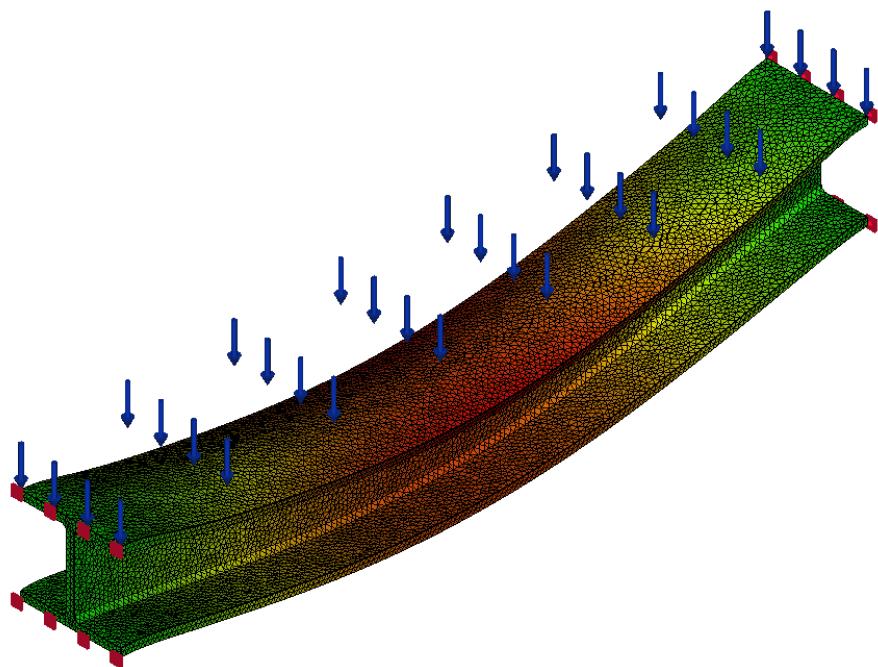


# Tutorial Inicial

con

## CalculiX y FreeCAD

(Modulo FEM)



Gomez Lucio Manuel  
Blog Ingeniería Libre y Abierta  
Mayo 2016 - Versión 1.0  
Licencia Creative Commons BY-SA 2.0



## **Resumen**

Este tutorial está destinado a introducir al lector en el flujo de trabajo del modulo FEM de FreeCAD en su versión 0.16. Veremos como crear un análisis estructural estático, mallar la geometría, crear condiciones de borde, iniciar el calculo, analizar el archivo input de CalculiX creado y analizar resultados.

Además también este tutorial puede servir como introductorio a CalculiX (solver FEM que utiliza FreeCAD en esta versión) y explicaremos algunas funciones de post-procesamiento de resultados en el post-procesador oficial CGX como complemento al modulo FEM.

# ÍNDICE

1 Introducción.....	1
1.1 Programas necesarios.....	1
1.2 Temas que se desarrollan.....	1
1.3 Unidades.....	2
1.4 Problema a resolver.....	2
2 Geometría.....	3
3 Modelo y solución analítica.....	5
4 Modulo FEM.....	7
4.1 Mallado.....	10
4.1.1 Utilizando el mallador por defecto (Netgen).....	10
4.1.2 Utilizando el el Macro GMSHMesh (Gmsh).....	12
4.2 Material.....	13
4.3 Condiciones de Contorno.....	15
4.3.1 Restricciones.....	15
4.3.2 Cargas.....	16
4.4 Ejecutar el solver.....	17
4.4.1 Escribir input.....	17
4.4.2 Ver y Analizar el input.....	19
4.4.3 Ejecutar el input en el solver.....	21
4.4.4 Ejecutar el solver de manera directa y en múltiples núcleos.....	22
4.5 Ver y analizar los resultados (Post-Procesando).....	22
4.6 Comparación de resultados con resultados analíticos.....	26
5 Post-Procesando con CGX.....	26
5.1 Por linea de comandos.....	26
5.2 Con el Macro CGX_FEM.....	32
6 Resumen.....	34
7 Referencias.....	34
Anexo A: Descargar, instalar y configurar el Macro GMSHMesh.....	35
Anexo B: Descargar, instalar y configurar el Macro CGX_FEM.....	38

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Perfil doble T de la viga.....	3
Figura 2.2: Sketch básico de perfil doble T en Part Design.....	3
Figura 2.3: Geometría a utilizar para nuestro modelo FEM.....	4
Figura 3.1: Condición de carga de la viga.....	5
Figura 3.2: Deformación de la viga en el plano.....	5
Figura 4.1: Configuración del modulo FEM.....	9
Figura 4.2: Cuadro de dialogo de mallado (Netgen).....	10
Figura 4.3: Mallado resultante con mallador por defecto (Netgen).....	11
Figura 4.4: Cuadro de dialogo del Macro GMSHMesh (Gmsh).....	12
Figura 4.5: Mallado resultante con el Macro GMSHMesh (Gmsh).....	13

Figura 4.6: Cuadro de dialogo de definición del material y sus propiedades mecánicas.	14
Figura 4.7: Restricciones del modelo.....	15
Figura 4.8: Cargas del modelo.....	16
Figura 4.9: Nuestro Modelo FEM, mallado, material, restricciones y cargas.....	17
Figura 4.10: Antes de utilizar la herramienta para ejecutar el solver debemos seleccionarlo en el árbol.....	17
Figura 4.11: Cuadro de dialogo para empezar el calculo.....	18
Figura 4.12: Leyendo input escrito por FreeCAD con el editor de texto interno.....	19
Figura 4.13: Análisis sencillo del input escrito.....	20
Figura 4.14: Distintos mensajes que aparecen durante el cálculo.....	21
Figura 4.15: Análisis completo con sus objetos en el árbol de FreeCAD.....	22
Figura 4.16: Tensiones de Von Misses.....	23
Figura 4.17: Deformación Absoluta, factor igual a 10.....	24
Figura 4.18: Cambiando la visualización del mallado.....	24
Figura 4.19: Deformación en el eje Z, factor de escala igual a 10.....	25
Figura 5.1: Ventana de CGX y emulador de terminal Konsole.....	27
Figura 5.2: Menú desplegable de CGX.....	28
Figura 5.3: Deformación absoluta en CGX.....	29
Figura 5.4: Tensiones de Von Misses en CGX y opción de cambio de color de fondo.	30
Figura 5.5: Deformación con un factor de escala igual a 10.....	31
Figura 5.6: Deformación con un factor de escala igual a 10 con unidades en metros..	32
Figura 5.7: Post-procesando con CGX utilizando el Macro CGX_FEM.....	33

## Índice de tablas

Tabla 1: Algunos sistema de unidades clásicos.....	2
Tabla 2: Propiedades de la viga en estudio.....	6
Tabla 3: Valores básicos de las tensiones de Von Misses.....	23
Tabla 4: Valores básicos de las deformaciones absolutas.....	23
Tabla 5: Valores básicos de las deformaciones absolutas.....	25
Tabla 6: Comparación de resultado del modelo FEM con resultado analítico.....	26

# 1 Introducción

El modulo FEM esta siendo desarrollado con la idea de proporcionar un flujo de trabajo moderno para el análisis de elementos finitos dentro de FreeCAD, integrando y combinando varias herramientas en una sola interfaz gráfica de usuario.

Aunque esta en pleno desarrollo, ya podemos empezar a usar esta herramienta para realizar un análisis estructural inicial para nuestros diseños.

## 1.1 Programas necesarios

Los programas necesarios para llevar a cabo este tutorial son los siguientes:

- FreeCAD 0.16
- CCX\*
- Netgen/FreeCAD\*

Opcionales:

- Gmsh Macro
- CGX
- Macro CGX\_FEM, Emulador de terminal Xterm (solo en GNU/Linux)

\* En la mayoría de los casos viene instalado por defecto junto a FreeCAD 0.16

## 1.2 Temas que se desarrollan

En este documento se desarrollaran los siguientes temas de FreeCAD:

- Mallado
- Condiciones de contorno
- Material
- Input de CalculiX
- Ejecutar simulación en CCX

- Post-Procesar los resultados

Ademas se brinda una introducción al post-procesamiento de los resultados en CGX como complemento a FreeCAD.

## 1.3 Unidades

En todo calculo FEM es necesario ser coherente con las unidades en las que se trabaja. Utilizar mal las unidades trae como resultado malos resultados.

A continuación mostramos una tabla comparativa de algunos de los distintos sistemas de unidades que podemos utilizar:

Propiedad	SI (MKS)	USC	FreeCAD input/resultados
Longitud	m	ft	mm
Tiempo	seg	seg	seg
Fuerza	N	lbf	N
Presión	Pa	bar	MPa
Modulo de Elasticidad	Pa	psi	MPa
Masa	Kg	lb	Kg
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>

**Tabla 1: Algunos sistema de unidades clásicos.**

FreeCAD soporta unidades tanto en el sistema Métrico como en el sistema Imperial. En el modulo FEM podemos utilizar ambos sistemas para definir las condiciones de borde y propiedades del material, pero las unidades en los resultados finales y en el input de CalculiX estarán en las que se muestran en la tabla anterior.

## 1.4 Problema a resolver

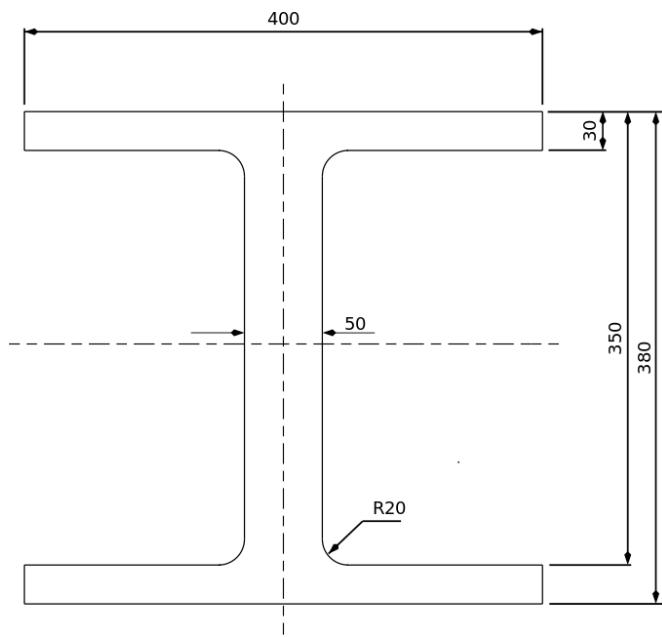
En este tutorial resolveremos una estructura muy sencilla, ya que el objetivo es dar una introducción a las herramientas que dispone FreeCAD para el calculo estructural y no dictar un tutorial avanzado sobre FEM.

El problema trata de una viga, de acero 1020, de perfil doble T, empotrada en ambos extremos con una carga de 10 MPa en la parte superior.

## 2 Geometría

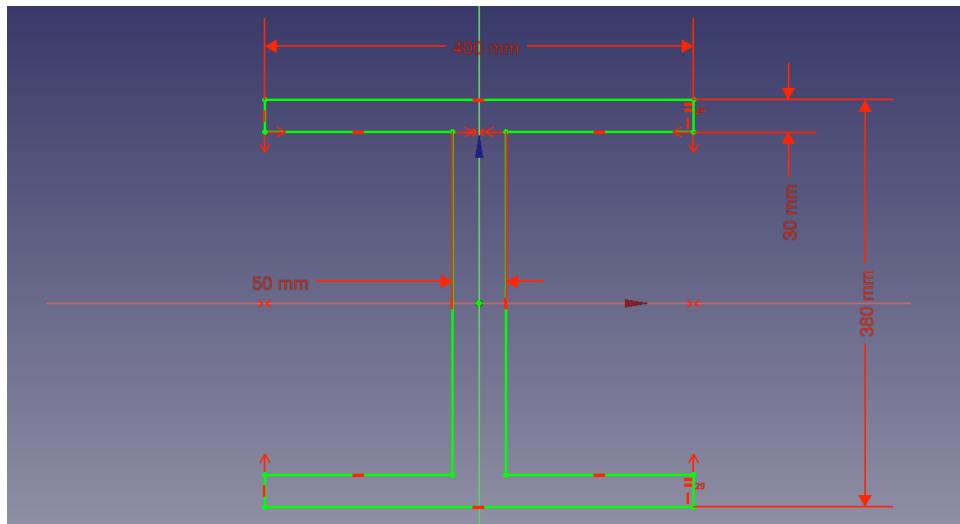
Para crear la geometría podemos utilizar el modulo Part Design. La idea de este tutorial no es aprender a dibujar en FreeCAD por lo que es necesario tener algún conocimiento de este programa para seguir los pasos siguientes.

A continuación colocamos una imagen del plano de la sección de la viga la cual tiene una longitud de 3 metros.



*Figura 2.1: Perfil doble T de la viga.*

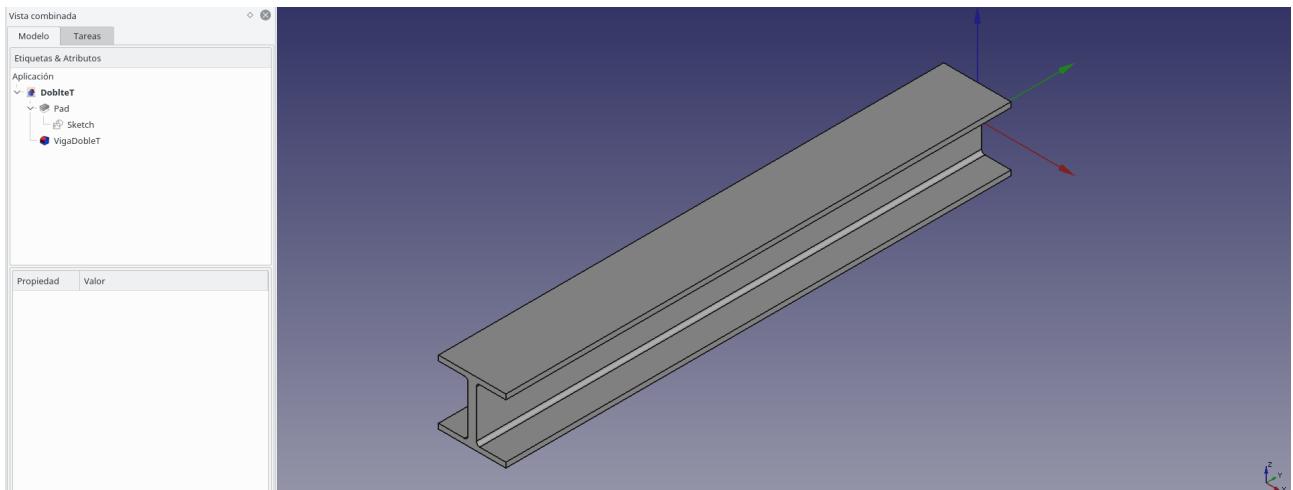
Creamos un **sketch** nuevo en el plano X-Z y dibujamos el siguiente bosquejo,



**Figura 2.2:** Sketch básico de perfil doble T en Part Design.

Luego extruimos (**Extruir**) este sketch 3000 mm (o 3 m). Seleccionamos las 4 aristas que son necesarias redondear (ver **Figura 2.1**) y las redondeamos con la opción **Redondear** (Fillet) con un radio de 20 mm. Renombramos la ultima operación como **VigaDobleT**.

El resultado final deberá ser el siguiente,

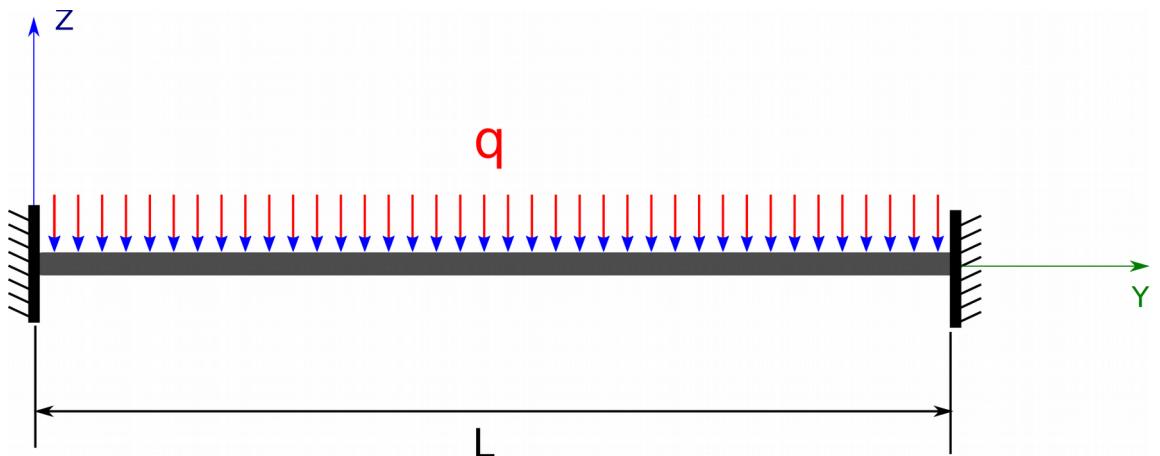


**Figura 2.3:** Geometría a utilizar para nuestro modelo FEM.

En la entrada del blog para este tutorial también estará disponible el archivo de FreeCAD (.fcstd) con la geometría para su directa utilización.

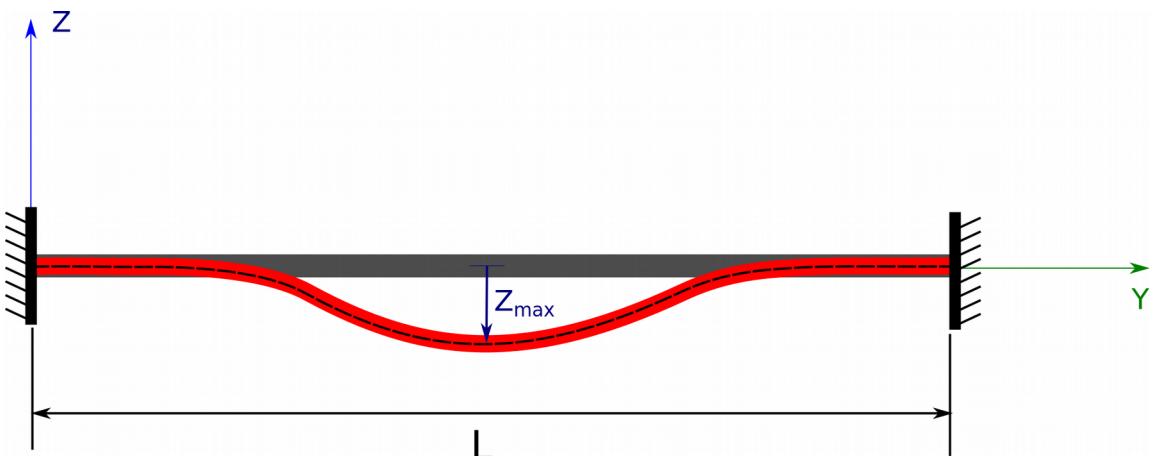
### 3 Modelo y solución analítica

El problema consta de una viga empotrada en ambos extremos con una carga uniformemente distribuida en la parte superior. Se trata de un problema hiperestático y en la referencia [2] podemos encontrar una solución al problema utilizando el método de descomposición en equivalencias.



**Figura 3.1:** Condición de carga de la viga.

La viga tendrá una deformación máxima en el centro como podemos ver en la siguiente figura,



**Figura 3.2:** Deformación de la viga en el plano.

Siguiendo los pasos de la Referencia [2] para el caso de una viga (2D) empotrada en ambos extremos, con una carga uniformemente distribuida (  $q$  ) en la longitud, la deformación máxima la podemos calcular con la siguiente ecuación,

$$z_{max} = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Si escribimos la carga en función de la presión de trabajo (  $P$  ) esta resulta,

$$q = \frac{P}{e}$$

donde  $e$  es tamaño del ala de perfil doble T o ancho.

La barra tiene las siguiente propiedades:

Propiedad	Valor
Longitud (L)	3 m
Ancho (e)	0,4 m
Modulo de elasticidad (E)	210 GPa
Momento de inercia de área (J)	0,00120528 m <sup>4</sup>

**Tabla 2:** Propiedades de la viga en estudio.

La carga resulta,

$$q = 25 \times 10^6 \frac{N}{m}$$

Y finalmente la deformación máxima en la viga es,

$$z_{max} = 0,0104173 m = 10,4173 mm$$

## 4 Modulo FEM

Luego de tener la geometría lista nos dirigimos al modulo (o banco de trabajo) FEM para empezar a crear nuestro modelo numérico.

En la barra de herramienta de este modulo podemos encontrar las siguientes opciones:

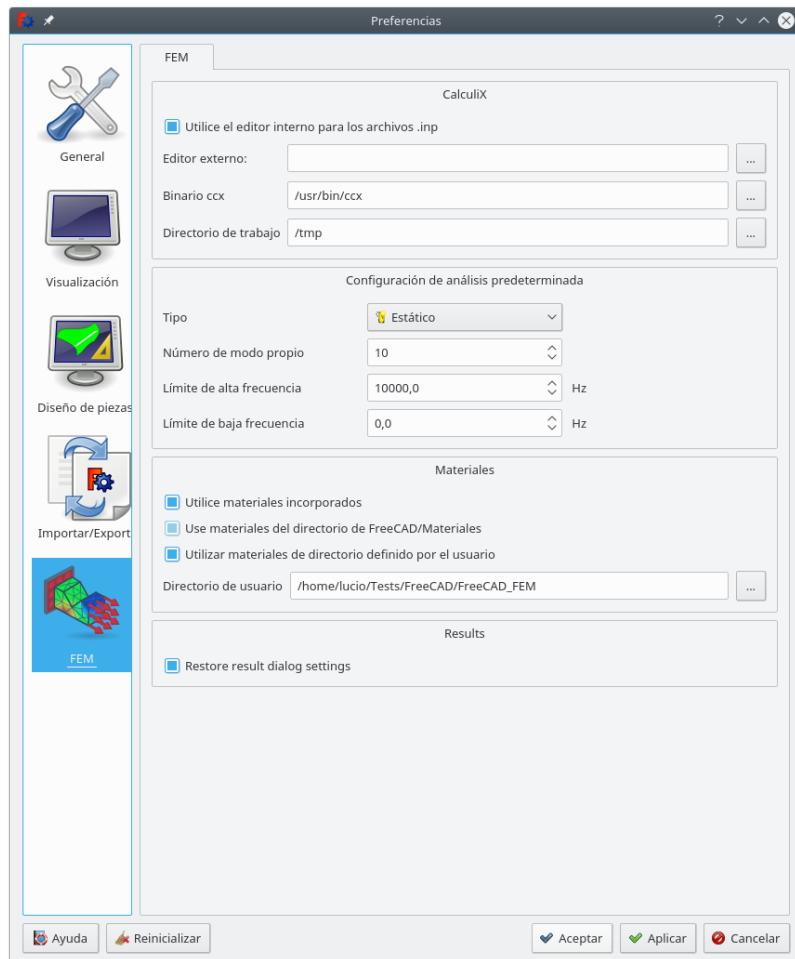
-  **New mechanical analysis:** Crea un contenedor para un nuevo análisis. Si al clickear en esta opción tenemos un objeto seleccionado, a continuación se abrirá el cuadro de dialogo para mallado.
-  **Create FEM solver:** Crea un nuevo solver para el análisis. En la mayoría de los casos el solver es creado junto con un nuevo análisis ya que hasta el momento solo cuenta con una opción (CalculiX).
-  **Create FEM mesh:** Abre el cuadro de dialogo de mallado.
-  **Mechanical material:** Abre el cuadro de dialogo para seleccionar el material a utilizar desde la base de datos. O la posibilidad de crear un nuevo material con sus propiedades.
-  **Beam Cross Section Definition:** Herramienta para definir la sección de un elemento tipo viga (beam).
-  **Shell Thickness Definition:** Herramienta para definir el espesor de un elemento tipo chapa (shell).
-  **Create FEM fixed constraint:** Herramienta para definir un restricción de fijación de puntos, ejes o superficies.
-  **Create FEM displacement constraint:** Herramienta para definir un desplazamiento y rotaciones de puntos, ejes o superficies.
-  **Create FEM force constraint:** Herramienta para definir una fuerza (N) uniformemente distribuida, en una superficie, punto, o eje, en una determinada dirección.

-  **Create FEM pressure constraint:** Herramienta para definir una presión en una superficie.
-  **Create FEM bearing constraint:** Herramienta para definir una restricción tipo rodamiento (bearing).
-  **Create FEM gear constraint:** Herramienta para definir una restricción tipo engranaje (gear).
-  **Create FEM pulley constraint:** Herramienta para definir una restricción tipo polea (pulley).
-  **Start calculation:** Abre el cuadro de dialogo para iniciar el calculo del solver.
-  **Run CalculiX ccx:** Ejecuta el solver de CalculiX (ccx) de manera automática utilizando todos los núcleos de nuestro microprocesador.
-  **Purge results:** Elimina los resultados actuales del árbol.
-  **Show result:** Herramienta para visualizar los resultados del estudio o análisis activo (Tensión de Von Misses, Desplazamientos).
- 

Si nos dirigimos al menú Editar – Preferencias... ingresaremos a las configuraciones de FreeCAD. Dependiendo de que módulos activamos anteriormente serán las configuraciones a las que podemos acceder, por eso es importante antes de entrar a esta opción activar el modulo FEM.

Una vez dentro de la configuración del modulo FEM podemos configurar, si queremos utilizar el editor de texto interno de FreeCAD para editar nuestros archivos de entrada (inputs) de CalculiX o un editor de texto externo a elección, la dirección del ejecutable del solver (CCX); la dirección por defecto (directorio de trabajo) donde se guardaran todos los archivos necesarios para correr la simulación, los resultados e información sobre la misma; elegir que tipo de análisis por defecto; configurar el análisis modal y configuración de ubicación de la librería de materiales.

Es recomendable configurar el directorio de trabajo en una carpeta conocida, porque si no FreeCAD aloja los archivos del modulo FEM en las carpetas temporales del sistema que se limpian cada vez que reiniciamos el sistema y por lo tanto perderemos esa información.



**Figura 4.1:** Configuración del modulo FEM.

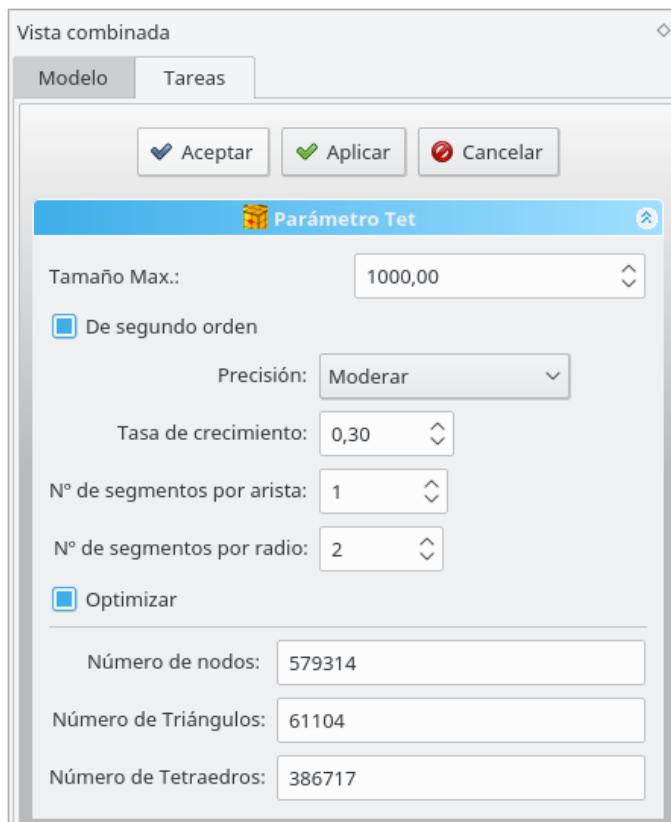
Para empezar un modelo FEM seleccionaremos la pieza a analizar (VigaDobleT) y clickeamos en crear un análisis **A**, lo cual nos redirigirá en este a caso al cuadro de dialogo para crear el mallado.

También podemos crear un análisis sin seleccionar ningún objeto antes. En ese caso se crea en el árbol una estructura del análisis correspondiente y un solver de calculiX y para poder mallar la pieza debemos seleccionar el objeto a mallar y utilizar la herramienta **Create FEM mesh** la cual nos abrirá el mismo dialogo que antes.

## 4.1 Mallado

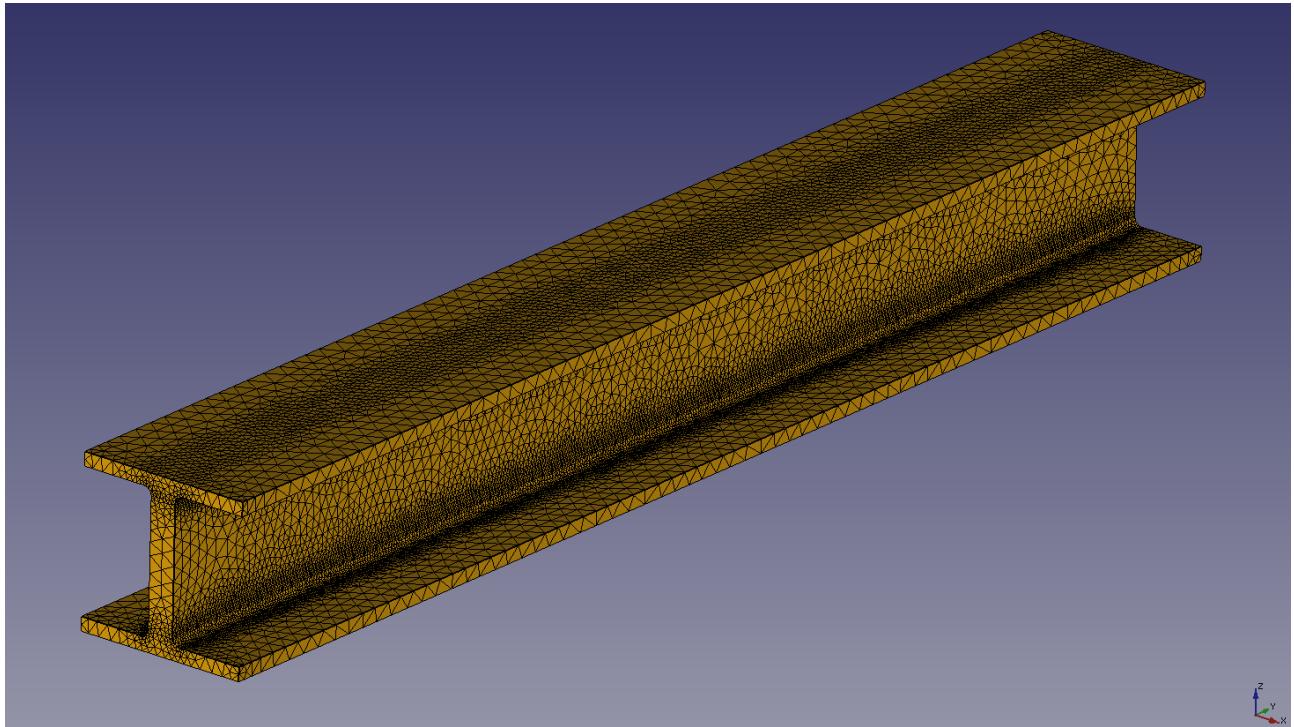
### 4.1.1 Utilizando el mallador por defecto (Netgen)

Luego de crear el análisis (o utilizando  se nos abre el cuadro de dialogo para mallar la pieza,



*Figura 4.2: Cuadro de dialogo de mallado (Netgen).*

En ese cuadro seleccionaremos la opción **Precisión** como **Moderar\*** y luego le damos a la opción **Aplicar**. Según la precisión que elijamos sera lo fino que sera nuestro mallado y como Netgen intentara colocar elementos en los bordes redondeados; tambien podemos configurar el máximo tamaño que puede tener un elemento para controlar el tamaño de nuestra malla. Después de esperar un rato (dependiendo de la PC que uno posea) se nos creara una malla en la ventana de visualización como muestra la siguiente figura,



**Figura 4.3:** Mallado resultante con mallador por defecto (Netgen).

\* Si cuentas con un PC no muy potente recomiendo utilizar la opción **Precisión: Grueso** o **Muy burda**.

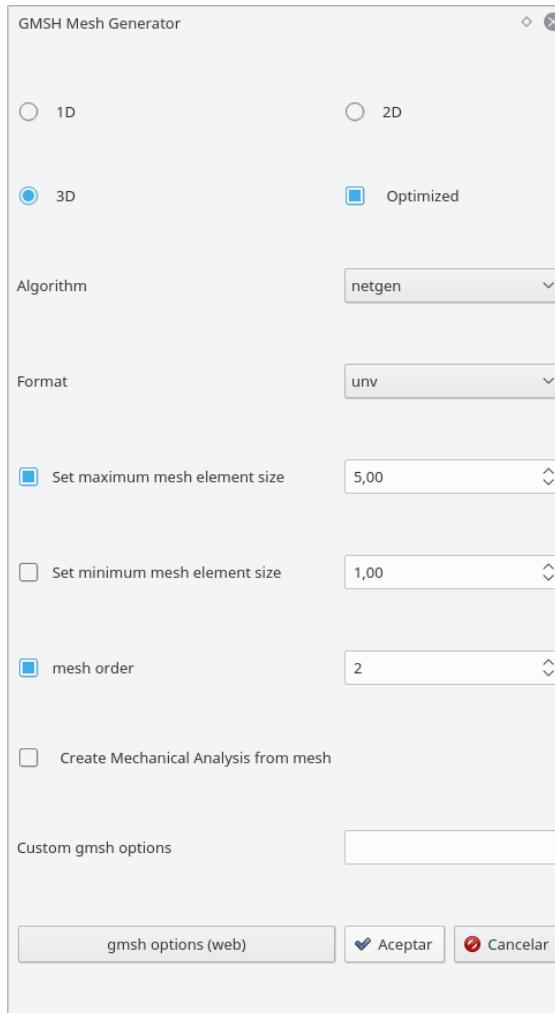
Consideramos a este mallado como aceptable y lo utilizaremos para el análisis por lo que clickeamos en el cuadro de dialogo en la opción **Aceptar**.

FreeCAD hasta el momento utiliza a Nergen como mallador por defecto, pero en algunos casos este mallador no se instala correctamente en FreeCAD por lo cual las instrucciones anteriores no resultaran.

Como mallador alternativo a Netgen dentro de FreeCAD podemos utilizar el macro GMSHMesh, el cual proporciona una interfaz integrada para utilizar el programa Gmsh de manera externa como mallador.

#### 4.1.2 Utilizando el el Macro GMSHMesh (Gmsh)

Para mallar con este macro seleccionamos la pieza a mallar y luego lanzamos la macro la cual abrirá el siguiente cuadro de dialogo a la derecha de nuestra pantalla.

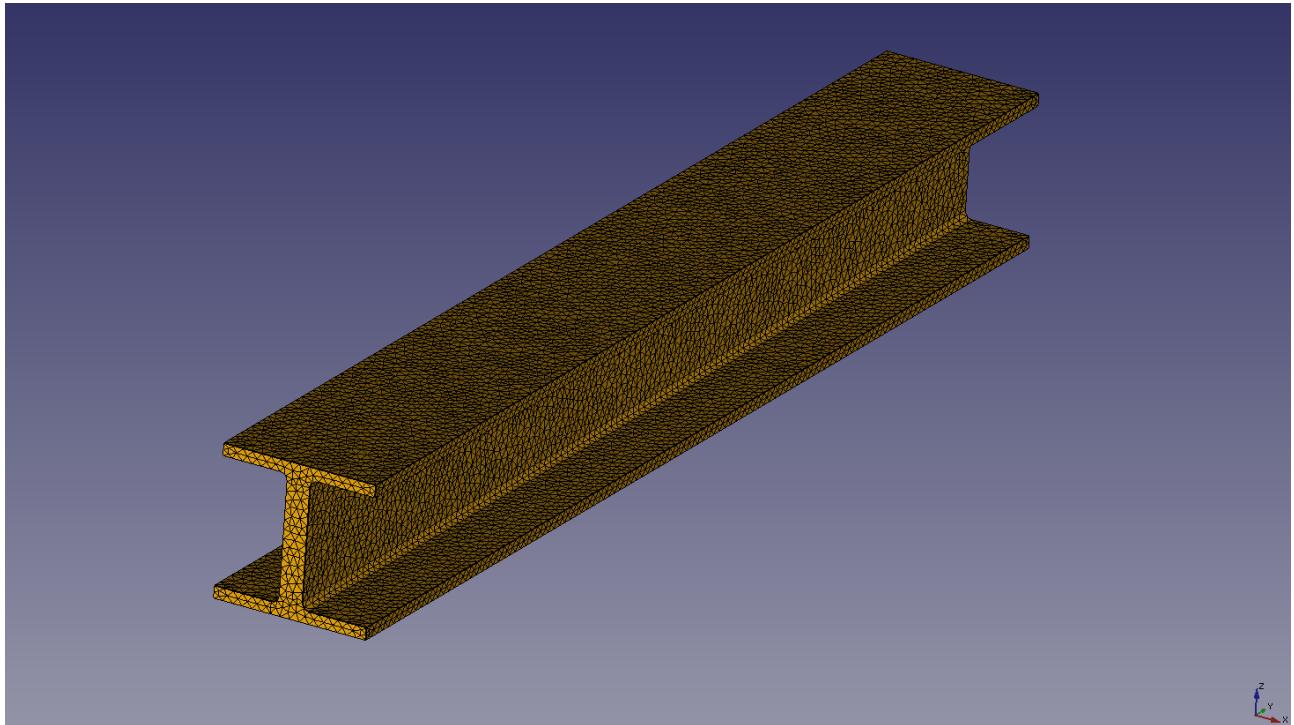


**Figura 4.4:** Cuadro de dialogo del Macro GMSHMesh (Gmsh).

En este caso modificamos las opciones ***Set maximum mesh element size*** a 25\*, y activamos la opción ***Create Mechanical Analysis from mesh*** y luego **Aceptar** para crear el mallado pertinente.

\* Si cuentas con un PC no muy potente recomiendo setear la opción ***Set maximum mesh element size*** en 50 o 100.

Estas opciones crearan un mallado como en la figura siguiente y también un análisis mecánico nuevo que incluirá esta malla en el árbol.



**Figura 4.5:** Mallado resultante con el Macro GMSHMesh (Gmsh).

Como vemos el mallado difiere del anterior, pero en este tutorial no entraremos en detalle sobre este tema.

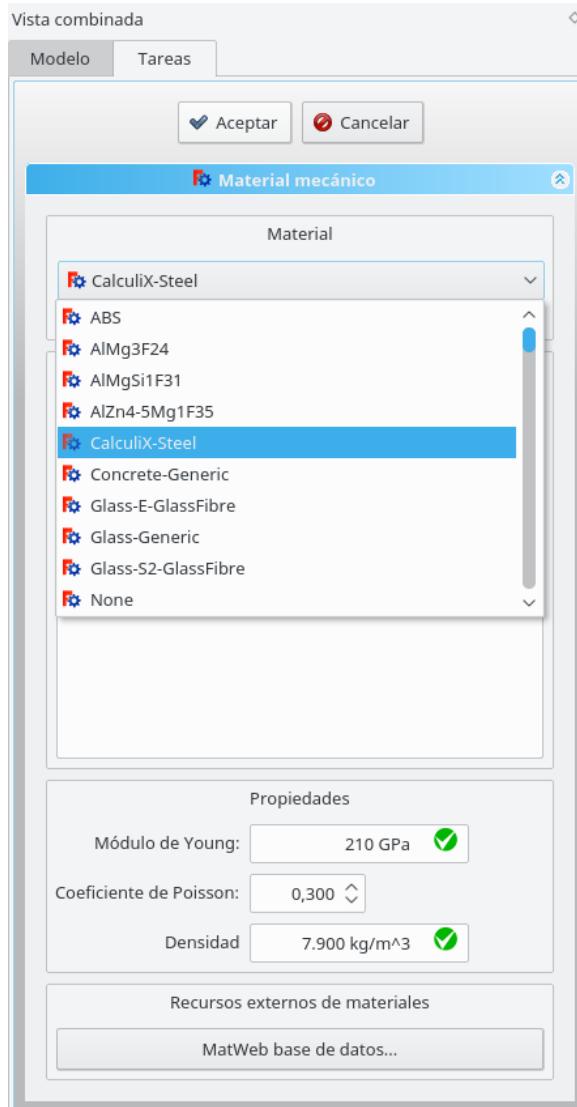
En el **Anexo A** vemos como descargar, instalar y configurar esta macro.

## 4.2 Material

Luego de que tengamos un mallado definido procederemos a definir un material y sus propiedades mecánicas a la pieza a analizar.

Para agregar un material debemos utilizar la herramienta **Mechanical material** , cliqueando en ella nos abrirá un dialogo en el cual nos ofrecerá una gran variedad de materiales disponibles en una librería interna que posee FreeCAD.

En este caso utilizaremos el material **CalculiX-Steel** que lo seleccionaremos desde la barra desplegable de materiales. Este material tiene las mismas propiedades que pretendemos utilizar en nuestro modelo FEM.



**Figura 4.6:** Cuadro de dialogo de definición del material y sus propiedades mecánicas.

Una vez creado el material este sera agregado al árbol dentro del análisis correspondiente para poder editarlo si es necesario.

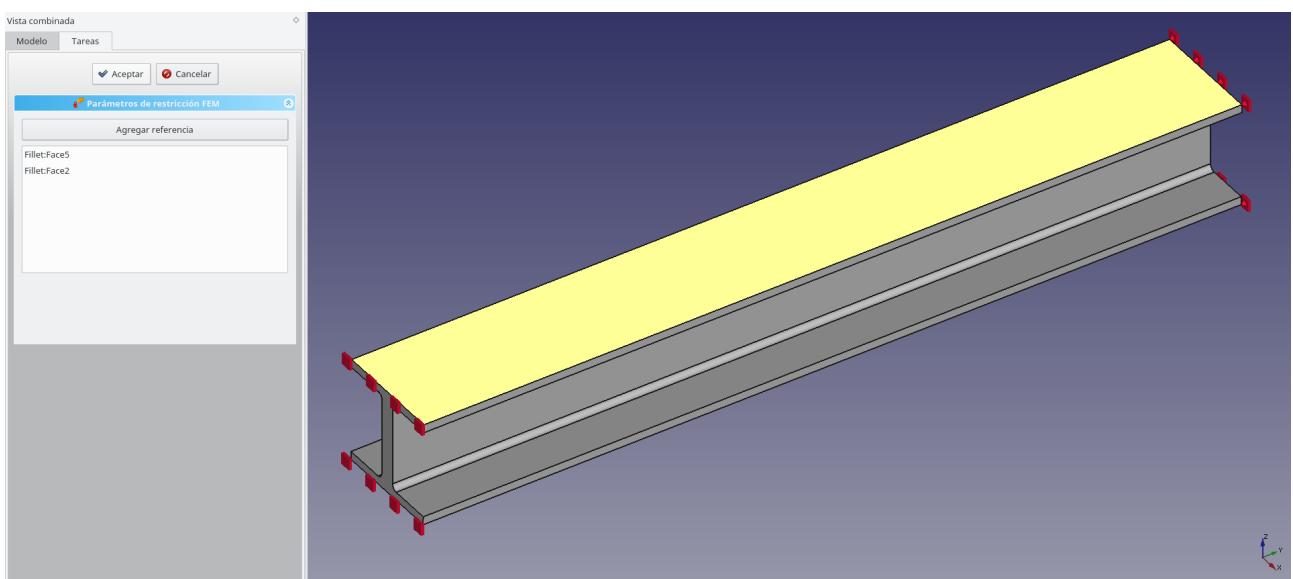
Ademas de utilizar los materiales disponibles de la librería interna de FreeCAD, podemos crear nuestra propia librería de materiales pero esto escapa de los objetivos de este tutorial.

## 4.3 Condiciones de Contorno

Para aplicar las condiciones de contorno de este problema debemos ocultar el mallado, click derecho sobre el y seleccionar **Conmutar visibilidad** para ocultarlo (o presionar la barra espaciadora). Ahora debemos mostrar la pieza a la cual necesitamos agregar las condiciones de borde (VigaDobleT), al igual que antes click sobre la parte y seleccionar **Conmutar visibilidad** en este caso para visualizarla.

### 4.3.1 Restricciones

Con la pieza visualizada agregaremos una restricción de fijación en cada una de las caras de los extremos de la pieza. Para ello seleccionamos la herramienta **Create FEM fixed constraint**  en la barra de herramientas. Esto nos abrirá un cuadro de dialogo en el cual podemos seleccionar (con la opción **Agregar referencia**) las caras o superficies que serán fijas en nuestro análisis.



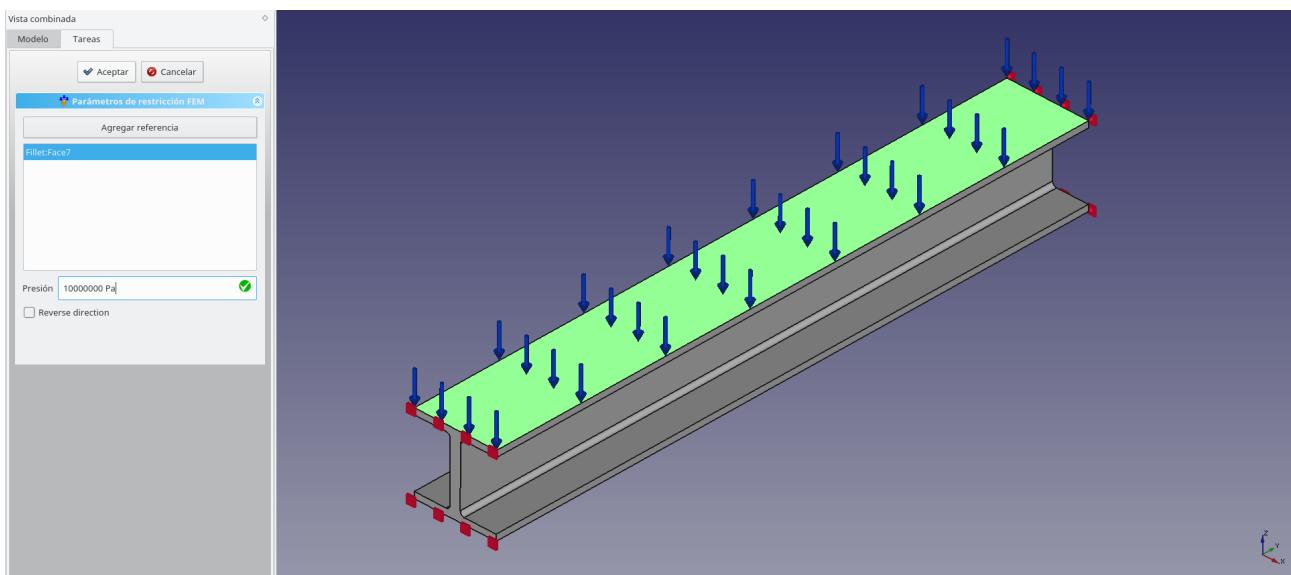
*Figura 4.7: Restricciones del modelo.*

En la figura anterior podemos ver como estas restricciones se agregan de forma visual a la pieza. Una vez seleccionadas ambas caras (aparecerán sus nombres en el cuadro de dialogo) y podemos clickear en **Aceptar** para dar por finalizado este paso.

#### 4.3.2 Cargas

Para definir nuestra carga de presión sobre la viga utilizaremos la herramienta **Create FEM pressure constraint**  (con la parte seleccionada), esta nos abrirá un nuevo cuadro de dialogo en donde deberemos definir (con la opción **Agregar referencia**) la cara o superficie donde se aplicara la presión.

En este caso seleccionaremos la cara superior de la viga doble T y aplicaremos una presión de 10.000.000\* Pa que en esa área significaría una carga de unos 1.200.000 Kgf.



**Figura 4.8:** Cargas del modelo.

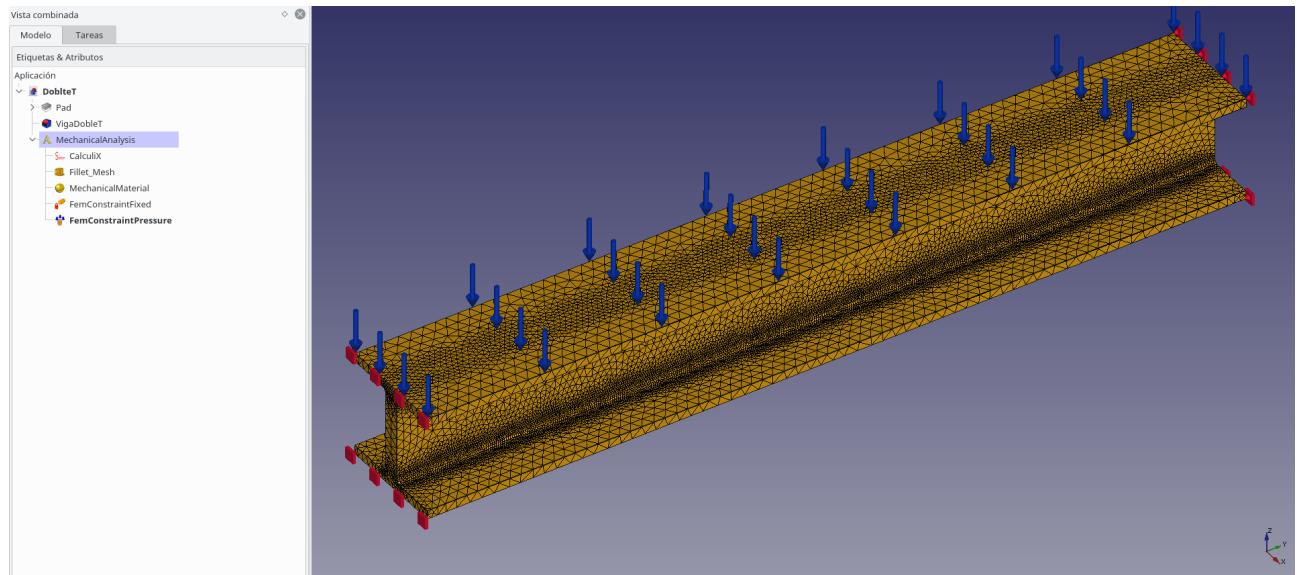
Debemos verificar que cuando cargamos un dato con unidades nos aparezca un tilde de color verde para saber si la unidad que estamos ingresando es correcta.

Podemos cambiar la dirección de la aplicación de la presión activando o desactivando la opción **Reverse direction**.

\* También podemos ingresar una carga de 10 MPa que es equivalente a nuestra carga pero utilizando otras unidades.

## 4.4 Ejecutar el solver

Una vez que aplicamos las condiciones de contorno en nuestro modelo, volvemos a visualizar nuestra malla de la misma manera que lo hicimos anteriormente (click derecho - **Conmutar visibilidad**) pero en este caso el mallado se hará visible\*.



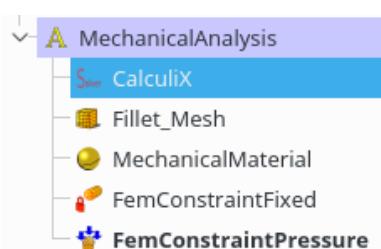
**Figura 4.9:** Nuestro Modelo FEM, mallado, material, restricciones y cargas.

\* Es recomendable también ocultar la parte para que no estorbe luego en la visualización de los resultados.

Ahora tenemos todo listo para ejecutar nuestro modelo FEM en el solver.

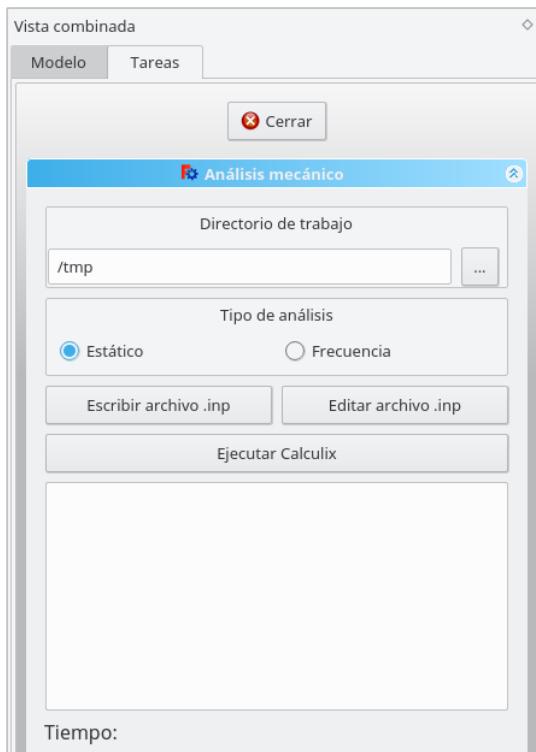
### 4.4.1 Escribir input

Para escribir y ejecutar nuestro input utilizaremos la herramienta **Start calculation** . Pero veremos que es imposible clickear en ella debido a que esta inactiva. Esto se debe a que para ejecutar el solver primero debemos seleccionarlo en el árbol como se muestra a continuación.



**Figura 4.10:** Antes de utilizar la herramienta para ejecutar el solver debemos seleccionarlo en el árbol.

Ahora esta deberá aparecer activa y al clickear sobre ella se nos abrirá el siguiente cuadro de dialogo,



**Figura 4.11:** Cuadro de dialogo para empezar el calculo.

En la parte superior del cuadro de dialogo podremos definir nuestro **Directorio de trabajo** donde se guardara el input escrito, así como los resultados obtenidos luego de ejecutar el solver. Esto como ya vimos también lo podemos definir anteriormente en la configuración del modulo FEM.

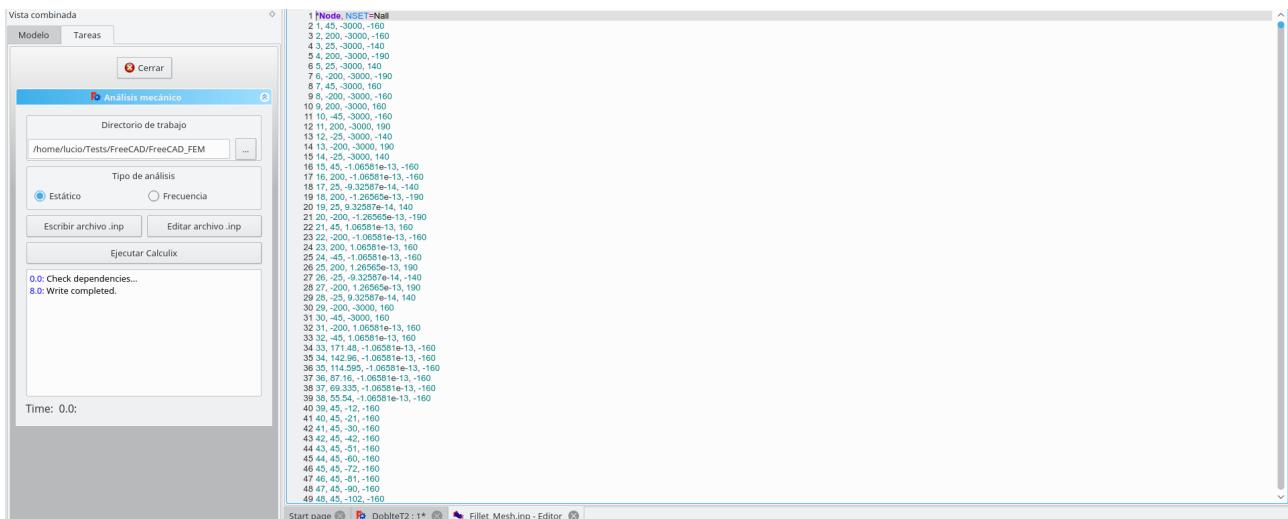
En el **Tipo de análisis** dejaremos seleccionada la opción **Estático** que es el tipo de problema que queremos resolver en este tutorial.

Luego ya podemos escribir nuestro input clickeando en **Escribir archivo .inp**. Esto tardara un rato (dependiendo del PC que uno posea, tengan paciencia).

Al finalizar nos aparecerá un mensaje, **Write completed**, en el cuadro inferior, antecedido por el tiempo que ha transcurrido para escribir el input (en mi caso fueron 8 segundos).

#### 4.4.2 Ver y Analizar el input

El input en CalculiX es un archivo de texto plano (extensión .inp), por lo cual podemos leerlo, editarlo y analizarlo con un editor de texto. Para ello utilizamos la opción **Editar archivo .inp** y automáticamente se nos abrirá el archivo en cuestión en el editor de texto interno de FreeCAD en una nueva pestaña o en un editor externo según la configuración pertinente del modulo FEM que tengamos.



**Figura 4.12:** Leyendo input escrito por FreeCAD con el editor de texto interno.

Haciendo un análisis sencillo de este archivo de texto veremos que al principio se escribe toda la información de los nodos de la malla (un montón de números), si bajamos encontraremos la información del material, de las condiciones de contorno, de análisis a ejecutar y los resultados que queremos visualizar luego de finalizado el calculo.

```

1 *Node, NSET=Nall
2 1, 45, -3000, -160
3 2, 200, -3000, -160
4 3, 25, -3000, -140
5 4, 200, -3000, -190
6 5, 25, -3000, 140
7 6, -200, -3000, -190
8 7, 45, -3000, 160
91917 ****
91918 ** Element sets for materials and FEM element type (solid, shell, beam)
91919 ** written by write_element_sets_material_and_femelement_type function
91920 *ELSET,ELSET=MechanicalMaterialSolid
91921 Eall
91922
91923 ****
91924 ** Node set for fixed constraint
91925 ** written by write_node_sets_constraints_fixed function
91926 *NSET,NSET=FemConstraintFixed
91927 1,
91928 2,
91929 3,
91930 4,
92828 ** written by write_materials function
92829 ** Young's modulus unit is MPa = N/mm2
92830 **FreeCAD material name: Calculix-Steel
92831 *MATERIAL, NAME=MechanicalMaterial
92832 *ELASTIC
92833 210000, 0.300
92834 *DENSITY
92835 7.900e-09,
92836
92837 ****
92838 ** Sections
92839 ** written by write_femelementsets function
92840 *SOLID SECTION, ELSET=MechanicalMaterialSolid, MATERIAL=MechanicalMaterial
92841
92842 ****
92843 ** One step is needed to calculate the mechanical analysis of FreeCAD
92844 ** loads are applied quasi-static, means without involving the time dimension
92845 ** written by write_step_begin function
92846 *STEP
92847 *STATIC
92848
92849 ****
92850 ** Constraints
92851 ** written by write_constraints_fixed function
92852 *BOUNDARY
92853 FemConstraintFixed,1
92854 FemConstraintFixed,2
92855 FemConstraintFixed,3
92867
92868 ****
92869 ** Element + Calculix face + load in [MPa]
92870 ** written by write_constraints_pressure function
92871 *DLOAD
92872 ** Load on face Face7
92873 36645,P2,10.0
92874 36810,P2,10.0
92875 36811,P2,10.0
92876 36879,P1,10.0
92877 36880,P3,10.0
95690 ****
95691 ** Outputs --> frd file
95692 ** written by write_outputs_types function
95693 *NODE FILE
95694 U
95695 *EL FILE
95696 S, E
95697 ** outputs --> dat file
95698 *NODE PRINT, NSET=Nall
95699 U
95700 *EL PRINT, ELSET=Eall
95701 S
95702
95703 ****
95704 ** written by write_step_end function
95705 *END STEP
95706
95707 ****

```

← Mallado

Definición de tipo de mallado  
(solido mecánico)

Definición de elementos que  
estaran empotradados

← Definición del Material

Asignación del Material  
al mallado

← Creación del paso para un  
análisis estatico

← Aplicación de restricción de empotramiento

← Carga de Presión

Resultados a escribir en el  
archivo de salida,  
U : defomaciones  
S : Tensiones

← Fin de análisis estatico

**Figura 4.13:** Análisis sencillo del input escrito.

Este input puede modificarse antes de la ejecución para agregar mas opciones que todavía no están incluidas FreeCAD (v0.16).

En versiones futuras de FreeCAD se planea crear el mallado y sus grupos de manera aparte del input (en otro archivo de texto, extensión .msh) y incluir este en una sola linea de código que llama al mismo. Esto lograra tener un archivo de entrada mas limpio y sencillo de analizar, y de modificar.

#### 4.4.3 Ejecutar el input en el solver

Una vez que ya tengamos nuestro input correctamente escrito lo cerramos (o guardamos si es que lo modificamos) y podemos ejecutar el solver con la opción **Ejecutar Calculix**. Es importante aclarar que con esta opción ejecutaremos el solver en un solo núcleo de nuestro microprocesador.

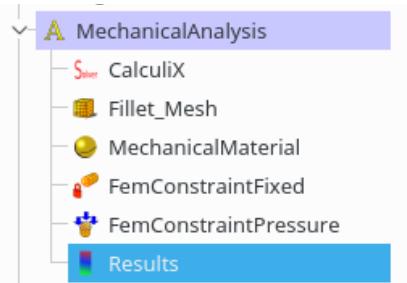
Si utilizamos esta opción, el solver empezara a ejecutar nuestro modelo y nos aparecerán distintos mensajes en el cuadro inferior que nos dará una idea de como se esta llevando a cabo la ejecución. Podemos cancelar esta en cualquier momento con la opción **Break CalculiX**.

Luego de un tiempo nos aparecerá un mensaje de que la simulación a finalizado (**CalculiX Done!**) con el tiempo transcurrido de ejecución (en mi caso 98,9 segundos).



**Figura 4.14:** Distintos mensajes que aparecen durante el cálculo.

Luego FreeCAD importara los resultados de la simulación (lo cual también lleva cierto tiempo), y una vez finalizado el proceso nos aparecerá en el árbol un nuevo objeto llamado **Results** el cual representa los resultados obtenidos.



**Figura 4.15:** Análisis completo con sus objetos en el árbol de FreeCAD.

#### 4.4.4 Ejecutar el solver de manera directa y en múltiples núcleos

Si no deseamos editar el input y quisiéramos directamente ejecutar el solver CalculiX y además aprovechar todos los núcleos de nuestro microprocesador utilizamos la opción

**Run CalculiX ccx** . Esta escribirá el input y ejecutara CalculiX en nuestro micro

con los núcleos correspondientes, guardara los resultados (y el input) en el directorio de trabajo correspondiente y cargara los resultados dentro de FreeCAD de manera automática.

## 4.5 Ver y analizar los resultados (Post-Procesando)

Una vez que hayamos logrado con éxito ejecutar nuestro modelo FEM podemos hacer un post-procesamiento rápido con FreeCAD con la opción **Show result** , la cual nos abrirá un cuadro de dialogo donde podemos intercalar entre los distintos resultados que nos ofrece con su valor máximo, mínimo y promedio. Los resultados que nos ofrece son la deformación en los ejes X, Y Z, deformación absoluta y tensiones de Von Misses.

A su vez nos ofrece una escala de colores en el mallado pero al no contar con la barra de escala con los valores correspondientes solo sirve para dar una idea en general de los

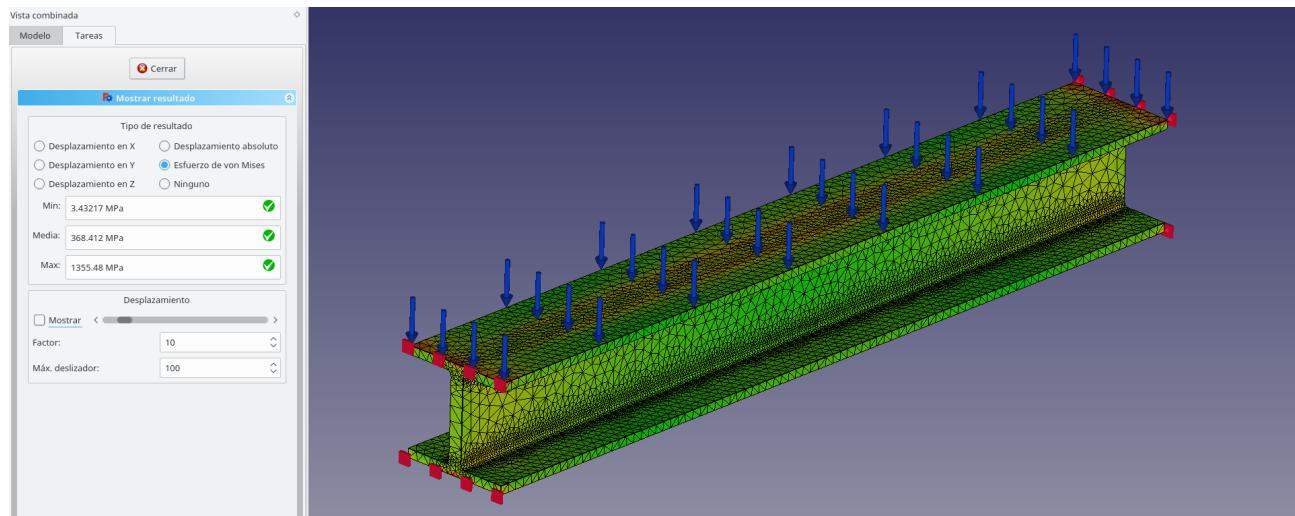
valores observados. Esta barra esta en desarrollo y la vamos a poder encontrar en la versión 0.17 de FreeCAD.

Los resultados de tensiones de Von Misses son los siguientes:

<b>Valor Mínimo</b>	3,43 MPa
<b>Valor Medio</b>	368,41 MPa
<b>Valor Máximo</b>	1355,48 MPa

**Tabla 3:** Valores básicos de las tensiones de Von Misses.

\*En el caso de haber utilizado el mallado resultante con el macro GMSHMesh los resultados anteriores y posteriores deberían ser similares.



**Figura 4.16:** Tensiones de Von Misses.

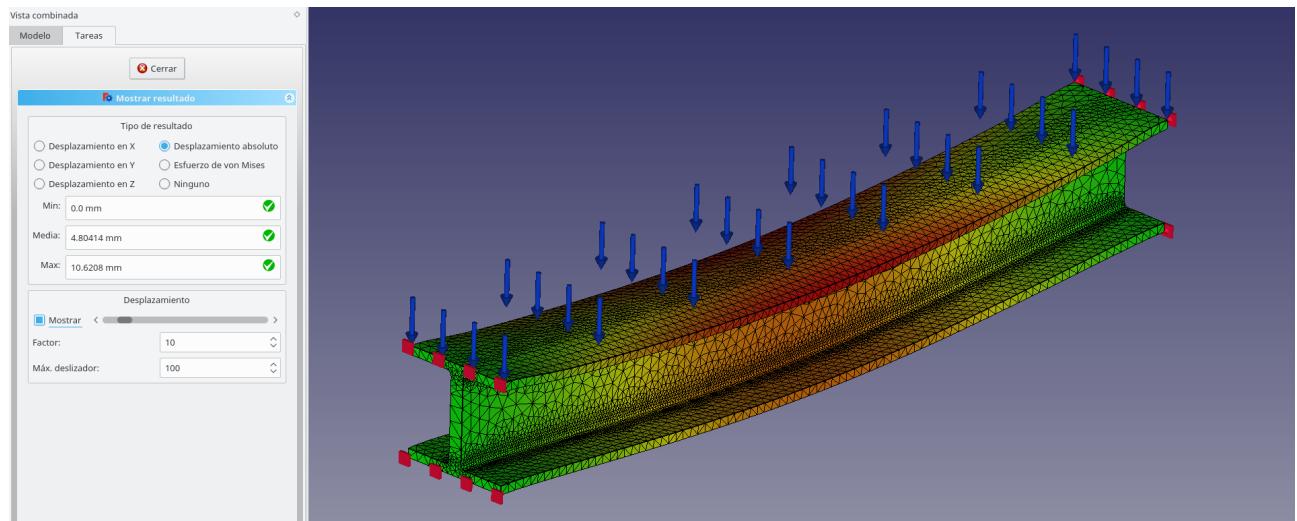
Mientras que los resultados de deformación absoluta son los siguientes:

<b>Valor Mínimo</b>	0 mm
<b>Valor Medio</b>	4,80 mm
<b>Valor Máximo</b>	10,62 mm

**Tabla 4:** Valores básicos de las deformaciones absolutas.

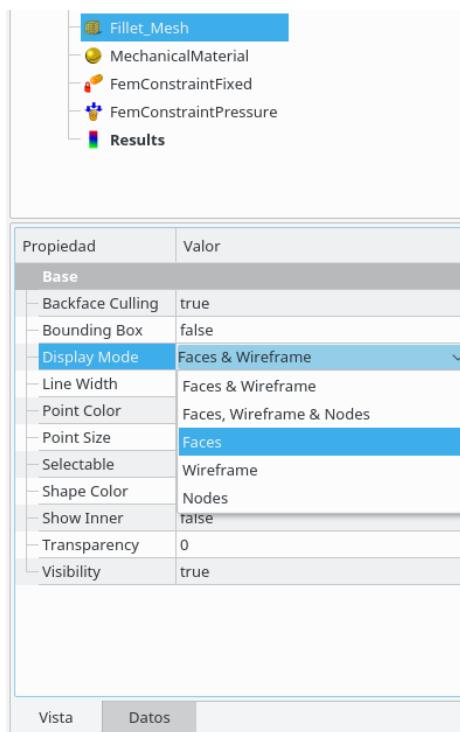
Para poder ver la deformación de la pieza en una escala donde sea claramente visible podemos utilizar el cuadro *Desplazamiento*. En este activamos la opción **Mostrar** y luego cambiando el valor en el cuadro **Factor** o utilizando la barra deslizadora

multiplicaremos la escala de la deformación solo por un propósito de una mejor visualización (ver que los resultados de deformación no cambian).



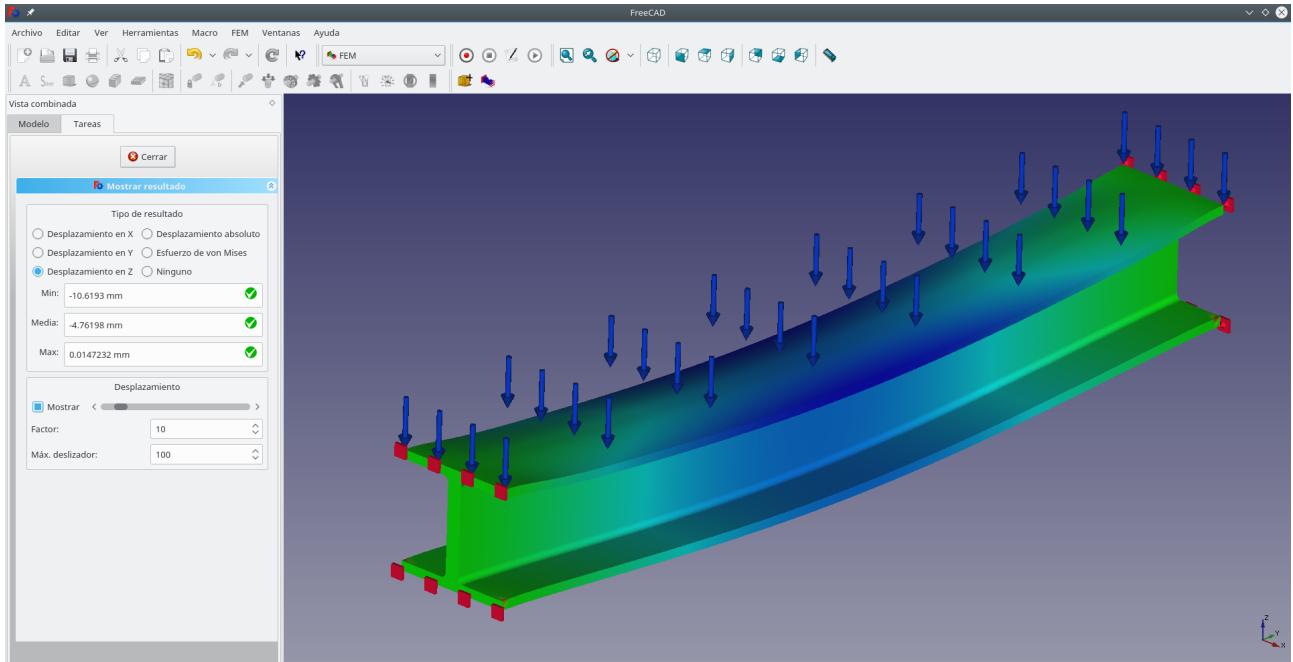
**Figura 4.17:** Deformación Absoluta, factor igual a 10.

Para no ver las aristas del mallado en la visualización de los resultados, seleccionamos el mallado y en la pestaña **Vista** y el la opción **Display Mode** seleccionamos **Faces**.



**Figura 4.18:** Cambiando la visualización del mallado.

Resultando en una visualización mas limpia del resultado seleccionado, sin las aristas del mallado, como se muestra en la imagen a continuación,



**Figura 4.19:** Deformación en el eje Z, factor de escala igual a 10.

Los resultados en de deformación en el eje Z, que son los que vamos a usar para comparar con el resultado del modelo analítico, son los siguientes:

<b>Valor Mínimo</b>	-10,619 mm
<b>Valor Medio</b>	4,761 mm
<b>Valor Máximo</b>	0,0147 mm

**Tabla 5:** Valores básicos de las deformaciones absolutas.

## 4.6 Comparación de resultados con resultados analíticos

En la siguiente tabla podemos ver la comparación del resultado de deformación máxima de la viga según el procedimiento analítico y el resultado de nuestro modelo FEM.

	<b>Modelo FEM</b>	<b>Modelo Analítico</b>	<b>Error %</b>
Deformación máxima en eje Z mallado con Netgen	10,619 mm	10,417 mm	+1,93
Deformación máxima en eje Z mallado con Gmsh	10,491 mm	10,417 mm	+0,71

**Tabla 6:** Comparación de resultado del modelo FEM con resultado analítico.

Ademas en la misma tabla agregamos el resultado obtenido en el caso de utilizar el mallado obtenido por el macro GMSHMesh.

Como vemos en la tabla anterior nuestro modelo FEM, con cualquiera de los dos mallados posibles, se acerco bastante al resultado del modelo analítico, teniendo un error en ambos casos insignificante.

## 5 Post-Procesando con CGX

CalculiX nos ofrece un programa para pre y post procesar nuestros modelos FEM llamado CGX (CalculiX GraphiX). En el caso de que lo tengamos instalado en nuestra computadora tenemos una alternativa mas completa para poder post-procesar el resultado obtenido con el modulo FEM de FreeCAD.

Es importante resaltar que las unidades de los resultados están en SI(mm), ver Tabla 1.

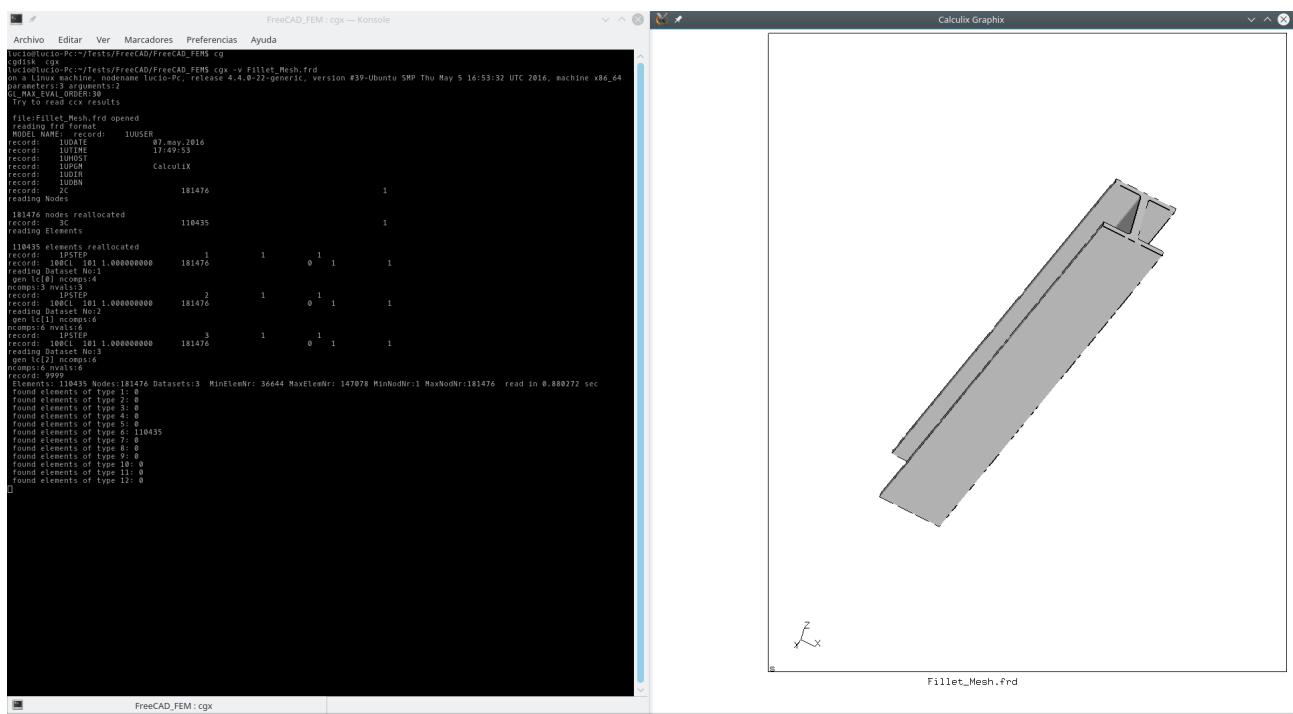
### 5.1 Por linea de comandos

Para utilizar CGX en Linux o en Windows\* debemos abrir un emulador de terminal en la carpeta donde tengamos los resultados (directorio de trabajo) y ejecutar el siguiente comando\*\*,

```
cgx -v Fillet_Mesh.frd
```

- \* En el caso de Windows si tenemos instalada la versión de bconverged de CalculiX solo es necesario ejecutar la opción **cgx** que la misma ya abre una terminal propia donde colocar nuestros comandos.
- \* Fillet\_Mesh debería ser el nombre del archivo de resultados (extensión .frd), en el caso de que tengan otro deberán modificar el comando anterior para utilizar el archivo correcto.

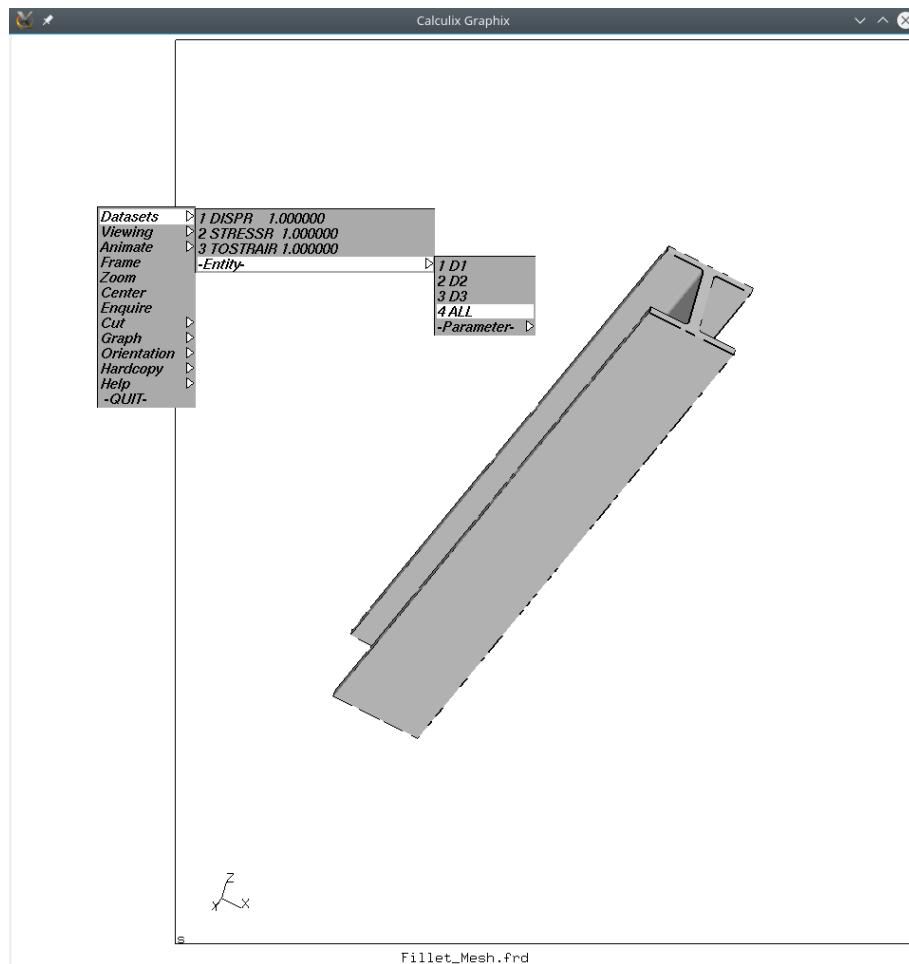
Una vez que introducimos ese comando se nos abrirá 1 ventana como se muestra a continuación con la geometría del perfil doble T,



**Figura 5.1:** Ventana de CGX y emulador de terminal Konsole.

Ademas estará la consola (konsole en mi caso) correspondiente la cual no debemos cerrar porque en ella introduciremos algunos comandos para post-procesar.

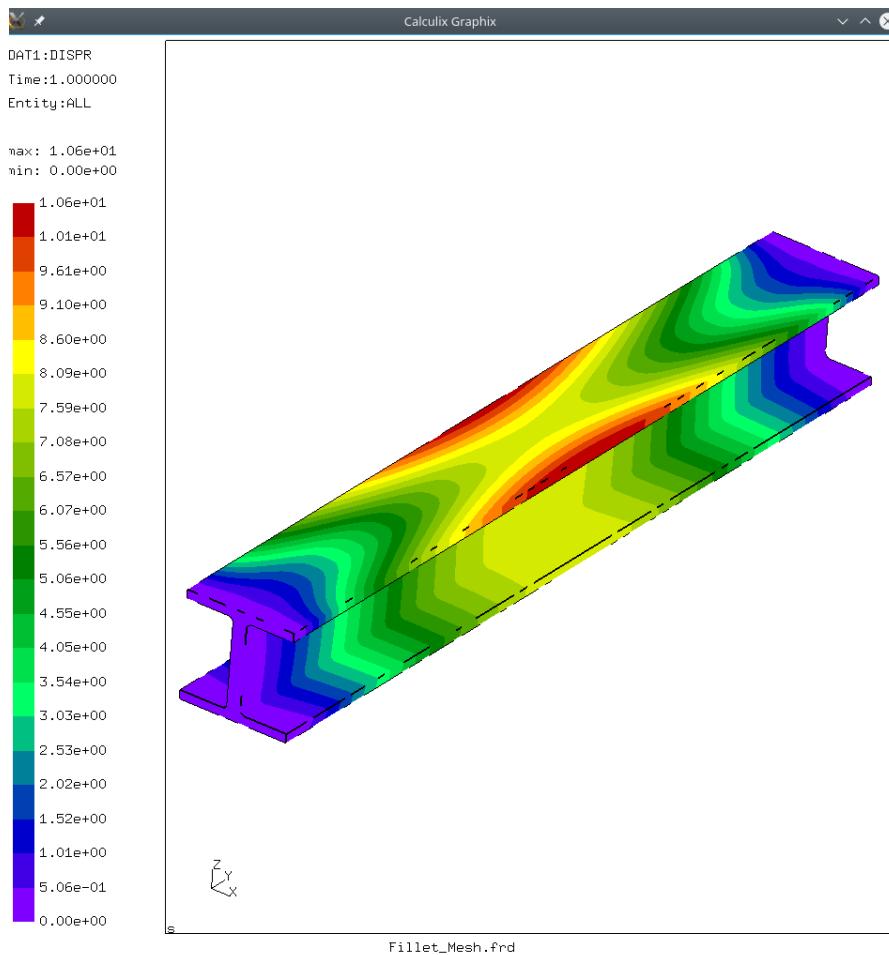
Para manipular la visualización clickeamos en la ventana rectangular donde se encuentra la pieza y con el click izquierdo vamos a poder rotar la misma (el punto de rotación es el punto donde hacemos click), con el click derecho movemos la parte de una lado a otro y con la rueda central hacemos zoom.



**Figura 5.2:** Menú desplegable de CGX.

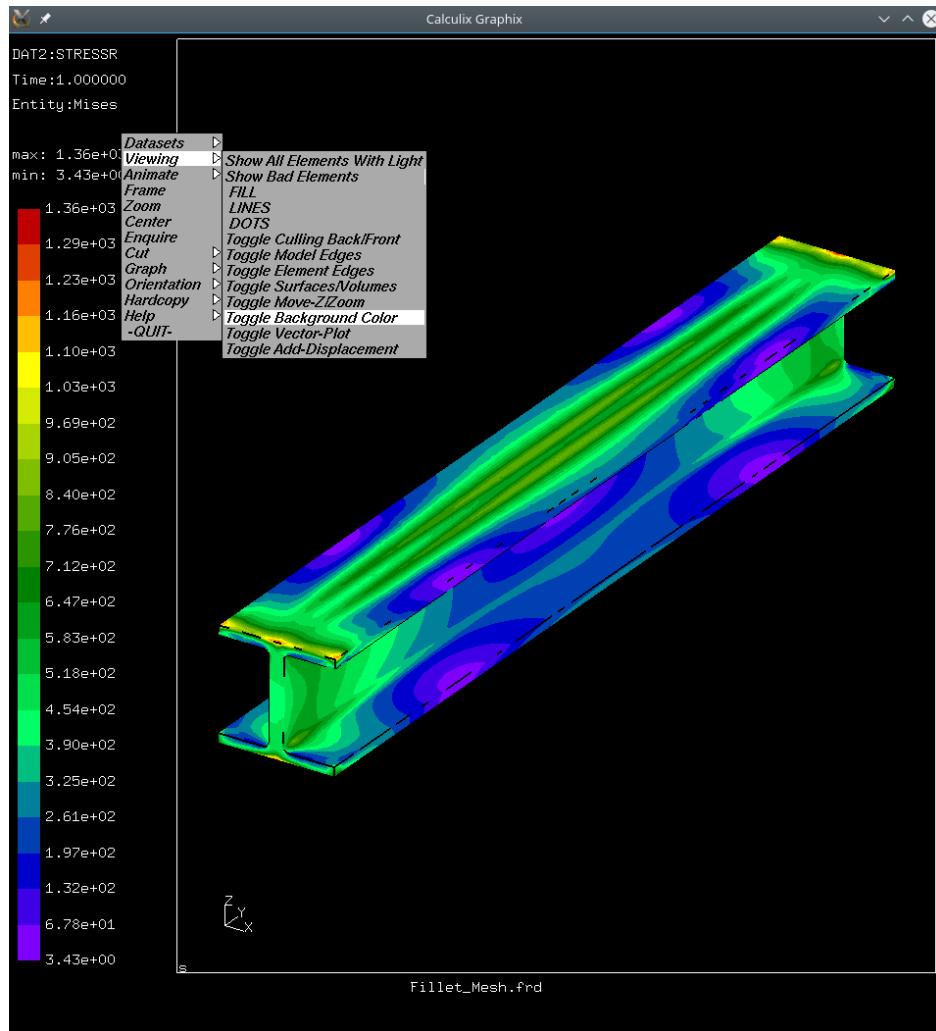
En la izquierda de esta misma ventana si hacemos click izquierdo se desplegará un menú con varias opciones (ver **Figura 5.2**). Por ejemplo si en ese menú seleccionamos (manteniendo apretado el click izquierdo) **Datasets – Entity – ALL** vamos a observar las deformaciones absolutas. Además vemos que en este caso tenemos una escala de colores a un lado lo cual permite una mejor interpretación de los resultados y los valores máximo y mínimos correspondientes (ver **Figura 5.3**).

Para ver otros resultados, como por ejemplo las tensiones de Von Misses primero elegimos la opción **Datasets – STRESSR** para indicar al programa que vamos a analizar tensiones, y luego nuevamente click izquierdo y **Datasets – Entity – Mises** (ver **Figura 5.4**).



**Figura 5.3:** Deformación absoluta en CGX.

En Viewing podemos elegir los distintos métodos de visualización. Por ejemplo para ver las aristas del mallado vamos a **Viewing – Toggle Element Edges**. Otra de tantas opciones disponibles es cambiar el fondo de la aplicación a uno oscuro **Viewing – Toggle Background Color** o ver la una deformación visual escalada con la opción **Viewing – Toggle Add Displacement** (lamentablemente desde aquí no podemos seleccionar el factor de escala).



**Figura 5.4:** Tensiones de Von Misses en CGX y opción de cambio de color de fondo.

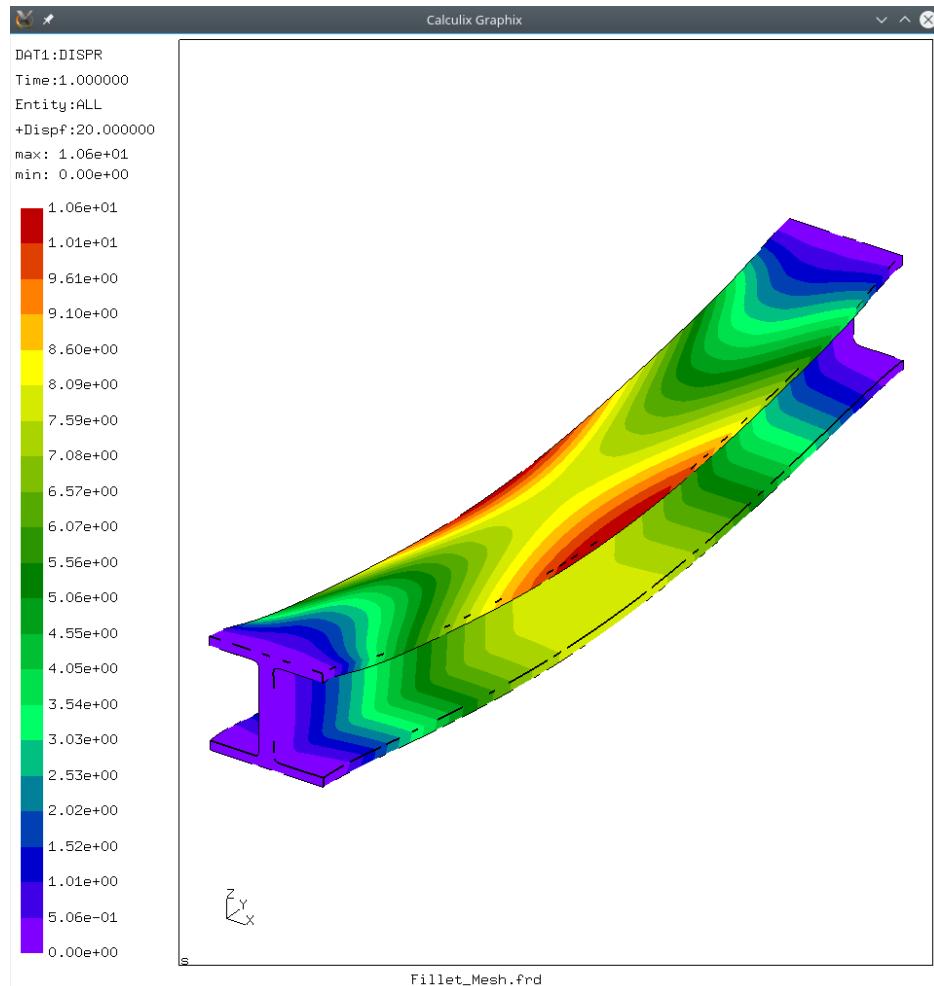
Ademas de las opciones del menú existen mas herramientas en **cgx** utilizando la linea de comandos. Es importante que para introducir las ordenes este seleccionada la ventana de **cgx** y no la terminal (o cualquier otra ventana), porque si no los comandos que introduciremos no funcionaran. Sabiendo esto teniendo las deformaciones absolutas y la opción **Toggle Add Displacement** activas introducimos la siguientes linea,

```
scal d 10
```

Lo cual nos dará como resultado visual de la viga deformada con una escala de 10 (**Figura 5.5**).

Para volver atrás introducimos,

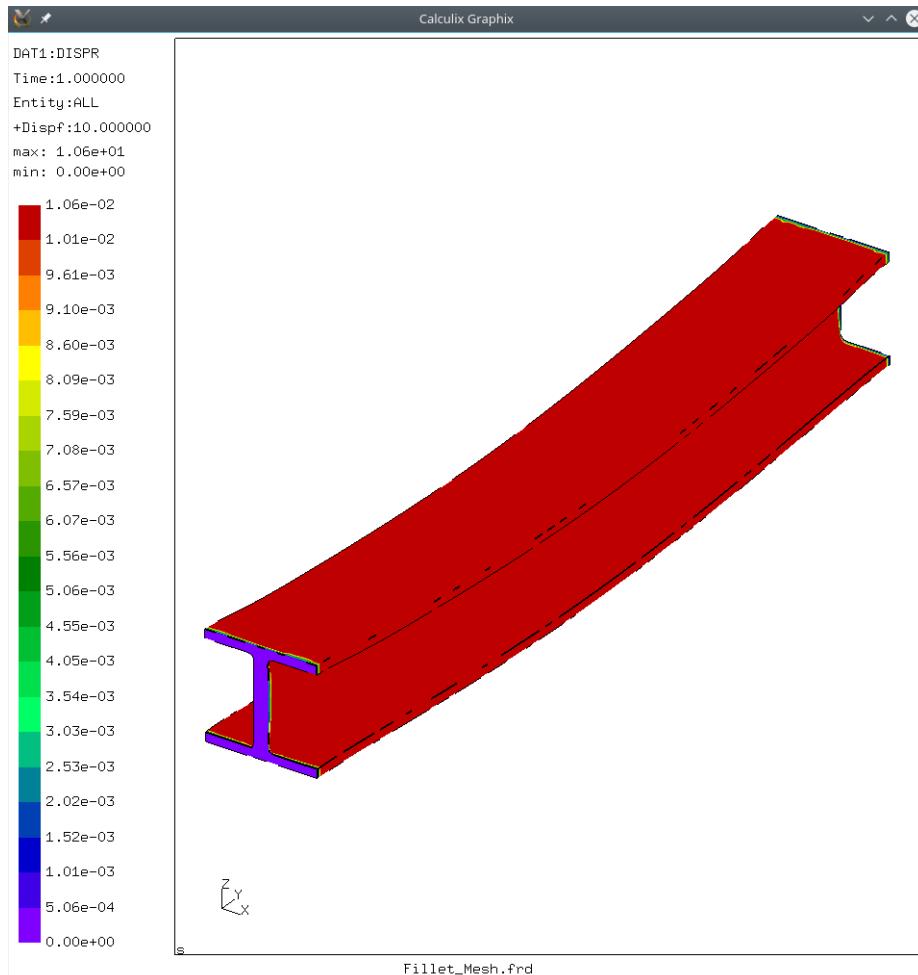
```
scal d
```



**Figura 5.5:** Deformación con un factor de escala igual a 10.

Otra opción es cambiar las unidades en que estamos visualizando los resultados escalando las mismas. Por ejemplo para ver las deformaciones en metros escalamos en 1/1000 con el siguiente comando,

```
scal s 0.001
```

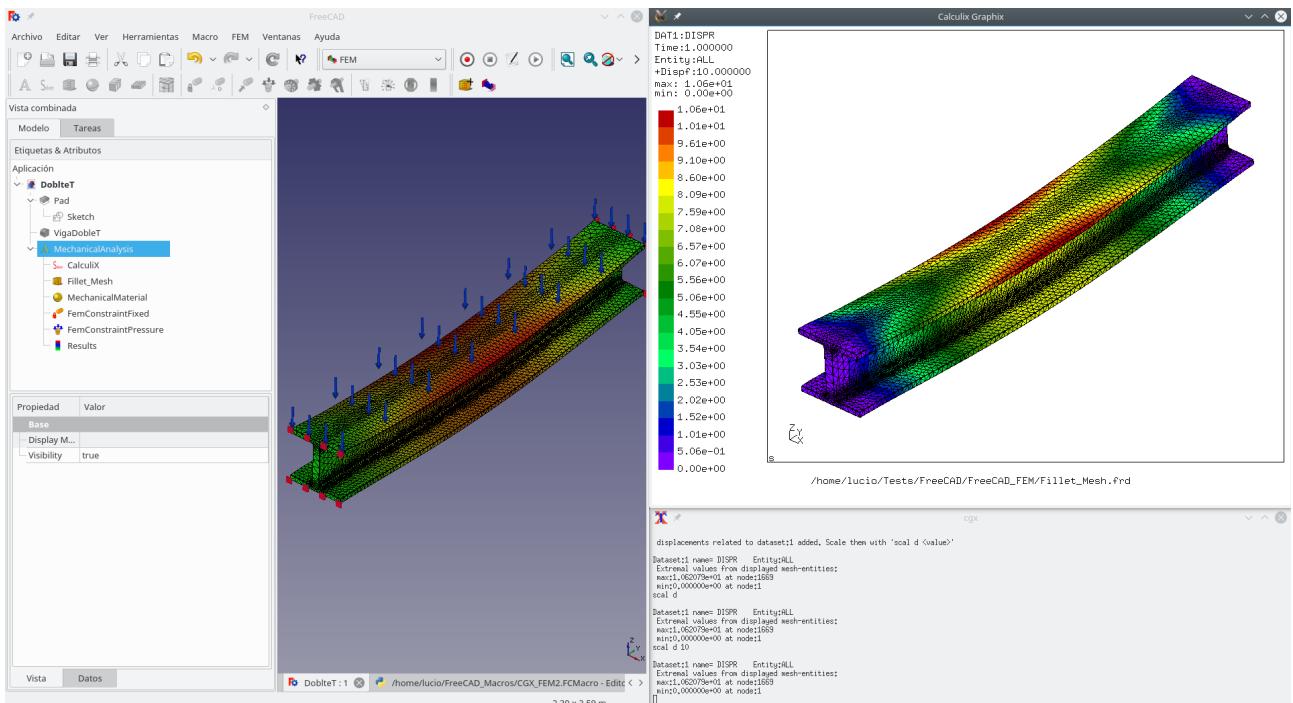


**Figura 5.6:** Deformación con un factor de escala igual a 10 con unidades en metros.

Para mas información y opciones disponibles podemos consultar el manual de usuario de CGX, referencia [4].

## 5.2 Con el Macro CGX\_FEM

Una alternativa abrir directamente `cgx`, para post-procesar nuestros resultados, desde FreeCAD es utilizar el macro **CGX\_FEM\*** seleccionando antes el análisis del cual queremos ver los resultados.



**Figura 5.7:** Post-procesando con CGX utilizando el Macro CGX\_FEM.

Se nos abrirá la ventana de **cgx**, con una consola, con nuestro análisis ya ejecutado, para poder realizar todos los pasos que hemos hecho anteriormente para post-procesar los resultados.

\*En el **Anexo B** vemos como descargar, instalar y configurar el Macro CGX\_FEM.

## **6 Resumen**

El modulo o banco de trabajo FEM de FreeCAD este en pleno desarrollo pero ya nos brinda la posibilidad de realizar un par de simulaciones básicas. En este sentido en el tutorial vimos una de sus posibles funciones al realizar un análisis estructural estático de una pieza. Pudimos ir conociendo las algunas de las distintas herramientas que nos ofrece para poder realizar y ejecutar nuestro modelo FEM. Comparamos los resultados obtenidos con los del modelo analítico también desarrollado. Y finalizamos viendo como post-procesar los resultados con el post-procesador de CalculiX CGX como complemento a los resultados obtenidos en FreeCAD.

## **7 Referencias**

[1] – [www.freecadweb.org](http://www.freecadweb.org)

[2] – VIGAS HIPERESTATICAS - Arqto. Verónica Veas B., Arqto. Jing Chang Lou - Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento Ciencia de la Construcción - Noviembre/2000.

[3] – <https://github.com/psicofil/>

[4] – CalculiX USER'S MANUAL - Klaus Wittig - CalculiX GraphiX, Version 2.10 - March 4, 2016

## **Anexo A:** Descargar, instalar y configurar el Macro GMSHMesh

### **Descargar Macro**

Esta macro esta disponible en el repositorio Github psicofil/Macros\_FreeCAD y para descargar la macro GMSHMesh existen 2 posibilidades,

- Descargando directamente del repositorio en Github
- Clonando repositorio con la herramienta git

El primer caso es el mas sencillo porque solo hay que descargar el macro y utilizarlo, pero en el segundo caso tendremos un clon del repositorio de macros anterior, por lo cual podremos actualizar nuestro macro de manera sencilla sin la necesidad de volver a descargar y reemplazar el anterior, en el caso de que haya una actualización.

En este anexo solo veremos como descargarlo de la primera forma ya que la segunda necesita de conocimientos sobre repositorios y la herramienta git, y escapa de los objetivos de este tutorial.

Por lo tanto para descargar la macro nos dirigiremos al siguiente enlace,

[https://github.com/psicofil/Macros\\_FreeCAD/blob/master/Macros/GMSHMesh.FCMacro](https://github.com/psicofil/Macros_FreeCAD/blob/master/Macros/GMSHMesh.FCMacro)

Veremos el código completo de la macro y para descargarlo tenemos que ir a la opción Raw como se muestra en la siguiente imagen,

The screenshot shows a GitHub repository page for 'psicofil / Macros\_FreeCAD'. The repository has 6 pull requests, 4 stars, and 4 forks. The current branch is 'master' and the file being viewed is 'Macros\_FreeCAD / Macros / GMSHMesh.FCMacro'. The file contains 248 lines (230 sloc) and is 9.72 KB. The code is a Python script for a GMSH mesh macro. A red arrow points to the 'Raw' button in the top right corner of the code editor.

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 # Mesh with GMSH inside of FreeCAD
3 # Author: Gomez Lucio
4 # Modified by: PrzemekF
5 # Modified by: Bernd Hahnebach (bernd@bimstatik.org)
6 # License: LGPL v 2.1
7 # Version: 04/07/2015
8
9 # CONFIGURATION - EDIT THE FOLLOWING LINE TO MATCH YOUR GMSH BINARY
10 gmsh_bin_linux = "/usr/bin/gmsh"
11 gmsh_bin_windows = "C:\\\\Daten\\\\gmsh-2.10.0-Windows\\\\gmsh.exe"
12 gmsh_bin_other = "/usr/bin/gmsh"
13 # END CONFIGURATION
14
15 # START OF MACRO
16 from PySide import QtGui, QtCore
17 import Fem
18 import FemGui
19 import FemAnalysis
20 import FreeCAD
21 import FreeCADGui
22 import ImportGui
23 import Mesh
24 import subprocess
25 import sys
26 import tempfile
27 from platform import system
28 if system() == "Linux":
29     gmsh_bin = gmsh_bin_linux
30     path_sep = "/"
31 elif system() == "Windows":
32     gmsh_bin = gmsh_bin_windows

```

En este punto podremos descargar el macro en un lugar conocido.

## Instalar Macro

Para instalar la macro anterior debemos copiar (o cortar) el archivo bajado anteriormente en la carpeta de Macros de FreeCAD, para que la misma este disponible desde el menú de macros de FreeCAD (**Macro – Macros...**) y como ultimo paso solo faltara configurarla antes de poder usarla\*.

\* Para saber mas de las macros en FreeCAD recomiendo leer la entrada de este blog sobre las mismas y/o la documentación oficial.

<http://ingenierialibreyabierta.blogspot.com.ar/2016/04/las-macros-en-freecad.html>

También es necesario tener instalado **Gmsh** en nuestro sistema operativo y conocer la dirección del ejecutable del mismo.

## Configurar Macro

Para configurar debemos abrir el archivo de texto de la macro con un editor de texto externo o desde el que nos ofrece FreeCAD con la opción **Editar** desde el menú de macros (**Macro – Macros...**) con la macro correspondiente seleccionada.

Una vez en la macro debemos modificar las líneas de código que nos pide la dirección del binario de Gmsh en nuestro sistema como se señala en la siguiente imagen,

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 # Mesh with GMSH inside of FreeCAD
3 # Author: Gomez Lucio
4 # Modified by: PrzemekF
5 # Modified by: Bernd Hahnebach (bernd@bimstatik.org)
6 # License: LGPL v 2.1
7 # Version: 04/07/2015
8
9 # CONFIGURATION - EDIT THE FOLLOWING LINE TO MATCH YOUR GMSH BINARY
10 gmsh_bin_linux = "/usr/bin/gmsh"
11 gmsh_bin_windows = "C:\\Daten\\gmsh-2.10.0-Windows\\gmsh.exe"
12 gmsh_bin_other = "/usr/bin/gmsh"
13 # END CONFIGURATION
14
15 # START OF MACRO
16 from PySide import QtGui, QtCore
17 import Fem
18 import FemGui
19 import FemAnalysis
20 import FreeCAD
21 import FreeCADGui
22 import ImportGui
23 import Mesh
24 import subprocess
25 import sys
26 import tempfile
27 from platform import system
28 if system() == "Linux":
29     gmsh_bin = gmsh_bin_linux
30     path_sep = "/"
31 elif system() == "Windows":
32     gmsh_bin = gmsh_bin_windows
33     path_sep = "\\"
34 else:
35     gmsh_bin = gmsh_bin_other
36     path_sep = "/"
37
38 class MeshGmsh(QtGui.QWidget):
39     def __init__(self):
40         super(MeshGmsh, self).__init__()
41         self.initUI()
42

```



En la misma macro existe unos ejemplos de referencia para cada sistema operativo. Una vez configurado el binario la macro está lista para ser usada.

## **Anexo B:** Descargar, instalar y configurar el Macro CGX\_FEM

### **Descargar Macro**

Al igual que en el caso anterior (Anexo A) podemos utilizar git para clonar el repositorio o descargar directamente la macro. Para ello procedemos a realizar los mismos pasos que antes pero desde el siguiente enlace que contiene el macro,

[https://github.com/psicofil/Macros\\_FreeCAD/blob/master/Macros/CGX\\_FEM.FCMacro](https://github.com/psicofil/Macros_FreeCAD/blob/master/Macros/CGX_FEM.FCMacro)

### **Instalar Macro**

Para instalar la macro se deben seguir los mismos pasos que el caso anterior (Anexo A) y es necesario tener instalado cgx que podemos descargar distintos binarios desde la pagina oficial o de la pagina de bconverged un instalable para windows.

### **Configurar Macro**

Al igual que en el caso anterior (Anexo A) hay que configurar los binarios de CGX y Xterm dentro de la macro antes de ejecutar la misma por primera vez.

Para ello como vemos en la imagen siguiente editamos las direcciones de los binarios correspondientes.

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 ## CGX PostProcessing in FreeCAD
3 # Author: Gomez Lucio
4 # Modified by: Przemof
5 # License: LGPL v 2.1
6 # Version: 24/04/2016
7
8 ##### CONFIGURATION #####
9
10 # Linux
11 use_xterm = 0 # Do you want use xterm? 1 if yes, 0 if no (only work in Linux)
12 cgx_bin = '/home/lucio/Calculix/cgx_2.9' # CGX binary example for Linux
13
14 # Windows
15 # cgx_bin = '"C:\\Program Files (x86)\\bConverged\\Calculix\\cgx\\cgx"' # CGX binary example for windows
16
17 ##### START MACRO #####
18
19 import FreeCADGui
20 import FreeCAD
21 from PySide import QtCore, QtGui
22 from platform import system
23
24 selection = FreeCADGui.Selection.getSelection()
25 if len(selection) == 1:
26     sel = selection[0]
27     # print '\nSelected Object: ',sel.Name
28     if hasattr(sel,"Proxy") and sel.Proxy.Type == 'FemAnalysis':
29         # print sel.Name
30         analysis = sel
31         for m in analysis.Member:
32             if m.isDerivedFrom("Fem::FemMeshObject"):
33                 filename = m.Name
34                 break
35         else: # for loop runs through all members but no mesh found
36             print 'No Mesh --> No Output'
37         ccxoutputdir = sel.OutList[0].WorkingDir
38         from platform import system
39         if system() == "Linux":
40             filename = ccxoutputdir + '/' + filename + '.frd'
41             cgxcommand = cgx_bin + ' -v ' + filename

```

En este caso hay que comentar la linea (con el asterisco `#`) la linea correspondientes a los sistemas operativos que no dispongamos en nuestro computador.

Si queremos utilizar Xterm como consola para los comandos de cgx cambiamos la opción **use\_xterm = 0** por **use\_xterm = 1**.

En el caso de utilizar el sistema operativo windows y utilizando el ejecutable de bconverged no es necesario configura Xterm y es necesario mantener la opción **use\_xterm = 0**.