



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Departament de Resistència de Materials
i Estructures a l'Enginyeria**

PRACTICAS

Simulación de flexión simétrica mediante FEM

Índice general

1	Introducción	3
1.1	Software utilizado	3
1.2	Objetivos de la práctica	4
2	Metodología	5
2.1	Definir la geometría	5
2.2	Cambiar a modo FEM y añadir un contenedor de análisis	8
2.3	Realizar el mallado	9
2.4	Asignar material	11
2.5	Condiciones de contorno	12
2.6	Realizar el cálculo	15
2.7	Visualizar los resultados	17
3	Enunciado de la práctica	23
3.1	Cuestiones previas	23
3.2	Contenido del informe de prácticas	24
4	Datos de geometría	25

1. Introducción

FEM o Finite Elements Method es un método numérico que permite aproximar las soluciones de ecuaciones diferenciales complejas utilizadas en diferentes campos de la ingeniería y de la física.

De manera simplificada, se divide el medio continuo en un número elevado de diferentes subdominios que no se cruzan entre si llamados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos a los cuales se les llama nodos (que pueden pertenecer a diferentes elementos). Al conjunto de nodos y considerando las relaciones que tienen entre ellos se les llama malla (que se acostumbra a realizar mediante un programa especial).

Una vez definida la malla de nodos y la relación que hay entre ellos, se aplican las ecuaciones debidamente tratadas a cada nodo, apareciendo por ello varias incógnitas por nodo, para obtener el resultado de la aproximación se deben resolver todas las incógnitas de todos los nodos ya que en la malla están definidas las conexiones entre nodos, y las condiciones de contorno.

1.1. Software utilizado

Existen diferente software que permite la simulación mediante el método de los elementos finitos como GID, ANSYS, Cosmos, Nastran, Abaqus, etc... También está la opción de módulos que forman parte de suites mayores como por ejemplo Catia, Solid Works, etc...

Con tal de no afectar al estudiante y que pueda realizar el trabajo en casa, la práctica se realizará mediante software libre. Para ello se utilizará la suite FreeCad (software libre) como interfaz de trabajo, Gmsh como mallador y Calculix como código numérico ya que están integrados en la propia interfaz de FreeCad.

FreeCad está configurado para utilizar una pequeña parte del potencial de Gmesh, aunque para geometrías complejas y si es necesario realizar mallados especiales, se puede exportar la geometría a este mallador y posteriormente volver a importarla a FreeCad.

Como código numérico se utilizará Calculix que es una aplicación de consola para el análisis de elementos finitos y que es código abierto. Aunque puede resol-

ver diferentes tipos de simulaciones numéricas, en esta práctica se utilizará para el análisis estático de deformaciones.

1.2. Objetivos de la práctica

El objetivo principal es una introducción básica a la aproximación mediante elementos finitos del estado de carga de un elemento, para ello, se realizará el ejemplo de una pieza de 250x40x3,95mm que tiene una galga situada a 50mm del origen a a una distancia de 200mm de la carga con tal que las condiciones de contorno no afecten a los valor obtenidos en la galga.

Con ello el estudiante debería ser capaz de modelizar una geometría similar a la que aquí se muestra en esta guía y obtener los resultados que correspondan.

2. Metodología

En este apartado se indicará como realizar un caso de ejemplo a flexión simétrica con FreeCad. Si se quiere realizar el trabajo en casa, los links de descarga del software para las diferentes plataformas son:

- FreeCad → <https://www.freecadweb.org/>
- Mallador Gmsh → <http://gmsh.info/>
- Mallador NetGen → <https://ngsolve.org/>
- Solver Calculix → <http://www.calculix.de/>

La recomendación es intalar FreeCad en solitario y en caso de que indique de que no existe uno de los componentes instalarlo en el equipo.

En todos los casos existen versiones para Windows, Mac, Linux y el código fuente disponible para compilarlo para diferentes plataformas.

La práctica se ha realizado con la versión 0.18.4 de FreeCad, versión 3.06 de Gmsh y la versión 2.11 de Calculix aunque versiones posteriores deberían tener similares características a la hora de realizar los pasos.

2.1. Definir la geometría

Como moverse en el entorno de FreeCad:

- El movimiento de la rueda del ratón hace zoom
- Pulsando la rueda del ratón se mueve la vista
- Pulsando rueda del ratón y el botón derecho simultaneamente se realiza rotación en 3D
- Pulsando rueda del ratón y haciendo una pulsación al botón derecho se puede hacer zoom.
- Pulsando la rueda del ratón en un punto, se girará respecto a ese punto

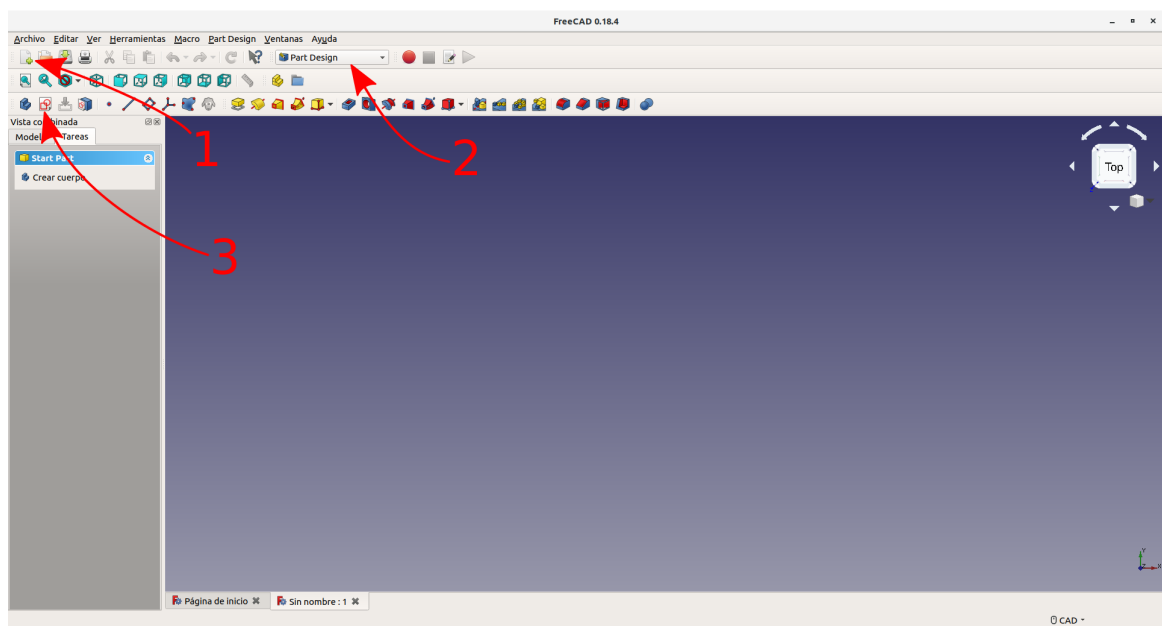


Figura 2.1.1: Pantalla principal de FreeCad

Primero de todo habrá que crear la geometría a estudiar, para ello, en la ventana que se ha abierto de FreeCad similar a la imagen 2.1.1 se crea un nuevo documento (1), se pone el programa en modo de diseño de parte (2) y se crea un croquis (3).

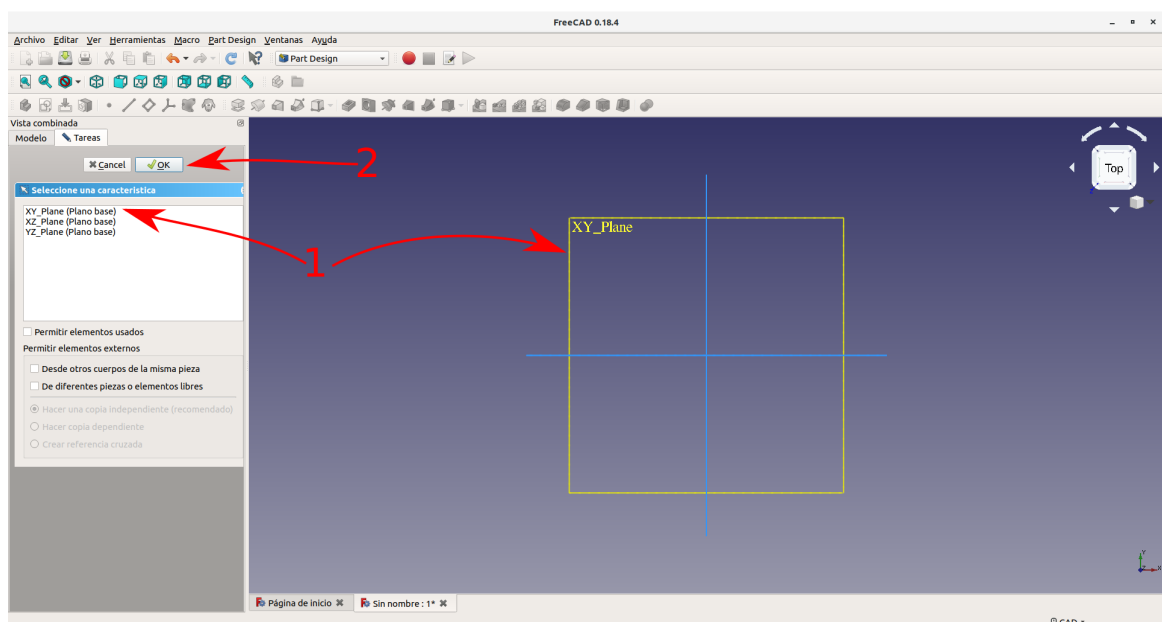


Figura 2.1.2: Selección del plano del croquis

En la pantalla que aparece similar a la de la imagen 2.1.2, seleccionamos el

plano XY en el menú desplegable o directamente se selecciona marcando en la pantalla (1), posteriormente se da a OK (2).

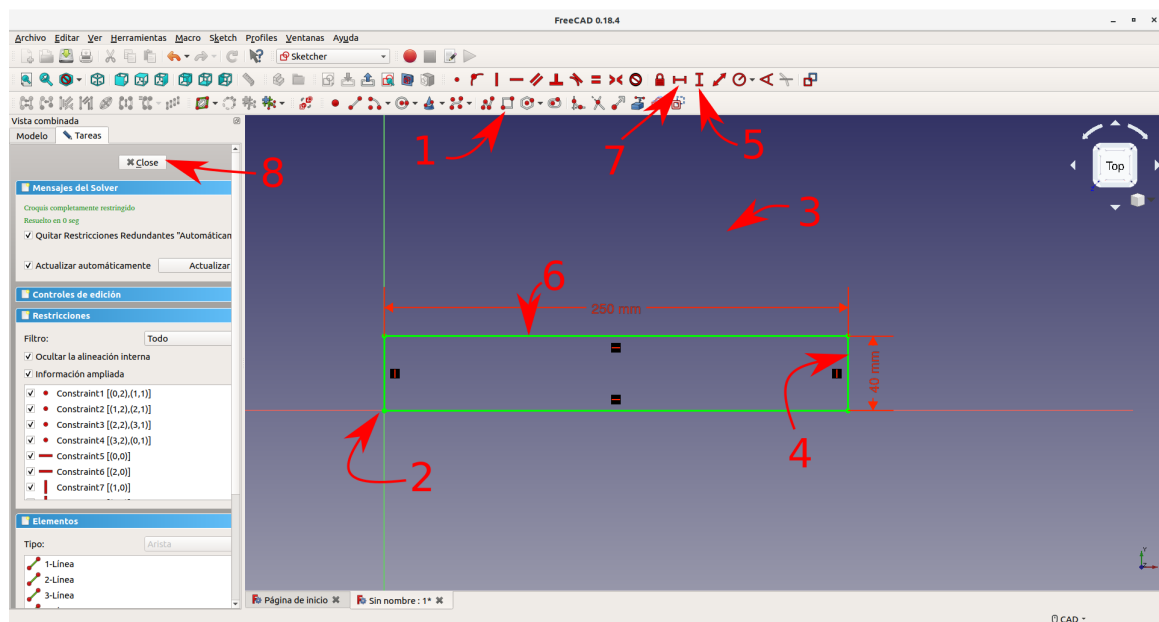


Figura 2.1.3: Geometría del croquis

Siguiendo los pasos que se ven en la imagen 2.1.3 se realiza el dibujo de la base de la pieza. Se selecciona para seleccionar un rectángulo (1), click en el origen de coordenadas (2) para que ese punto ya esté fijo en el origen de coordenadas, hace click en cualquier punto del cuadrante de X e Y positivas (3), se selecciona un línea (4) y se le agrega una restricción de longitud vertical (5) de 40mm, posteriormente se realiza el mismo paso para la línea horizontal (6) pero agregando una restricción horizontal (7) de 250mm. Si la geometría está bien definida, el color cambiará a verde, en ese caso se puede pulsar close (8).

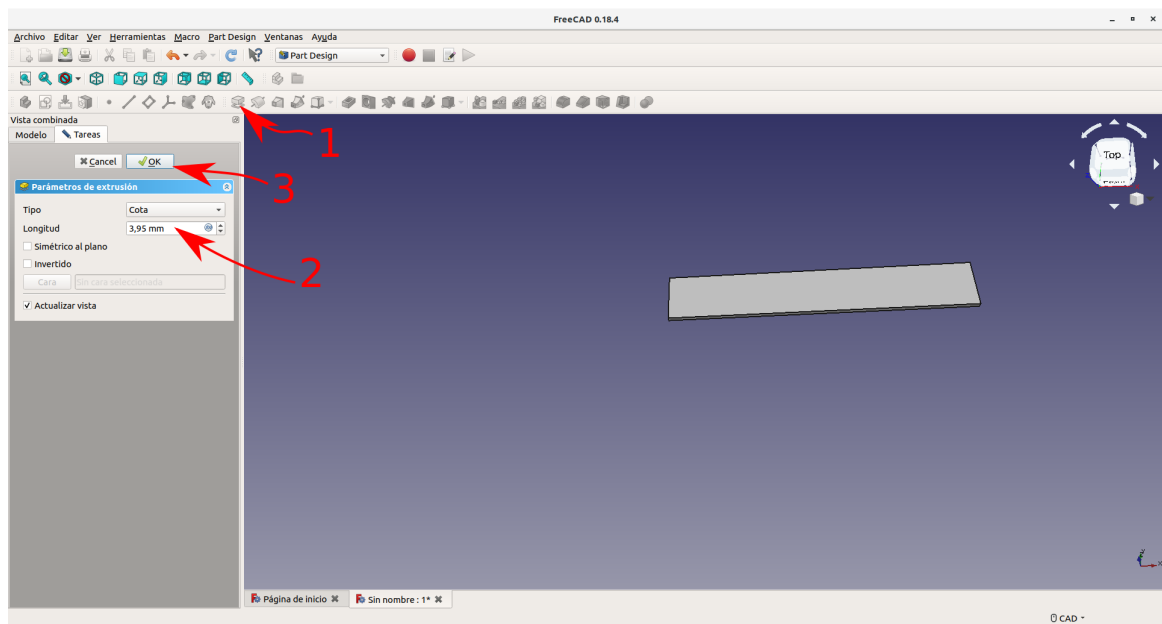


Figura 2.1.4: Extrusión del croquis

Como solo se tiene un croquis siguiendo los pasos de la imagen 2.1.4, se pulsa al botón para realizar una extrusión (1) se define el tamaño a 3.95mm (2) y se pulsa ok (3). Dinámicamente se verá como aparece el dibujo.

Se procede a guardar el fichero en una carpeta, ya que se crearán ficheros auxiliares al realizar el cálculo.

2.2. Cambiar a modo FEM y añadir un contenedor de análisis

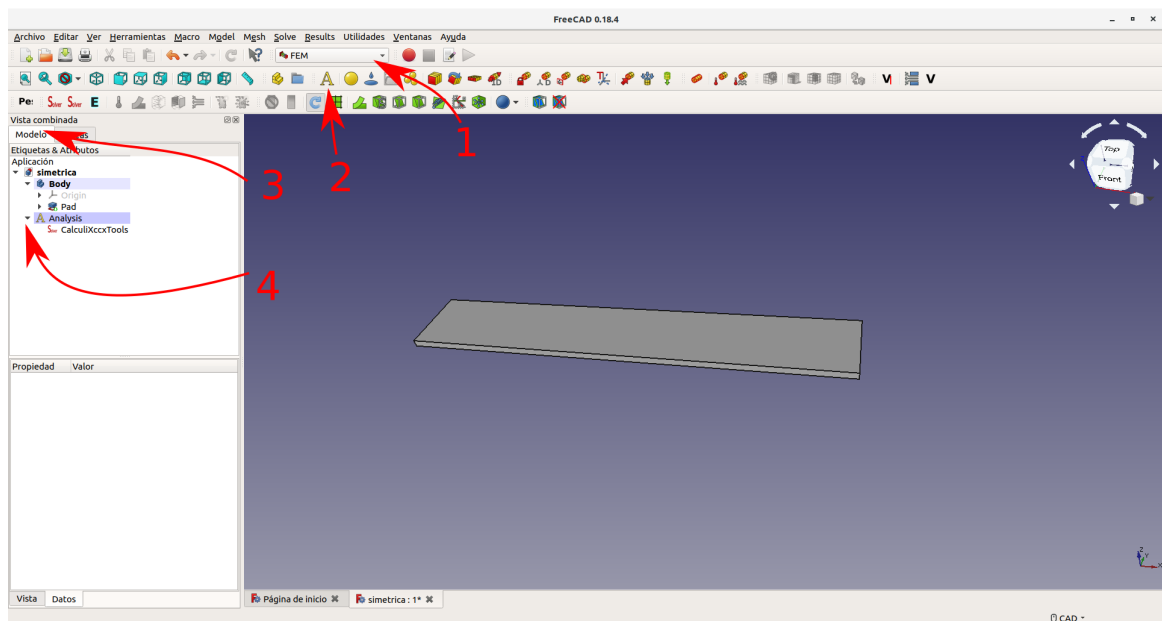


Figura 2.2.1: Cambio a modo FEM y contenedor

Siguiendo lo indicado en la figura 2.2.1 se cambia a modo FEM (1), a continuación se añade un contenedor de análisis para Calculix (2), se pone el programa en vista de modelo (3) y se asegura que el contenedor de análisis tiene el apartado CalculiXcxcTools (4).

2.3. Realizar el mallado

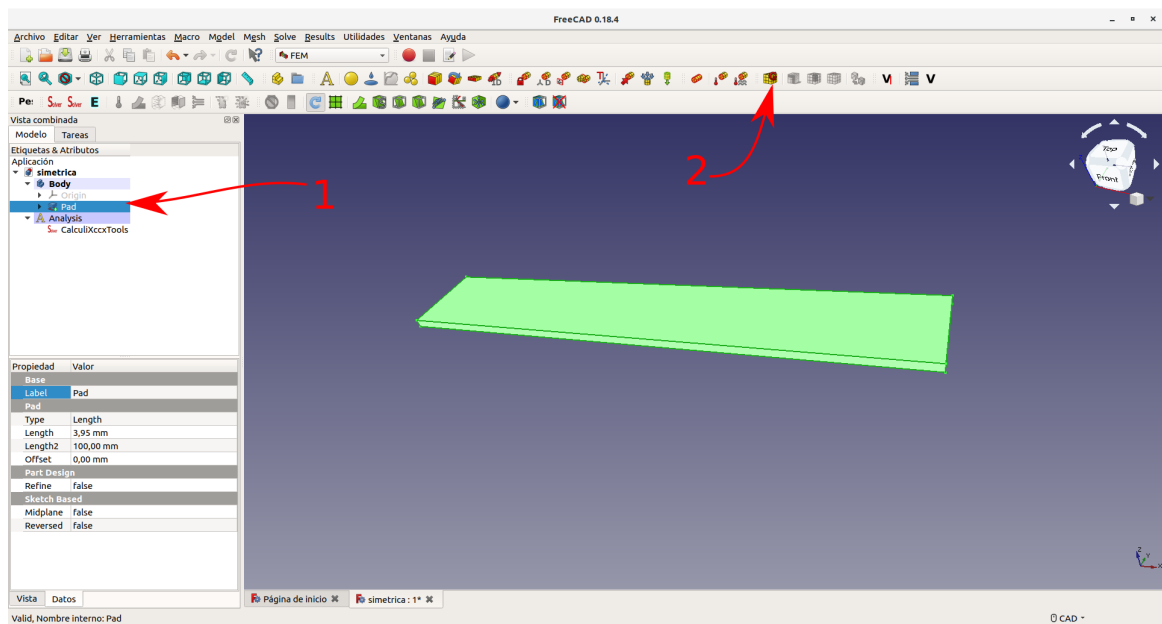


Figura 2.3.1: Selección elemento a mallar

Como se puede ver en la imagen 2.3.1, es necesario seleccionar el elemento que se quiere mallar, para ello se selecciona el elemento (1) y se pulsa el botón de mallar con Gmsh (2).

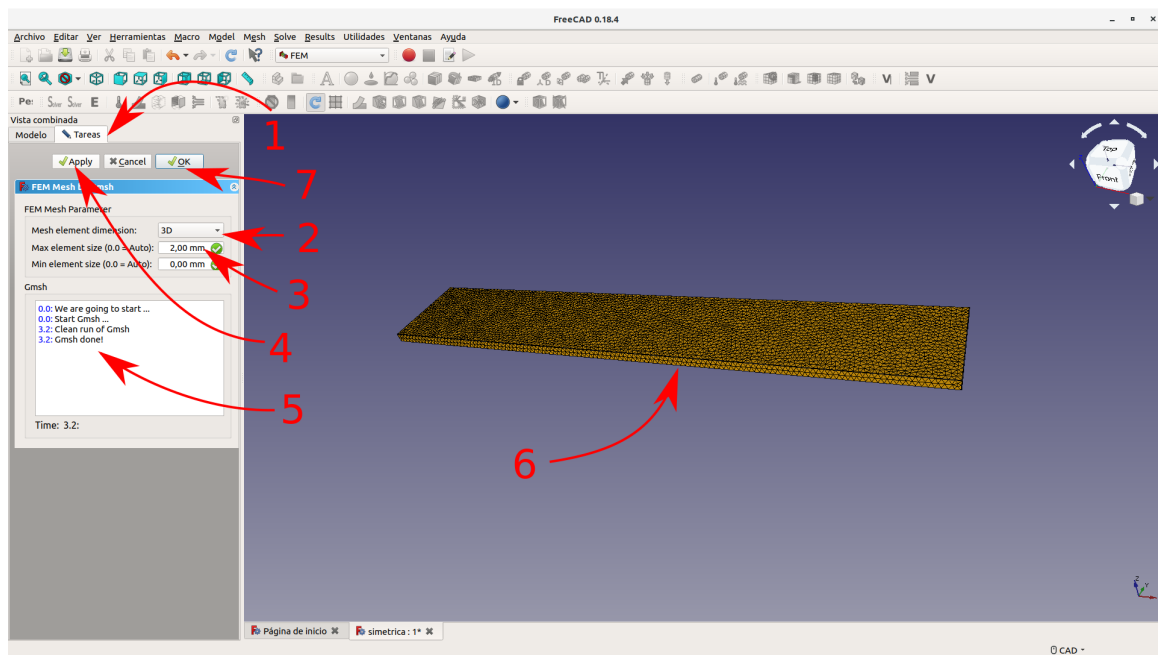


Figura 2.3.2: Condiciones de mallado

Con la tarea de mallado que aparece en la pantalla (1), se selecciona que se realizará un mallado en 3D (2), se selecciona el tamaño máximo de elemento (3) a 2mm ya que el tamaño de la placa es de 3.95mm y se deja el mínimo en automático. Se pulsa en aplicar para que realice el mallado (4) y se deberá esperar a que termine (se ve en la pantalla marcada como 5), una vez mallado y que se visualice en pantalla (6) dar a Ok (7).

Una vez se le da a OK, la malla desaparece y se vuelve a ver el sólido, se puede activar la visualización si se selecciona FEMMeshGmsh del modelo, dentro de Analysis y se pulsa espacio (también se puede hacer con botón derecho) para hacerla visible. Tener en cuenta que si se ve el sólido, puede que no se vea correctamente y se recomienda dejar la visualización del sólido para los siguientes pasos.

2.4. Asignar material

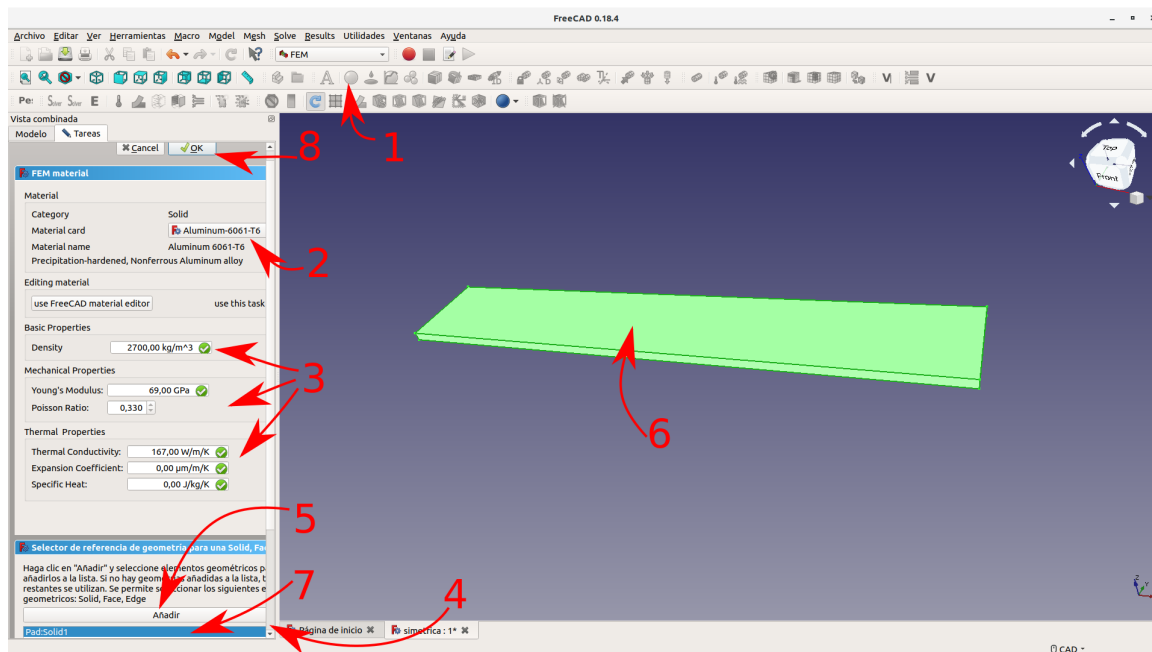


Figura 2.4.1: Asignación del material

Siguiendo los pasos de la imagen 2.4.1, primero se da a asignar material (1), como en este caso el aluminio que se quiere simular existe, se selecciona del listado (2), en (3) se ven sus propiedades y si fuera necesario se pueden editar las propiedades activando la edición, pero no se hará en la práctica.

En este caso, al existir un solo sólido, no sería necesario añadirlo al listado de elementos, no obstante, es una buena práctica añadirlo para evitar errores futuros, para ello, desplazamos las tareas hasta la parte inferior y seleccionamos sólido (4), a continuación le damos a añadir (5) se selecciona una cara (6) y ya queda añadido en el listado (7). Finalmente de damos a Ok (8) para finalizar.

2.5. Condiciones de contorno

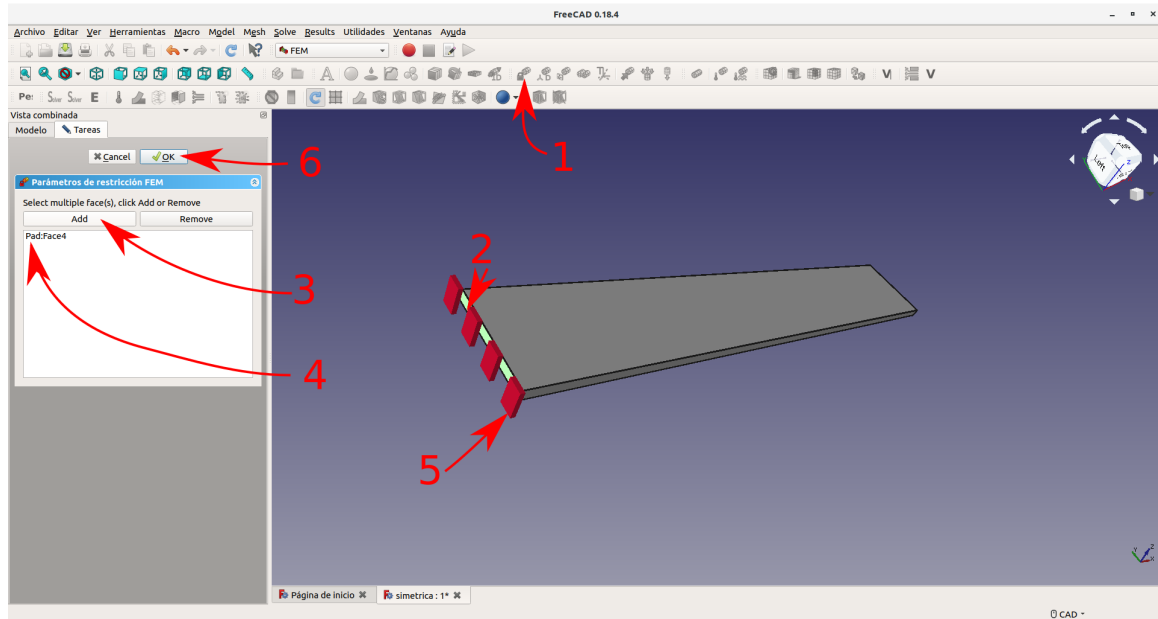


Figura 2.5.1: Restricción cara fija

Ahora tocará fijar la pieza en el espacio para que no se mueva como se ve en la imagen 2.5.1, para ello se bloqueará el movimiento de la cara que corresponde al plano YZ para $X=0$. Se selecciona una restricción fija (1), se selecciona la cara a añadir (2), se pulsa Add (3) y vemos que aparece la cara seleccionada en el listado (4). En ese momento aparecerá en pantalla un elemento que nos indicará que la cara ha sido fijada (5), seleccionamos Ok para acabar (6).

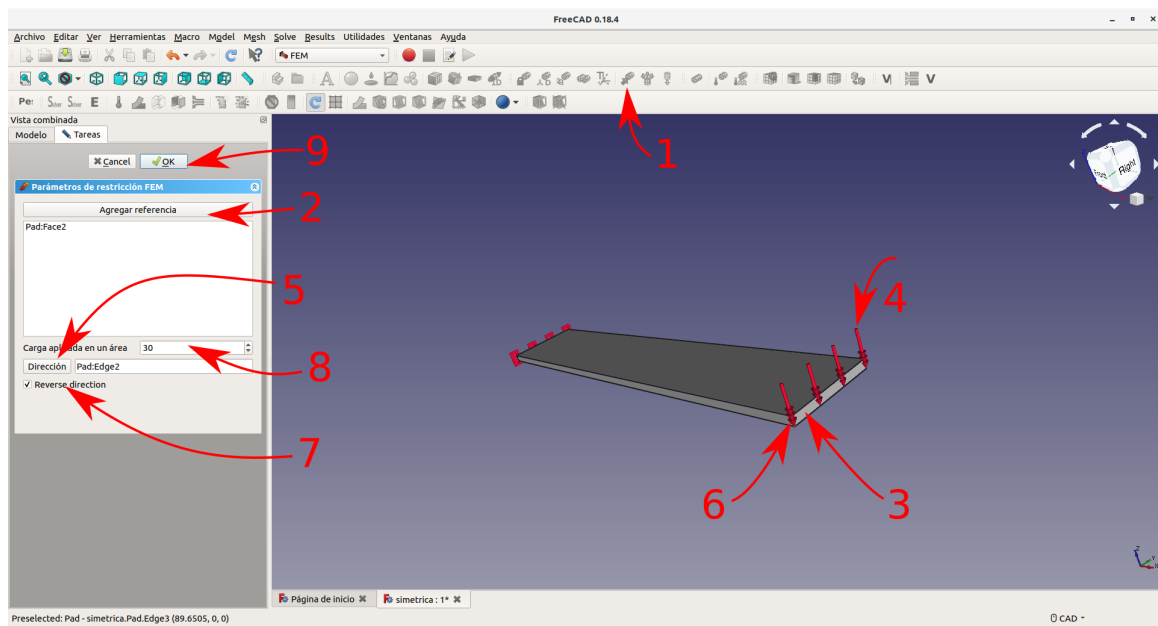


Figura 2.5.2: Fuerza a aplicar

Para aplicar una fuerza, se deberá seleccionar en que entidad del dibujo se quiere realizar, en este caso se seleccionará crear una fuerza en una entidad geométrica (1), se seleccionará agregar una referencia (2), se seleccionará la cara donde se quiere aplicar (3), en ese momento aparecerán unos vectores en el dibujo para ver como se aplica la fuerza (4).

Como la fuerza aparecerá normal a la cara, se seleccionará la dirección (5) y se seleccionará una arista vertical (6), si no va en la dirección adecuada, se seleccionará dirección inversa (7), finalmente se agregará el valor de la fuerza (8) fijándolo a 30N y se dará a Ok (9).

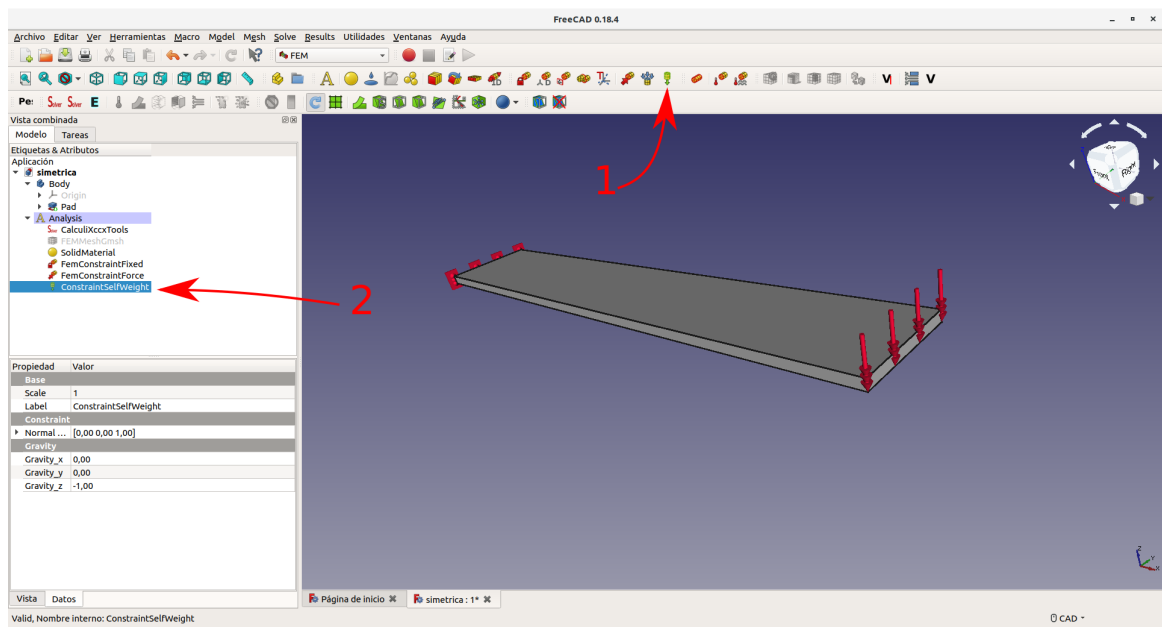


Figura 2.5.3: Peso propio

Para aplicar el peso propio, solo es necesario pulsar en el botón para añadirlo (1) y comprobar que efectivamente se ha añadido en el árbol para el análisis (2).

2.6. Realizar el cálculo

En este momento se procederá a realizar el cálculo con las condiciones de contorno aplicadas (incluidas las carga). Aunque se podría realizar un cálculo directo, para que se entienda como funcionan este tipo de programas se realizará el paso de ver el fichero de configuración del cálculo.

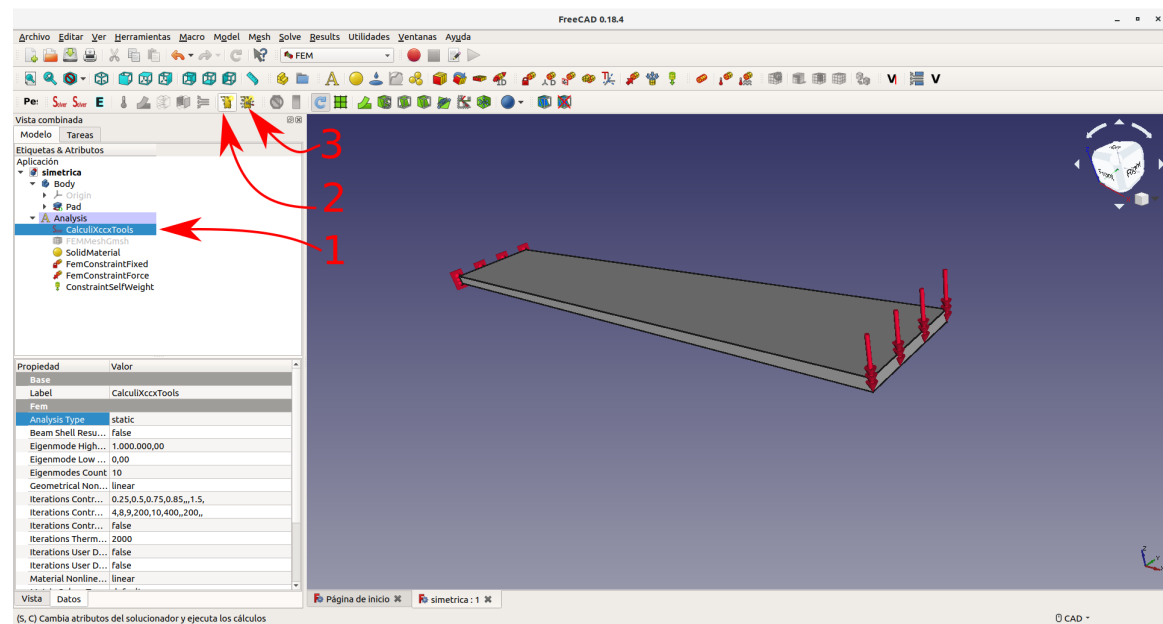


Figura 2.6.1: Selección para realizar el cálculo

Para realizar el cálculo, siguiendo la imagen 2.6.1 se selecciona el elemento CalculiX del árbol del modelo (1) y se pulsa el icono de cálculo (2). Se podría realizar el cálculo directamente pulsando en (3), pero se perdería información que puede ser interesante para la clase.

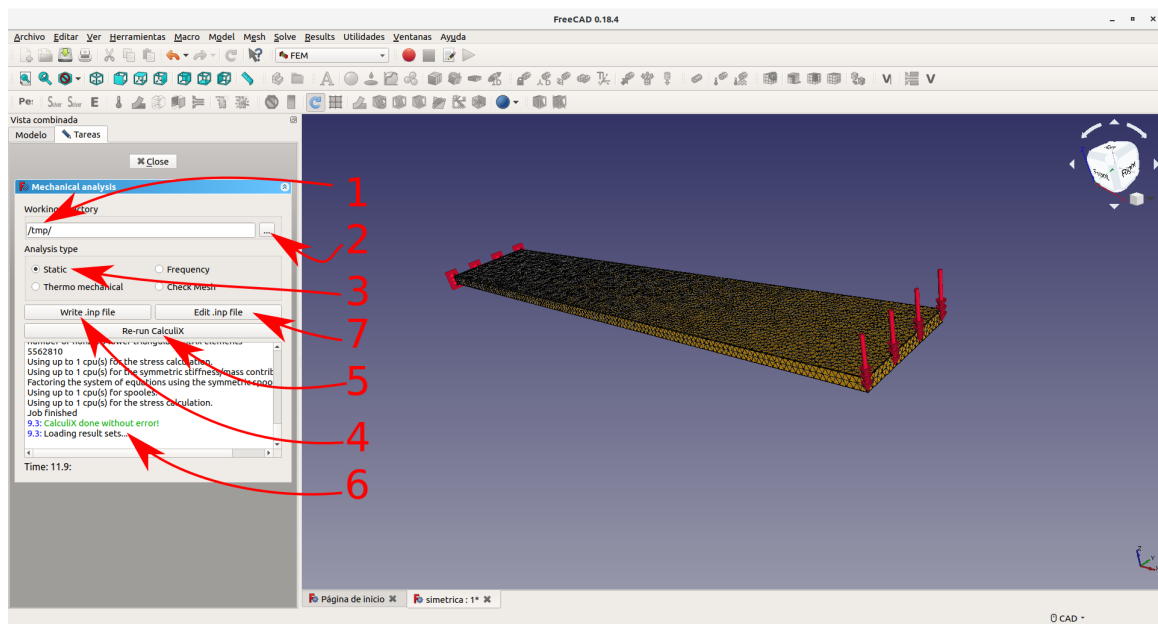


Figura 2.6.2: Realización del cálculo

En la imagen 2.6.2 se puede ver con más detalle cuales son los pasos del cálculo. Se le está indicando que trabaje en el fichero temporal (1), como comentario, las capturas se han realizado en Linux, por tanto el fichero temporal es /tmp/ en Windows o Mac podrían ser diferentes. Este directorio de trabajo se podría cambiar a un directorio para tener los ficheros de trabajo reales pulsando en (2). Crear un directorio dentro de donde esté el fichero de la práctica y guardarlos allí para inspeccionarlos.

En (3) se le está indicando que sea un análisis estático, aunque Calculix permite realizar otros tipos cálculos. Hay que tener en cuenta que el programa de cálculo es independiente del entorno gráfico, por tanto habrá que pasar lo datos de alguna manera, para ello se le indica que escriba el fichero .inp (4), con este fichero se podría cerrar FreeCad y realizar el cálculo.

En este caso, la geometría es sencilla y se realizará desde el entorno gráfico, pero en casos donde el cálculo es complejo y necesita muchas horas, se acostumbra a generar el fichero de parametrización (en este caso un .inp) y se lanza el cálculo en un cluster sin entorno gráfico con múltiples procesadores para que tarde menos tiempo, estos algoritmos tiene una complejidad bastante alta.

Por tanto, se hace click en Run CalcuLix (en la imagen aparece como Re-run porque ya se ha realizado el cálculo) pulsando en (5) y esperamos a que acabe el cálculo (6).

Para ver el fichero .inp que se ha comentado que es el que realmente se le pasa al algoritmo de cálculo, pulsar en edit .inp file (7), que aunque en nuestro

caso no se realizará ningún cambio servirá para ver que es.

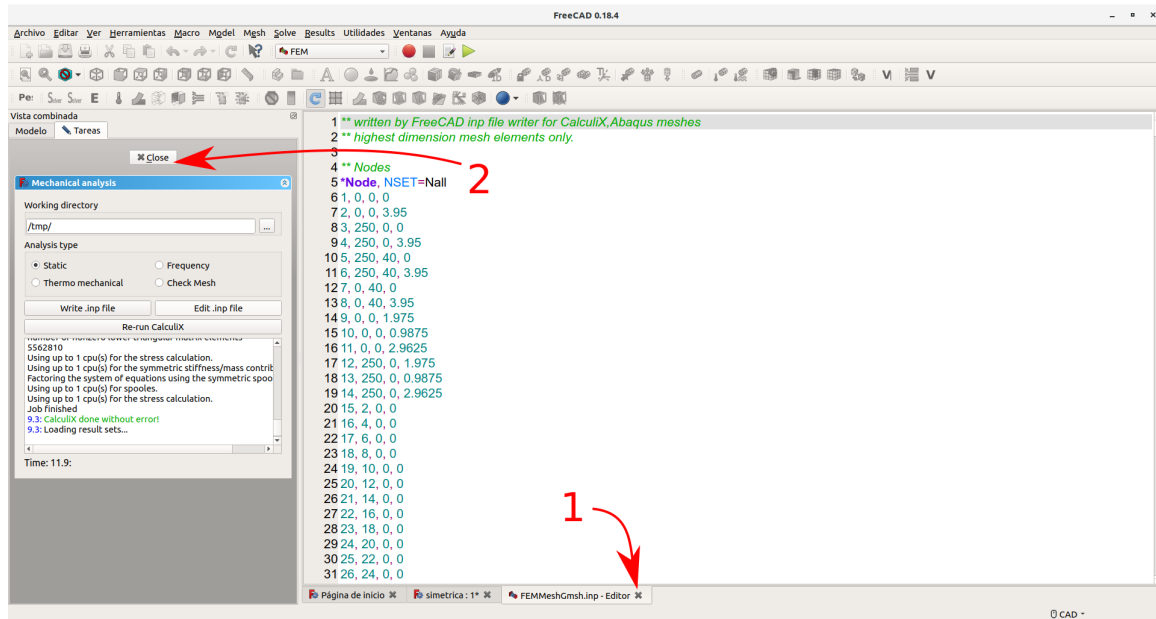


Figura 2.6.3: Visualización fichero de entrada para el cálculo

Fichero de entrada a CalculiX, ver como curiosidad. Para cerrar (1) y si el cálculo está hecho (2).

2.7. Visualizar los resultados

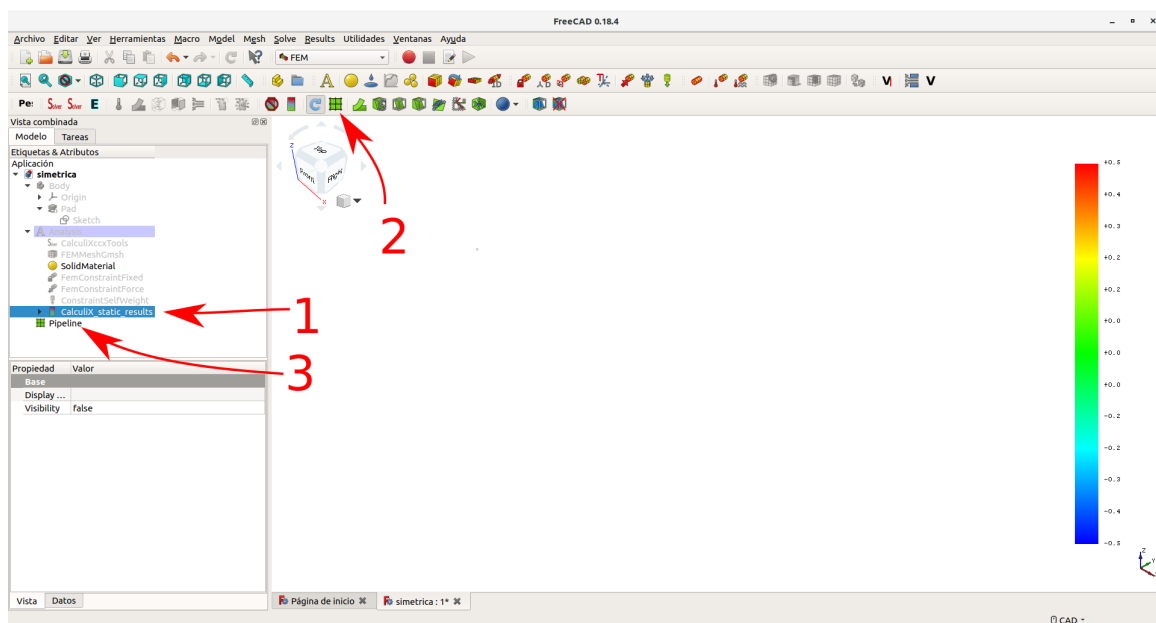


Figura 2.7.1: Crear tubería para resultados

Una vez realizado el cálculo, es necesario indicar que muestre los resultados, para ello FreeCad utiliza el concepto “pipe”. Esto no deja de ser un traspaso de datos para ir operando sobre los resultados y obtener el resultado que se busca.

Para realizar ese paso (ver la imagen 2.7.1), es necesario tener seleccionado el apartado resultados (1) y pulsar en crear tubería (2), una vez realizado, aparecerá un nuevo elemento en la pestaña modelo llamado “Pipeline” (3). A partir de este momento, los resultados vendrán dados como hijos del elemento “Pipeline”

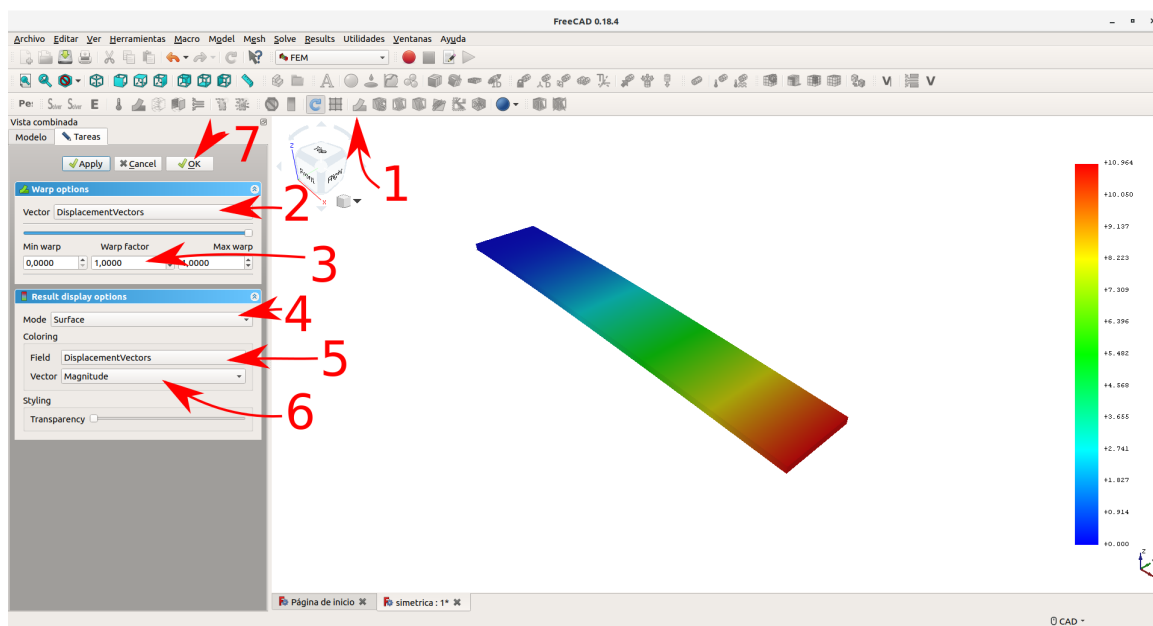


Figura 2.7.2: Visualización deformada

Seleccionado “Pipeline” se pulsa el botón para ver la deformada (1), una vez aparece el menú, seleccionar “DisplacementVectors” (2) y colocar “Warp factor” de 1 o 2 (3). A continuación indicar que coloree en modo “Surface” (4), como campo, indicar “DisplacementVectors” (5) y como vector “Magnitude” (6), dar a Ok (7).

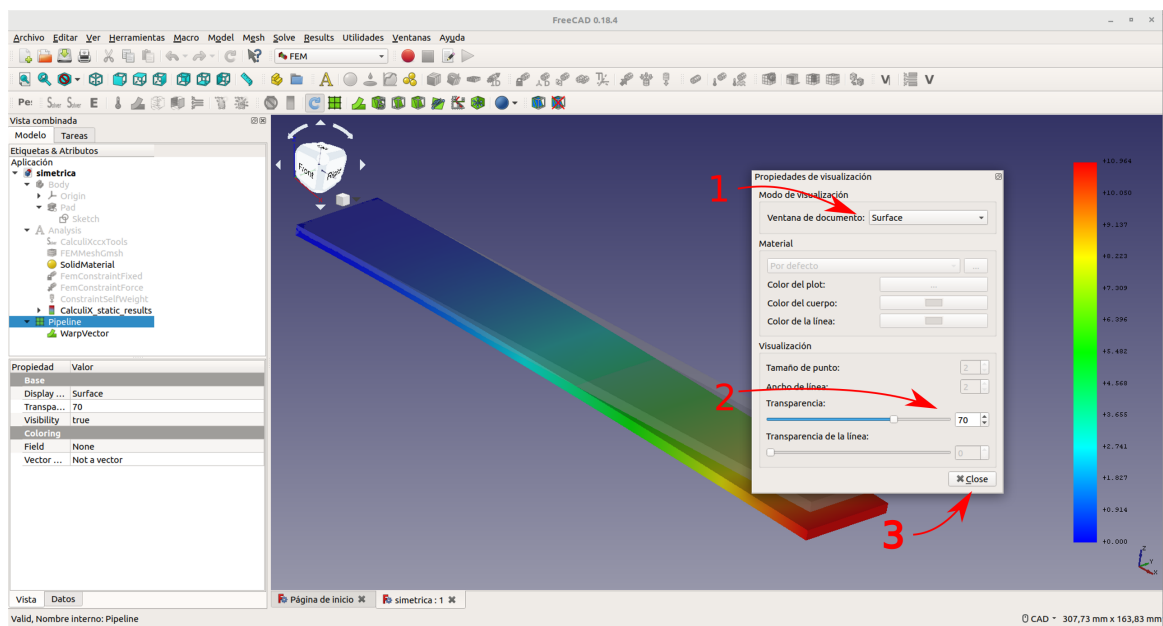


Figura 2.7.3: Visualización pieza superpuesta

Para tener una mejor visualización de la deformación, se da botón derecho sobre "Pipeline" y se selecciona apariencia, y una vez seleccionado cambiamos el modo de visualización a "Surface" (1), a continuación fijamos la transparencia a 70 en (2) y pulsamos aceptar (3).

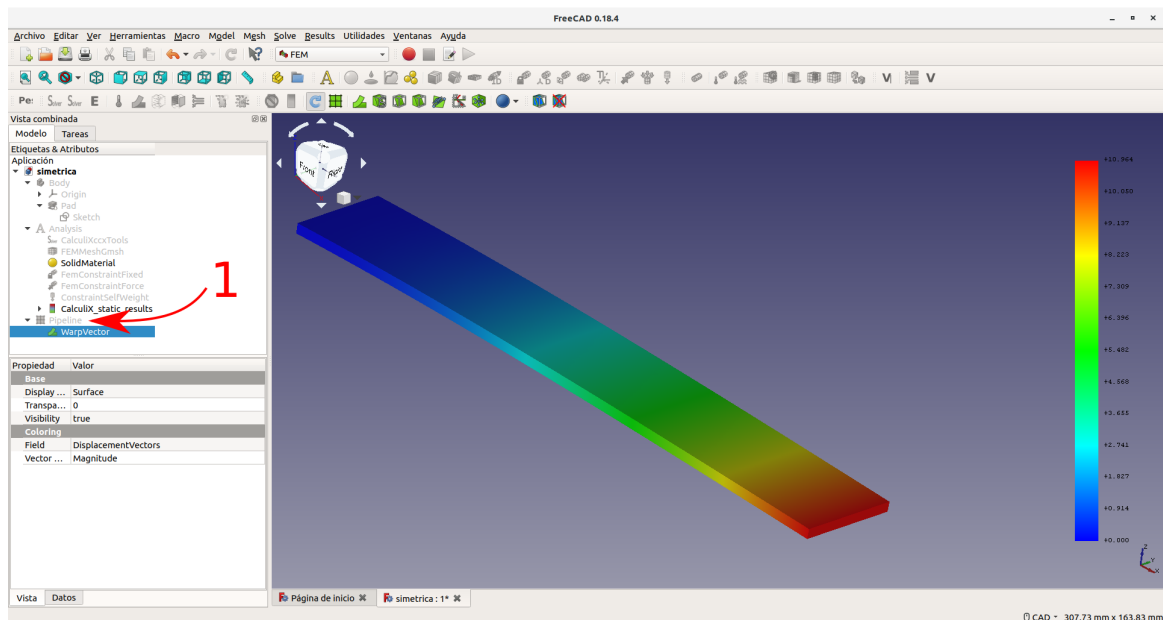


Figura 2.7.4: Ocultar un elemento

Para visualizar o dejar de ver elementos, existen varias opciones. La primera de todas es pulsar con el botón derecho sobre el elemento que se quiere mostrar

o esconder y pulsar conmutar visibilidad. Otra opción es ponerse encima del elemento y pulsar la tecla espacio. En la imagen 2.7.4 se ha ocultado “Pipeline” (1) como ejemplo.

Mostrar resultados superficiales

Debido a que se está realizando un cálculo numérico, los datos en el interior del elemento no tienen porque ser continuos, es por ello que se mostrarán los datos mediante un corte para así poder ver si son correctos o no.

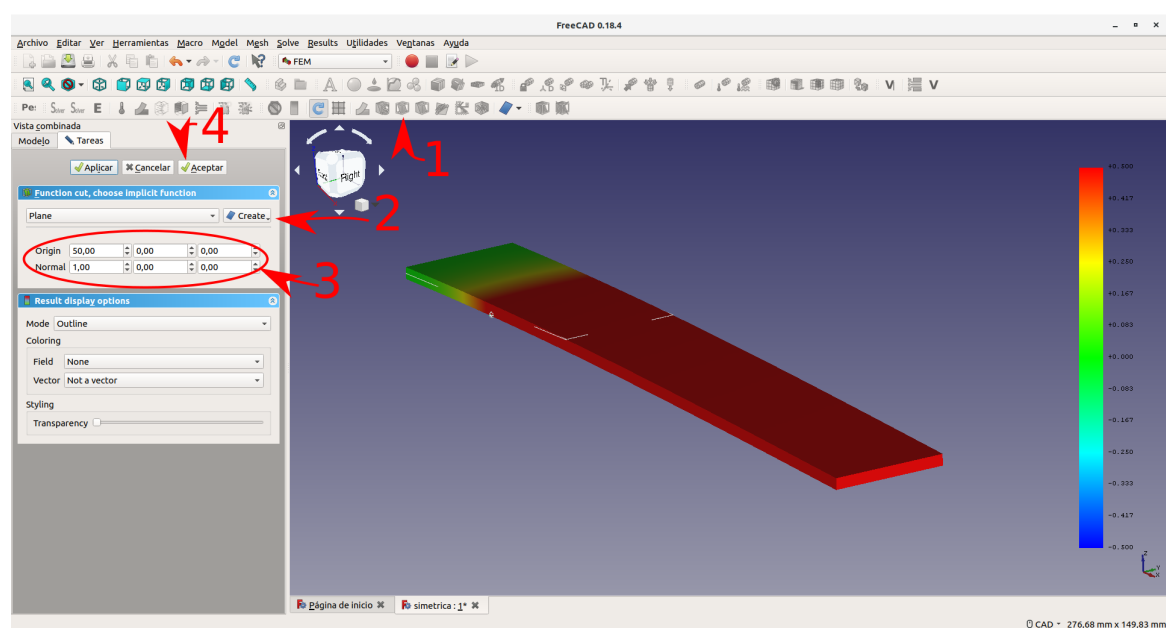


Figura 2.7.5: Realizar un corte a la pieza

Para realizar un corte a los resultados de la pieza, se pulsa a corte (1), en el menú que aparezca, se selecciona crear un plano de corte (2). Debido a que la galga está a 50mm del punto 0 de la pieza para evitar que las condiciones de contorno la afecten, se crea un plano de corte a 50mm del origen y con normal en el eje de las X (3). Como está la pieza dibujada encima del plano y no se verá correctamente, pulsamos aceptar (4) y en el árbol se oculta el “WrapVector” con el que se ha trabajado. Como observación, aparecerán la carpeta funciones y el elemento “cut” que será el único que actualmente esté visible en todo el árbol de trabajo.

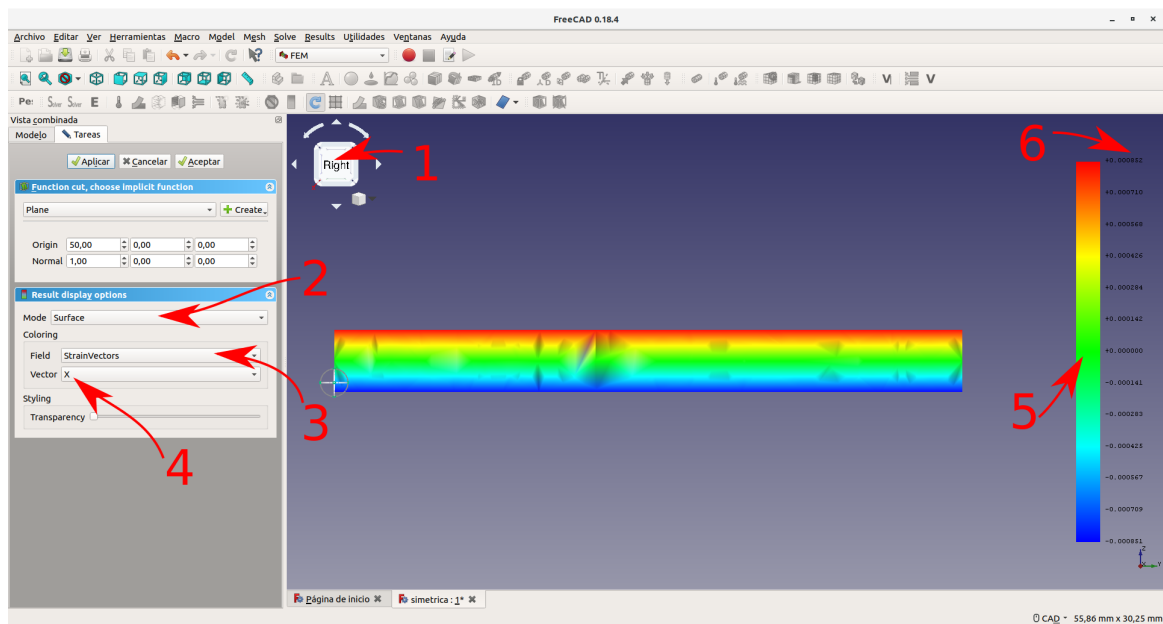


Figura 2.7.6: Valor de la deformación unitaria

Finalmente, para mostrar el resultado de los desplazamientos, se hace doble click en “cut” para que vuelva a abrir la configuración del plano de corte. Esta vez, se coloca en la pantalla perpendicular al mismo pulsando en el cubo de navegación (1) y se amplía para una mejor visión. A continuación se selecciona que represente los datos como una superficie (2), a continuación se selecciona el elemento superficial que se desea visualizar (strain son los desplazamientos unitarios y stress es la tensión) en el apartado (3). En caso de ser un vector, por defecto mostrará la magnitud, pero se puede seleccionar cada una de las coordenadas (4).

En la imagen 2.7.6 se muestra el desplazamiento unitario en dirección X. Para obtener el valor se puede consultar el gráfico de color que aparece (5), siendo (por ejemplo) el valor máximo de este ejemplo $\varepsilon = 0,000852$ en la cara superior (6). Si no aparecen suficiente decimales ver imagen siguiente.

Conforme se van cambiando las preferencias, la vista se actualiza dinámicamente, si no fuera el caso, se puede pulsar el botón de aplicar.

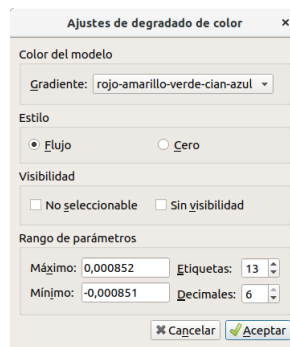


Figura 2.7.7: Aumentar decimales en visualización

Para mostrar los decimales en la visualización (especialmente en desplazamientos unitarios), se pulsa con el botón derecho en la barra de color marcada como 5 en la figura 2.7.6 y se selecciona opciones. A continuación aparecerá la pantalla de la imagen 2.7.7, se aumenta el número de decimales a 6 que es el máximo en (1) y se pulsa aceptar.

En la versión de FreeCad que se ha utilizado, cada vez que se cambian los datos a mostrar, el programa solo mostraba 3 decimales, es por ello que en caso que sea necesario, se deberá recordar que se debe ir entrando en opciones de la barra y dando a aceptar (el valor de 6 dígitos lo guarda).

3. Enunciado de la práctica

3.1. Cuestiones previas

La geometría que se deberá utilizar es la que se en el anexo de este documento. El material que se utilizará es el indicado en informe de la práctica (aluminio 6061) y los datos se deben extraer el propio programa.

Se debe tener en cuenta que la pieza se debe realizar 50mm más larga que la geometría indicada para que las condiciones de contorno no afecten a la situación de la galga.

Como ecuaciones a utilizar, la probeta trabajara como una ménsula empotrada en uno de sus extremos, y en la posición de la galga se puede demostrar que:

$$\sigma_g = \frac{M_z}{I_z} \cdot \frac{t}{2} = \frac{6 \cdot P \cdot L_g}{b \cdot t^2} \quad (3.1.1)$$

Donde L_g es la distancia de la galga al punto de aplicación de la carga, b es el ancho de la probeta y t es el espesor de la misma.

Recordar también, que la deformación nominal en la galga se calculará mediante la ley de Hooke para estados tensionales unidireccionales:

$$\varepsilon_g = \frac{\sigma_g}{E} \quad (3.1.2)$$

Con tal de minimizar errores, la tensión, deformación, etc... en la posición de la galga se obtiene promediando los valores de la cara superior y de la inferior (se está en flexión simétrica). Por ejemplo, para la tensión:

$$\sigma_{g \text{ numérica}} = \frac{|\sigma_{\text{superior}}| + |\sigma_{\text{inferior}}|}{2} \quad (3.1.3)$$

Finalmente, el desplazamiento máximo total, se puede calcular analíticamente, no obstante para compararlo de manera fácil con el numérico, utilizar la longitud total de la pieza y de esta manera el valor máximo del desplazamiento se puede obtener en la visualización de la deformada (ejemplo en imagen 2.7.2 donde es 10,964). En tal caso, el valor analítico se puede calcular como:

$$f = \frac{1}{3} \cdot \frac{P \cdot L_{\text{total}}^3}{E \cdot I} \quad (3.1.4)$$

Finalmente, el error se obtiene como:

$$error[\%] = \left| \frac{|\text{Valor analítico}| - |\text{Valor numérico}|}{|\text{Valor analítico}|} \right| \cdot 100 \quad (3.1.5)$$

3.2. Contenido del informe de prácticas

1. Calcular la tensión en la galga analítica y numéricamente determinando el porcentaje de error entre ellas.
2. Calcular las deformaciones en la galga analítica y numéricamente, determinar el porcentaje de error entre ellas.
3. Calcular analíticamente y numéricamente el desplazamiento en Z en el punto de aplicación de la carga, determinar el porcentaje de error entre ellos.
4. Calcular analíticamente la carga máxima que se puede aplicar en la probeta utilizando un coeficiente de seguridad de 2 considerando que el límite elástico es de $\sigma_e = 176MPa$
5. Considerando la tensión máxima en la galga y en toda la pieza, calcular el coeficiente de seguridad real para ambos casos.
6. Comprobar el cambio en el tamaño del mallado (esta guía se ha realizado con 2mm y se propone 2.2 y 1.8mm) como afecta a:
 - Tiempo de cálculo
 - Errores relativos respecto a los analíticos

4. Datos de geometría

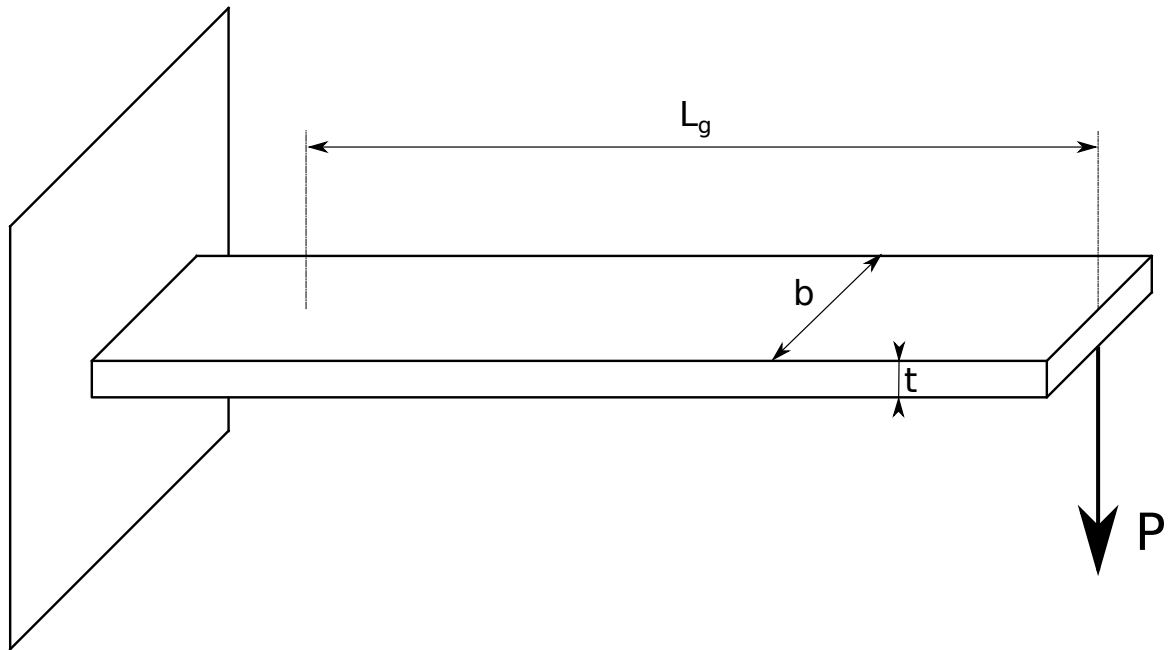


Figura 4.0.1: Cambio a modo FEM y contenedor

En la imagen 4.0.1 hay un esquema de los elementos personalizados para cada alumno, en la siguiente página se puede encontrar los valores de L_g , b , t y P para cada alumno.

DNI	L_g	b	t	P
21775392g	280 mm	38 mm	3.0 mm	22 N
23845526t	260 mm	36 mm	3.6 mm	22 N
23894631t	270 mm	44 mm	3.7 mm	28 N
23920932n	240 mm	44 mm	3.7 mm	30 N
23931495h	190 mm	30 mm	3.4 mm	38 N
23931824w	300 mm	42 mm	3.0 mm	36 N
25367728q	260 mm	32 mm	3.3 mm	28 N
39408297m	260 mm	36 mm	3.6 mm	24 N
39414669y	180 mm	32 mm	2.7 mm	34 N
39415772m	250 mm	34 mm	3.1 mm	40 N
39432364z	170 mm	42 mm	3.2 mm	36 N
41596341j	270 mm	44 mm	3.4 mm	28 N
43181132n	170 mm	42 mm	3.0 mm	38 N
46487751j	240 mm	42 mm	3.5 mm	28 N
47114490w	240 mm	34 mm	3.0 mm	30 N
47242448b	290 mm	38 mm	2.5 mm	34 N
47328022w	220 mm	36 mm	3.5 mm	20 N
47595309y	230 mm	46 mm	2.9 mm	32 N
47667079q	300 mm	38 mm	3.8 mm	20 N
47746641k	170 mm	36 mm	3.2 mm	38 N
47752172d	240 mm	36 mm	4.0 mm	36 N
47844457h	170 mm	40 mm	2.9 mm	40 N
47861595k	160 mm	36 mm	3.1 mm	20 N
47902466k	300 mm	40 mm	2.8 mm	24 N
47958002n	180 mm	40 mm	3.4 mm	24 N
48041962e	220 mm	30 mm	2.8 mm	20 N
48051703b	180 mm	38 mm	3.4 mm	24 N
48096100h	240 mm	34 mm	2.9 mm	34 N
48137492x	200 mm	42 mm	3.8 mm	36 N
48177834x	250 mm	30 mm	2.5 mm	40 N
49663248s	150 mm	32 mm	3.6 mm	30 N
51807318w	180 mm	34 mm	3.5 mm	38 N
53868042h	190 mm	42 mm	2.8 mm	28 N
72825646x	200 mm	44 mm	3.5 mm	24 N
73023435e	290 mm	44 mm	2.6 mm	34 N

DNI	L_g	b	t	P
77127872v	190 mm	42 mm	3.5 mm	26 N
77129534t	250 mm	46 mm	3.4 mm	34 N
y1965048b	210 mm	36 mm	2.5 mm	38 N