta carpeta se encuentra el archivo SOLIDWORKS Part Document denominado “Eje rotativo”.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y los análisis sin y con concentración de tensiones denominados “Análisis sin concentración” y “Análisis con concentración”.

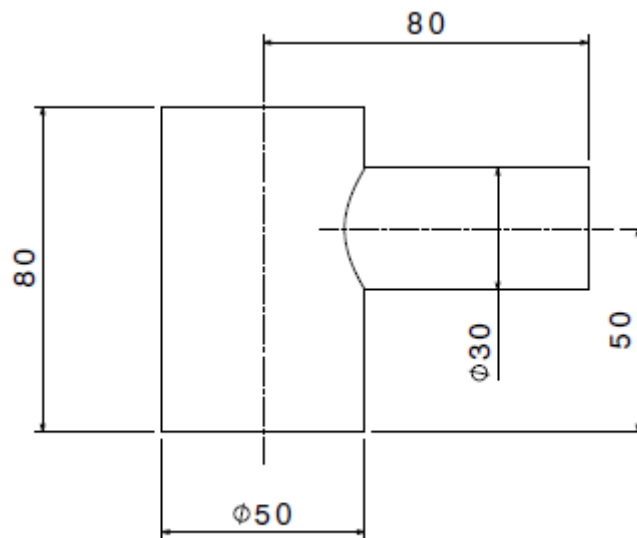
#### FREECAD

En esta carpeta se encuentra el archivo “Eje rotativo”. Este archivo se encuentra grabado en PDF por lo que hay que abrirlo desde FreeCAD.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y los análisis sin y con concentración de tensiones denominados “Análisis 1” y “Análisis 2” respectivamente.



## MOMENTO TORSOR



Este problema se encuentra dentro de la carpeta “Eje rotativo”. Dentro de esta se encuentra el problema de la palanca empotrada en tres carpetas diferentes, una carpeta para cada programa.

### -CATIA

En esta carpeta se encuentra el archivo Catia Part donde está diseñada la pieza y los archivos Catia Analysis denominado “Análisis momento” donde se encuentran los análisis realizados.

### -SOLIDWORKS

En esta carpeta se encuentra el archivo SOLIDWORKS Part Document denominado “Momento”.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y el análisis realizado.

### FREECAD

En esta carpeta se encuentra el archivo “Momento”. Este archivo se encuentra grabado en PDF por lo que hay que abrirlo desde FreeCAD.

Dentro de este archivo se puede ver el diseño de la pieza y los análisis con diferentes valores de fuerzas denominados “Análisis 500” y “Análisis 50000” respectivamente.